



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.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

**Étude de l'effet de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques
des matériaux naturels (sable et silt)**

ADRIEN CABREL DJOMO BOUYEM

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie minéral

Janvier 2025

© Adrien Cabrel DJOMO BOUYEM, 2025.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire s'intitule :

**Étude de l'effet de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques
des matériaux naturels (sable et silt)**

Présentée par **Adrien Cabrel DJOMO BOUYEM**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Carlos OVALLE, président

Abdelkabir MAQSoud, membre et directeur de recherche

Tikou BELEM, membre et codirecteur de recherche

Terence EPULE EPULE, membre externe

DÉDICACE

Je dédie ce travail,

À mon papa et à ma maman pour leur dévouement à notre éducation.

*À mes frères et sœurs pour leur assistance inconditionnelle et leur accompagnement et soutien
dans toutes mes entreprises.*

REMERCIEMENTS

Parvenu au terme de la rédaction de ce mémoire, je tiens tout d'abord à remercier le Dieu Tout-Puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Par la suite, mes remerciements vont tout naturellement à l'endroit de tous ceux et celles qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Sans toutefois être exhaustif, je dis merci :

- Au Pr Abdelkabar MAQSOU, mon directeur de recherche, pour la confiance placée en moi, son encadrement et sa patience. Merci directeur de m'avoir permis de vivre cette expérience positive et enrichissante à l'IRME ;
- Au Pr Tikou BELEM, mon codirecteur pour sa disponibilité, son souci du détail, sa rigueur, ses conseils, sa positivité et sa gentillesse légendaire. Merci co-directeur d'avoir accepté de contribuer à faire de moi le chercheur que je suis.

Qu'il me soit également permis de remercier l'ensemble du corps enseignant de l'IRME de l'UQAT. Je pense, notamment, aux Pr Mamert MBONIMPA, Pr Benoît PLANTE, Pr Carmen NECULITA, Pr Isabelle DEMERS et tous ceux et celles dont les noms ne figurent pas ici, pour la formation reçue tout au long de ce programme.

Un grand merci à l'équipe de l'URSTM, en particulier au Dr Akué Sylvette, Mme Josée GRENIER, M. Alain PERRAULT, M. Jean-Christophe TURCOTTE, Mme Cathy CHOUINARD, Dr Gwendoline HOTTON pour leur aide, leur collaboration et leur gentillesse.

Je tiens également à remercier le professeur Walid GHIE de l'école du génie (UQAT), pour son aide précieuse lors de l'établissement des équations de régressions linéaires multiples.

J'adresse un merci particulier à mon papa BOUYEM Emmanuel, ma maman DJEUTCHOUANG Lucienne épouse BOUYEM, mes frères William, Willy, Alberto et Donald et mes sœurs Sorelle et Joyce, pour leur encouragement et soutien inconditionnel.

Un merci spécial à ma très chère et tendre fiancée TOUTCHO MANIALEU Elsa Vianey pour ses encouragements et son soutien dans tous mes projets.

Je remercie également mes amis, SAREH Sory Ibrahim, MBEUSSI Guy Donald, monsieur et madame KALIVOGUI, NEUCHY Larissa, KAMGA Lauriane et Emmanuel Evrard NIAMKÉ pour les bons moments passés durant ces deux années à Rouyn-Noranda et pour leurs

accompagnements, assistances et conseils. Enfin, je tiens à remercier tous mes amis au Cameroun qui ont toujours été à mes côtés malgré la distance.

Un merci également adressé à l'endroit de tous ceux et celles qui de près ou de loin ont participé au succès de ce projet et qui se sentiraient lésés.

RÉSUMÉ

Chaque année, les exploitations minières produisent d'importantes quantités de rejets miniers sous forme de roches stériles et de résidus miniers. Généralement entreposés en surface dans des parcs à résidus, les résidus miniers peuvent présenter avoir des instabilités du point de vue géotechniques et chimiques. Ainsi, dans certaines conditions, ces résidus peuvent contenir des minéraux sulfurés qui pourront s'oxyder lors de leur exposition à l'oxygène atmosphérique et à l'eau des précipitations générant ainsi du drainage minier acide (DMA). Ce dernier peut contaminer les eaux de surface et souterraine engendrant ainsi un impact sur l'environnement. Différentes techniques de restauration peuvent être utilisées pour limiter la production du DMA. Il s'agit notamment de couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC) et du recouvrement monocouche combinée à une nappe phréatique surélevée (NPS). La performance de la couverture est principalement évaluée à l'aide de teneurs en eau volumiques et de succions. Les teneurs en eau volumiques peuvent être affectées par la minéralisation du sol, la température et les teneurs en matière organique (MO); de ce fait la performance du recouvrement ne peut être évaluée de manière adéquate.

Cette présente étude s'est donnée pour but d'évaluer l'effet de la teneur en MO sur les propriétés hydriques des sols, tel que leur courbe de rétention d'eau (CRE) et leur conductivité hydraulique saturée (k_{sat}). De même que vise à évaluer l'impact de l'ajout de MO sur la performance de certaines techniques de restauration. Pour ce faire, des essais au laboratoire ont été réalisés dans un premier temps sur des matériaux sableux et silteux amendés avec de la tourbe à différentes concentrations (0 %, 1 %, 3 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % et 15 %), afin de mesurer les courbes de rétention d'eau et les conductivités hydrauliques saturées (1^{ère} Étape). Puis dans un deuxième temps, une équation prédictive de la CRE a été proposée (2^{ème} étape). Enfin, dans un troisième temps, des simulations numériques ont été réalisées afin d'évaluer également le comportement des matériaux amendés dans différents scénarios en contexte de CEBC (3^{ème} étape).

Les résultats des essais hydrogéologiques réalisés sur les différents mélanges montrent que plus la proportion de tourbe est grande, plus la conductivité hydraulique saturée des mélanges du sable devient faible (10^{-4} à 10^{-5} m/s). En revanche, dans le cas des mélanges du silt, une augmentation de la teneur en tourbe engendre une légère augmentation de la k_{sat} jusqu'au mélange à 5 % de tourbe et une faible diminution de la k_{sat} à partir de 7,5 % tourbe.

Les résultats des mesures de la CRE des mélanges du sable font état d'une grande capacité de rétention d'eau pour le mélange à 7,5 % de tourbe et aucun changement pour les autres mélanges. Concernant les mélanges du silt, on note une augmentation de la capacité de rétention d'eau à 3 %, 12,5 % et 15 %. Et presque aucune variation de la pression d'entrée de l'air (AEV – pression à partir de laquelle les matériaux commencent à se désaturer) n'est observée pour les autres proportions de tourbes.

Au regard des résultats obtenus, on peut conclure que la présence de la tourbe diminue la k_{sat} du sable, en plus, on a observé des modifications au niveau des capacités de rétention des matériaux amendés. Pour les mélanges du sable à 7,5 % de tourbe, on a obtenu la plus grande capacité de rétention d'eau. Cependant, pour les mélanges du silt, la plus grande capacité de rétention a été acquise à 3 %, suivit de celle à 15 et à 12,5 % de tourbe. Ces résultats, qui témoignent d'une modification considérable des propriétés hydrogéologiques du sable et du silt, démontrent à certaines mesures que la tourbe contrôle le comportement non saturé à certaines teneurs.

Les résultats de prédiction de la CRE obtenue pour quatorze (14) mélanges, avec sept (7) du sable et sept (7) du silt, disponibles à partir des tests au laboratoire révèlent une excellente corrélation entre les courbes de rétention d'eau prédites et celles expérimentales. Les coefficients de détermination (R^2) des équations de régression développées et utilisées dans le modèle de Fredlund & Xing (1994), pour prédire la CRE du sable et du silt amendé avec la tourbe, varient de 0,977 à 0,998. Les erreurs introduites par le modèle de prédiction sont du même ordre de grandeur que les erreurs expérimentales.

Les résultats de la simulation numérique montrent que la présence de la tourbe a considérablement affecté les performances de la CEBC, et plus particulièrement celles de la couche de rétention d'humidité (CRH), qui reste saturée à long terme sans aucun apport d'eau et ce fait favorise le maintien de la saturation de la couche de rétention d'humidité. Cela est dû à la grande conductivité hydraulique non saturée de ce sable, qui se draine plus rapidement que le silt et atténue l'effet de la succion à la base du modèle, créé en raison de la position basse de la nappe (5 m sous les résidus).

ABSTRACT

Each year, mining operations yield considerable quantities of mine waste in the form of waste rock and mine tailings. Typically stored on the surface in waste rock piles or tailings impoundments, respectively. However, they can cause geotechnical, chemical and geochemical disturbances, and can even be sources of contaminants in the surface and groundwater, posing risks to the environment. In certain conditions, these tailings may contain sulphide minerals that can oxidize when exposed to atmospheric oxygen and precipitation water, resulting in acid mine drainage (AMD). Various reclamation techniques can be used to limit the production of AMD. These include capillary barrier covers and single layer covers combined with water table elevation. The performance of the cover is mainly assessed based on volumetric water content and suction. Volumetric water content can be affected by soil mineralization, temperature and organic matter content (OMC), and therefore cover performance cannot be adequately assessed.

The aim of this study was to evaluate the effect of organic matter content (OMC) on the water retention curve (WRC) and saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) of natural and recycled materials and, consequently, on the performance of certain reclamation techniques (CEBC and NPS). To this end, laboratory tests were first carried out on sandy and silty materials amended with peat at various concentrations (0%, 1%, 3%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15%) to establish water retention curves and saturated hydraulic conductivity (step 1). Then, in a second step, a prediction equation for the WRC was proposed (step 2). Finally, in a third step, numerical simulations were carried out to assess the behaviour of the modified materials in different scenarios in a CEBC context (step 3).

The results of the hydrogeological tests carried out on the different mixtures show that the higher the peat content, the lower the saturated hydraulic conductivity of the sand mixtures (10^{-4} to 10^{-5} m/s). Conversely, for the silt mixtures, increasing the peat content results in a slight increase in k_{sat} up to the 5% peat mixture and a slight decrease in k_{sat} from 7.5% to 15% peat mixture.

The results of the water-holding capacity measurements of the sand mixtures show a high-water holding capacity for the mixtures with 7.5% peat and no change for the other mixtures. For the silt mixes, there was an increase in water-holding capacity at 3%, 12.5% and 15%. And almost no variation in AEV was observed for the other peat proportions.

The results of the WRC prediction equation obtained from laboratory tests for fourteen (14) mixtures, seven (7) of sand and seven (7) of silt, show excellent agreement between the predicted

and experimental water retention curves. The regression equations developed and used in the Fredlund & Xing (1994) model to predict the WRC of sand and silt amended with peat had coefficients of determination (R^2) ranging from 0.977 to 0.998. The errors introduced by the prediction model are of the same order of magnitude as the experimental errors.

From the results obtained, we can say that the presence of peat reduces the k_{sat} of the sand. There were also changes in the retention capacity. The sand mixtures with 7.5% peat had the highest water retention capacity. However, for the silt mixtures, the highest retention capacity was obtained with 3% peat, followed by 15 and 12.5% peat. These results, which show a significant change in the hydrogeological properties of sand and silt, demonstrate that peat at certain concentrations controls unsaturated behaviour.

The results of the numerical simulation show that the presence of peat has significantly affected the performance of the CEBC, and more specifically that of the moisture retention layer (MRL), which remains saturated in the long term without any water input and will favour the saturation of the underlying tailings. This is due to the high unsaturated hydraulic conductivity of this sand, which drains more quickly than silt and mitigates the suction effect at the base of the model, created by the position of the water table at 5 m below the tailings.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT.....	VIII
TABLE DES MATIÈRES.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XXI
LISTE DES ANNEXES.....	XXVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Hypothèses de recherche.....	3
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	3
1.4 Structure du mémoire.....	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
2.1 Généralité sur la gestion des résidus miniers en surface.....	5
2.1.1 Types de rejets miniers solides.....	7
2.1.2 Méthode de dépôt des résidus miniers.....	7
2.2 Généralité sur le drainage minier acide (DMA).....	9
2.2.1 Formation du DMA.....	10
2.2.2 Neutralisation du DMA.....	11
2.2.3 Gestion du DMA.....	12
2.3 Recouvrement multicouche (Couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC)).....	15

2.3.1	Principe de fonctionnement et configuration d'une CEBC.....	15
2.3.2	Rôle et caractéristiques des matériaux constitutifs d'une CEBC à cinq couches ..	16
2.4	Couverture monocouche avec nappe phréatique surélevée (NPS).....	17
2.4.1	Principe de fonctionnement et configuration de la NPS	18
2.5	Notions d'écoulement de l'eau en milieux poreux.....	19
2.5.1	Écoulement de l'eau en milieu poreux saturé	20
2.5.2	Écoulement de l'eau en milieu poreux non saturé	26
2.6	La matière organique et ses propriétés	40
2.6.1	Caractéristiques de la matière organique	40
2.6.2	Influence de la matière organique sur la courbe de rétention des sols	42
2.6.3	Influence de la matière organique sur la conductivité hydraulique des sols	47
2.6.4	Influence de la matière organique sur la distribution granulométrique des sols ...	49
2.6.5	Teneur de la matière organique dans le sol	50
2.7	Généralité sur les tourbières	52
2.7.1	Les types de tourbières	52
2.7.2	Propriétés hydrauliques des tourbières.....	53
2.7.3	Tests au Laboratoire pour la mesure de la k_{sat} et de la CRE	56
CHAPITRE 3 APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES.....		64
3.1	Matériaux utilisés	66
3.2	Caractérisation géotechnique des matériaux de base et de la tourbe	67
3.2.1	Préparation des mélanges	67
3.2.2	Densité relative des grains solides	67
3.2.3	Limites d'Atterberg.....	69
3.2.4	Analyses granulométriques	72

3.2.5	Caractérisation de la matière organique	79
3.2.6	Caractérisation chimique et minéralogique des matériaux de base.....	81
3.3	Caractérisations hydrogéotechniques.....	84
3.3.1	Détermination de la conductivité hydraulique saturée	84
3.3.2	Détermination de la courbe de rétention d'eau	91
3.4	Modèle prédictif de CRE.....	96
3.4.1	Modèle adopté et spécifications	98
3.4.2	L'analyse de régression.....	100
3.4.3	L'analyse en composantes principales (ACP) avec XLSTAT 2024.....	101
3.4.4	Précision des prédictions.....	102
3.5	Méthode de simulation numérique.....	104
3.5.1	Description du modèle	104
3.5.2	Propriété des matériaux.....	105
3.5.3	Géométrie du modèle et procédures de simulation.....	107
CHAPITRE 4 ARTICLE : ORGANIC MATTER CONTENT INFLUENCE ON THE HYDRAULIC PROPERTIES OF SANDY MATERIAL		109
	Introduction.....	110
	Materials and methods	111
	Results and discussion.....	116
	Conclusion.....	125
CHAPITRE 5 COMPLÉMENT DE RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....		126
5.1	Résultats des caractérisations hydrogéotechniques du silt et ses mélanges	126
5.1.1	Conductivité hydraulique saturée du silt et ses mélanges.....	126
5.1.2	Courbe de rétention d'eau du silt et ses mélanges	127
5.2	Impact de la tourbe sur les propriétés hydrauliques.....	131

5.2.1	Impact de la tourbe sur la conductivité hydraulique du sable et du silt	131
5.2.2	Impact de la tourbe sur la courbe de rétention d'eau du sable et du silt	133
5.3	Résultats de la prédiction des CRE	135
5.3.1	Résultats de la prédiction des CRE du Silt et ses mélanges	135
5.3.2	Précision des prédictions	139
5.4	Résultats de la simulation numérique	140
5.4.1	Simulations réalisées	140
5.4.2	Résultats des simulations	141
5.4.3	Impact de la tourbe sur la performance des CEBC	146
5.5	Contraintes liées au projet	147
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		149
6.1	Conclusion	149
6.2	Recommandations	151
RÉFÉRENCES		152
ANNEXES		167

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Équations mathématiques du modèle de Kozeny-Carman modifié d'estimation de la $k_{sat,G}$.	25
Tableau 2.2 Méthodes d'évaluation de la CRE en fonction des succions (Fredlund & Rahardjo, 1993; Lal <i>et al.</i> , 2004).	32
Tableau 2.3 Formules mathématiques des modèles descriptifs les plus utilisés pour évaluer la CRE.	33
Tableau 2.4 Expression des différents paramètres en fonction de la nature du matériau.	36
Tableau 2.5 Différents types de matières organiques et leur fonction (Huber & Schaub, 2011).	42
Tableau 2.6 Effets observés de la teneur en matière organique sur la rétention d'eau du sol à deux succions -33 et -1 500 kPa.	47
Tableau 2.7 Teneur de la matière organique du sol selon certains auteurs dans leurs travaux.	50
Tableau 2.8 Niveaux de matière organique du sol selon la texture.	51
Tableau 2.9 Synthèse de la proportion en carbone organique dans les sols de l'Abitibi et du Témiscamingue (Rompré & Carrier, 1997).	51
Tableau 2.10 Valeurs de la k_{sat} de certaines études sélectionnées dans diverses tourbières.	55
Tableau 2.11 Méthodes de laboratoires utilisées pour la détermination de la k_{sat} .	57
Tableau 2.12 Méthodes de laboratoires utilisées pour la détermination de la CRE.	60
Tableau 2.13 Récapitulatif des équations des modèles d'ajustement des propriétés hydrauliques des tourbes.	61
Tableau 3.1 Teneurs en eau massiques des matériaux de base et de la tourbe.	66
Tableau 3.2 Densité relative des matériaux de base et de la tourbe.	68
Tableau 3.3 Densité relative des mélanges sable-tourbe et silt-tourbe.	69
Tableau 3.4 Paramètres des limites d'Atterberg du silt et ses mélanges.	71
Tableau 3.5 Paramètres granulométriques des matériaux de base et de la tourbe.	75
Tableau 3.6 Paramètres granulométriques du sable et de ses mélanges avec la tourbe.	78

Tableau 3.7 Paramètres granulométriques du silt et des mélanges de silt-tourbe.....	78
Tableau 3.8 Calcul de la teneur en fibre de la tourbe.....	80
Tableau 3.9 Résultats des analyses chimiques du silt et sable par ICP-AES.....	82
Tableau 3.10 Résultats des analyses chimiques du silt et du sable par XRF.....	82
Tableau 3.11 Principaux paramètres hydrauliques des matériaux utilisés pour les simulations dans SEEP/W.....	107
Tableau 4.1 Materials and the different mixtures geotechnical properties.....	113
Tableau 4.2 Measured hydraulic conductivity of sand and its mixtures with peat.....	116
Tableau 4.3 Summary of the AEV, θ_s and ψ_r values for sand and its mixtures.....	120
Tableau 4.4 Correlation matrix between different parameters.....	121
Tableau 4.5 Predicted coefficients for the Fredlund and Xing model parameters.....	122
Tableau 4.6 Statistics to evaluate the accuracy of the equations.....	123
Tableau 4.7 Adjusted performance indicators of predicting equation for WRC.....	124
Tableau 5.1 Conductivité hydraulique mesurée du silt et ses mélanges avec la tourbe.....	126
Tableau 5.2 Récapitulatif des valeurs de l'AEV, de la θ_s et de la ψ_r du silt et ses mélanges.....	130
Tableau 5.3 Récapitulatif des paramètres mesurés et prédits pour le silt et ses mélanges.....	136
Tableau 5.4 Les variables et coefficients du modèle prédictif de la CRE et leur valeur, la valeur critique de F et les coefficients de détermination pour le silt et ses mélanges.....	139
Tableau 5.5 Principales caractéristiques des simulations effectuées.....	141
Tableau 5.6 Résultats de calcul du S_r pour le scénario C1 comparés aux résultats des scénarios C2 et C3.....	146

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Configurations usuelles des digues de parcs à résidus miniers (tirée de Aubertin <i>et al.</i> , 2002).....	6
Figure 2.2 Types d'empilement de roches stériles (tirée de Aubertin <i>et al.</i> , 2002).....	6
Figure 2.3 Méthodes de décharge par : (a) lances à robinet. (b) dépôt ponctuel (tirée de Vick, 1990).	8
Figure 2.4 Méthode de décharge par hydrocyclone (tirée de Blight, 2010).....	9
Figure 2.5 Les phases et les équations successives de la formation du DMA par l'oxydation de la pyrite en fonction du temps et du pH de l'eau (tirée de Aubertin <i>et al.</i> , 2002).....	11
Figure 2.6 Stratégies biologiques et abiotiques de traitement du DMA (tirée de Genty, 2012). ...	13
Figure 2.7 Diverses approches évaluées pour prévenir ou minimiser la production d'eaux de DMA (tirée de Johnson & Hallberg, 2005).	14
Figure 2.8 Configuration typique d'une CEBC avec cinq couches de différents matériaux (tirée de Aubertin <i>et al.</i> , 2002).	16
Figure 2.9 Schéma d'une nappe phréatique surélevée dans des résidus réactifs pour contrôler la production du DMA à long terme (tirée de Aubertin <i>et al.</i> (1999)).....	19
Figure 2.10 Répartition en profil de l'humidité dans les sols et la distinction entre la zone saturée et la zone non saturée (tirée de (Musy, 2001)).....	20
Figure 2.11 Écoulement à travers la colonne de sable pour démontrer la loi de Darcy.....	21
Figure 2.12 Volume élémentaire de sol avec le bilan (entrée et sortie) des débits (tirée de Hillel, 1980).....	27
Figure 2.13 Représentation d'une courbe de rétention d'eau avec les points caractéristiques et les trois phases (tirée de (Parent, 2003)).....	31
Figure 2.14 Courbes de rétention d'eau schématisées avec effets d'hystérésis. IDC est la courbe initiale en drainage, MWC est la courbe principale en mouillage, MDC est la courbe principale en drainage, PDSC est une courbe intermédiaire en drainage, PWSC est une courbe	

intermédiaire en mouillage, θ_0 : teneur en eau maximale à saturation (aussi notée θ_{\max} parfois) (Bussière, 1999).	38
Figure 2.15 Fonctions de perméabilité schématisées pour un sable et un silt (tirée de Aubertin et al., 1995).	39
Figure 2.16 Principales sources d'intrants qui forment la matière organique du sol (tirée de (Quideau et al., 2021).	41
Figure 2.17 Schémas des CRE du sol à haute et à faible teneur en matières organiques : (a) un sable argileux et (b) un sable propre.	45
Figure 2.18 CRE du kaolin avec différentes valeurs de teneur en matière organique : a) 0%, b) 20%, c) 50% et d) 75%.	45
Figure 2.19 Variation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) en fonction de la teneur en sciure de bois.	48
Figure 2.20 Courbes de rétention d'eau pour différents sols tourbeux et minéraux (tirée de Szajdak et al., 2011).	56
Figure 2.21 Dispositif expérimental pour la détermination de la k_{sat} avec la méthode ascendante, à charge constante.	58
Figure 2.22 La méthode du cube modifié et le dispositif expérimental pour la détermination de la k_{sat} .	59
Figure 2.23 Cuve expérimentale de laboratoire construite pour les mesures de conductivité hydraulique de l'acrotelme.	60
Figure 2.24 Courbe de rétention d'eau (a) et Courbe de conductivité hydraulique (b) des échantillons A (Mousse de sphaigne vivante) et B (tourbe décomposée) (Tirée de Weber et al., 2017a).	63
Figure 3.1 Organigramme de la méthodologie de l'étude.	65
Figure 3.2 Matériaux utilisés pour les caractérisations et les essais.	66
Figure 3.3 Pycnomètre à hélium Ultrapyc 1200e de Quantachrome Instruments.	68
Figure 3.4 Différents états de consistances (adaptée de Tremblay & Robitaille 2014).	70

Figure 3.5 Pénétrömètre à cône suédois Tremblay & Robitaille (2014).....	71
Figure 3.6 Diagramme de plasticité (adaptée de Tremblay and Robitaille (2014)).....	72
Figure 3.7 a) Granulomètre laser MASTERSIZER 3000 de Malvern Panalytical ; b) Série de tamis de différents diamètres.	73
Figure 3.8 Courbes granulométriques du sable, du silt et de la tourbe.	75
Figure 3.9 Courbes granulométriques du sable, de la tourbe et des mélanges sable-tourbe à différentes teneurs en tourbe.	77
Figure 3.10 Courbes granulométriques du silt, de la tourbe et des mélanges silt-tourbe à différentes teneurs en tourbe.	77
Figure 3.11 Résultats des analyses minéralogiques sur le Silt (a) et le sable (b).....	83
Figure 3.12 Équipements nécessaires pour la réalisation de l'essai.....	86
Figure 3.13 Mise en place (a) et saturation (b) de l'échantillon dans le perméamètre et la prise des mesures (c).	86
Figure 3.14 Équipements nécessaires pour la réalisation de l'essai.....	88
Figure 3.15 Mise en place (a et b) de l'échantillon dans le perméamètre et saturation de l'échantillon et prise des mesures (c).	89
Figure 3.16 Schéma du principe de mesure de la conductivité hydraulique saturée (Fouché, 2013).	90
Figure 3.17 Schéma du principe de mesure de la conductivité hydraulique saturée (Fouché, 2013).	91
Figure 3.18 a) Table de tension et ses composantes, b) Échantillons placés dans les dessiccateurs, c) création du vide dans les dessiccateurs à l'aide d'un vacuum, d) Échantillons placés dans la table à tension et prêt pour le test.	94
Figure 3.19 a) Équipement nécessaire à la réalisation de l'essai, b) Échantillons placés dans les dessiccateurs, c) circuit de l'essai en cellule de pression (300 kPa).	96
Figure 3.20 Étapes de la détermination des paramètres prédits.	98

Figure 3.21 Un exemple de tracé pour la solution graphique des quatre paramètres (a_f , m_f , n_f , et ψr) (tiré de Fredlund and Xing (1994)).	100
Figure 3.22 CRE des matériaux estimée par le logiciel SEEP/W avec la fonction de van Genuchten (1980).	106
Figure 3.23 Fonctions de conductivité hydraulique des matériaux entrées dans le logiciel SEEP/W.	106
Figure 3.24 Exemple de géométrie du modèle simulé avec SEEP/W.	108
Figure 4.1 Particle size distribution curve for sand, and peat.	112
Figure 4.2 Sandbox device used for WRC measurement.	114
Figure 4.3 Graphical determination of Fredlund and Xing (1994) parameters.	116
Figure 4.4 Correlation between peat content and k_{sat} .	117
Figure 4.5 Water retention curves for sand and sand mixtures.	119
Figure 4.6 Predicted parameter plotted against observed.	123
Figure 4.7 Predictions of volumetric water content plotted against measurements.	125
Figure 5.1 Courbes de rétention d'eau de la tourbe (a) et du silt (b).	128
Figure 5.2 Courbes de rétention d'eau du silt et ses mélanges.	129
Figure 5.3 Courbe de rétention mesurée et ajustée à l'aide du modèle RETC de van Genuchten.	130
Figure 5.4 Variation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) du sable en fonction des teneurs en tourbe.	132
Figure 5.5 Variation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) du silt en fonction des teneurs en tourbe.	132
Figure 5.6 Variation de la pression d'entrée d'air (AEV) du sable en fonction des teneurs en tourbe.	134
Figure 5.7 Variation de la pression d'entrée d'air (AEV) du silt en fonction des teneurs en tourbe.	134

Figure 5.8 comparaison des paramètres prédits à ceux observés.....	136
Figure 5.9 Courbes de rétention d'eau mesurée et prédite du silt et de ses mélanges.	138
Figure 5.10 Comparaison entre les valeurs mesurées de la teneur en eau volumique du silt et ses mélanges et celles estimées par régression.	140
Figure 5.11 Évolution des pressions en fonction de l'élévation et du temps pour C1.....	142
Figure 5.12 Évolution du degré de saturation en fonction de l'élévation et le temps pour C1....	142
Figure 5.13 Évolution des pressions en fonction de l'élévation et du temps pour C2.....	143
Figure 5.14 Évolution du degré de saturation en fonction de l'élévation et du temps pour C2...144	144
Figure 5.15 Évolution des pressions en fonction de l'élévation et du temps pour C3.....	145
Figure 5.16 Évolution du degré de saturation en fonction de l'élévation et du temps pour C3...145	145

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

<i>a</i>	Section du tube [L ²]
<i>a</i>	Pente sur l'échelle log-log de Peters (2013) [-]
<i>a_f</i>	Valeur approximative de <i>y</i> , du modèle de Fredlund et Xing (1994) [ML ⁻¹ T ⁻²]
<i>a_c</i>	Coefficient d'adhésion [-]
<i>A</i>	Aire de l'échantillon [L ²]
AEV	Air Entry Value (Pression d'entrée d'air) [ML ⁻¹ T ⁻²] ou [L]
ASTM	American Society for Testing and Materials
<i>b</i>	Paramètre de lissage de Iden & Durner (2014) [-]
BPSR	Biofiltres passif sulfato-réducteurs
<i>C</i>	Constante du modèle de Chapuis & Aubertin (2003)
<i>c(ψ)</i>	Fonction de correction du modèle de Fredlund et Xing (1994) [-]
<i>C_C</i>	Coefficient de courbure [L ² L ⁻¹ L ⁻¹]
<i>C_G</i>	Constante du modèle pour les particules grossières de Mbonimpa et al. (2002)
<i>C_k</i>	Indice de normalisation de la conductivité hydraulique saturée [-].
<i>C_P</i>	Constante du modèle pour les particules fines de Mbonimpa et al. (2002)
CEBC	Couvertures avec effets de barrière capillaire
CRE	Courbe de rétention d'eau
CRH	Couche de rétention d'humidité
<i>C_U</i>	Coefficient d'uniformité [LL ⁻¹]
<i>C_w</i>	Pourcentage solide [%]
<i>d</i>	Diamètre des particules et du tamis [L]
<i>D</i> ₁₀	Diamètre de particules correspondant à 10% de passant massique sur la courbe granulométrique [L]

D_{50}	Diamètre de particules correspondant à 50% de passant massique sur la courbe granulométrique [L]
D_{60}	Diamètre de particules correspondant à 60% de passant massique sur la courbe granulométrique [L]
DMA	Drainage minier acide
DRX	Diffraction des rayons X
e	Indice des vides [L^3L^{-3}]
f	Teneur fibre de la tourbe [%]
g	Accélération gravitationnelle [LT^{-2}]
G_s	Densité relative des grains solides [-]
$G_{s, \text{mélange}}$	Densité relative des grains solides [-]
$G_{s, \text{sable}}$	Densité relative des grains solides du sable [-]
$G_{s, \text{silt}}$	Densité relative des grains solides du silt [-]
h	Charge hydraulique [L]
h_{co}	Remontée capillaire équivalente [L]
H	Hauteur [L]
i	Gradient hydraulique [-]
I_C	Indice de consistance [-]
I_L	Indice de liquidité [-]
I_p	Indice de plasticité [-]
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
IDC	Courbe initiale en drainage
IRME	Institut de Recherche en Mines et en Environnement
$k(\psi)$ ou $k(\theta)$	Conductivité hydraulique non saturée [LT^{-1}]
KM	modèle de Kovács Modifié

k_{rel}	Conductivité hydraulique relative [LT^{-1}]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturé [LT^{-1}]
L	Longueur de l'échantillon [L]
m_0	Masse du creuset à vide [M]
m_1	Masse du creuset et de la tourbe humide [M]
m_2	Masse du creuset et de la tourbe calcinée [M]
m_f	Paramètre de lissage de courbe relié à la teneur en eau résiduelle et la fonction de correction $c(\psi)$, du modèle de Fredlund & Xing. (1994) [-]
m_{vG}	Paramètre du modèle, lié à la distribution granulométrique de van Genuchten (1980) [-]
MDC	Courbe principale en drainage
MWC	Courbe principale en mouillage
n_f	Paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau, de Fredlund & Xing. (1994) [-]
n_{vG}	Paramètre du modèle, liés à la distribution granulométrique de van Genuchten (1980) [-]
NPS	Nappe phréatique surélevée
P_{NoD}	Pourcentage massique des grains de diamètre inférieur au tamis D [%]
P_{Nod}	Pourcentage massique des grains de diamètre inférieur au tamis d [%]
PDSC	Courbe intermédiaire en drainage
PWSC	Courbe intermédiaire en mouillage
Q	Volume d'eau s'écoulant par unité de temps (débit) [L^3T^{-1}]
S_a^*	Valeur tronquée de la composante d'adhérence [-]
S_a	Degré de saturation dû à l'adhésion [-]
S_c	Degré de saturation dû à la capillarité [-]

S_r	Degré de saturation [-]
S_{re}	Degré de saturation effectif ou réduit [-]
S_s	Surface spécifique des grains solides [L^2M]
t	Temps [T]
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale
V_w	Volume de l'eau [L^3]
w	Teneur en eau gravimétrique [%]
w_L	Limite de liquidité [%]
w_P	Limite de plasticité [%]
w_S	Limite de retrait [%]
x	Paramètre introduit dans la fonction de taux de vide pour prendre en compte l'effet de la tortuosité de Mbonimpa et al. (2002) [-]
$x_{Matériau}$	Teneur de sable ou silt [%]
x_{Tourbe}	Teneur de tourbe dans les mélanges [%]
z	Hauteur de charge à partir d'un niveau de référence [L]
Δh	Différence de charge hydraulique variation de charge (différence entre la charge ou la hauteur d'eau à la limite d'entrée (h_1) et à la limite de sortie (h_2) par rapport à un certain niveau de référence ($h_1 - h_2$) [L]
χ	Paramètre du matériau, utilisé dans la relation $S_s - w_L : (S_s = \lambda w_L^\chi)$ de Mbonimpa et al. (2002) [-]
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau [$M L^{-1}T^{-1}$]
ρ_s	Masse volumique de l'eau [$M L^{-3}$]
ρ_w	Masse volumique de l'eau [$M L^{-3}$]
γ_w	Poids volumique [$ML^{-2}T^{-2}$]

λ_{BC}	Paramètre de lissage de courbe relié à l'agencement des pores de Brooks & Corey (1964) [-]
α	Facteur de forme de Chapuis & Aubertin (2003) [-]
α_{vG}	Paramètre du sol lié à la hauteur capillaire ($\alpha_{vG} \cong 1/AEV$) de van Genuchten (1980) [L^{-1}]
ω	Proportion relative des fines pellicules d'eau adsorbée de Peters (2013) [-]
τ	Paramètre de tortuosité et de connectivité de Mualem (1976) [-]
$\Gamma(\psi)$	Fonction de saturation capillaire [-]
θ	Teneur en eau volumique [L^3L^{-3}]
θ_e	Teneur en eau réduite ou effective (normalisée) [L^3L^{-3}]
θ_i	Point d'inflexion sur le tracé semi-logarithmique des ordonnées, de Fredlund & Xing. (1994) [-]
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle [L^3L^{-3}]
θ_s	Teneur en eau volumique saturée [L^3L^{-3}]
ψ	Succion matricielle [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_0	Succion à l'état sec ($\psi_0 = 10^7 \text{ cm}$ en général ou $\psi_0 = 10^6 \text{ kPa}$)
ψ_{90}	Succion correspondant à un degré de saturation de 90 % [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_{95}	Succion correspondant à un degré de saturation de 95 % [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_i	Point d'inflexion sur le tracé semi-logarithmique des abscisses, de Fredlund & Xing. (1994) [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_p	Interception de la tangente sur le tracé semi-logarithmique et l'axe de succion matricielle, de Fredlund & Xing. (1994) [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_r	Succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_{vG}	AEV obtenue par la méthode de calcul de van Genuchten (1980) [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]
ψ_t	AEV déterminée par la méthode des tangentes [$ML^{-1}T^{-2}$] ou [L]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Composition minÉralogique du sable et du silt	167
Annexe B CorrÉlation des paramÈtres pour la rÉgression.....	169
Annexe C Valeurs des teneurs en eau mesurÉes et prÉdites	171
Annexe D Coefficients et erreur des rÉgressions.....	176
Annexe E ÉValuation de la convergence.....	177

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'extraction et le traitement des gisements miniers, en plus de leurs retombées financières positives, génèrent d'importantes quantités de rejets solides : stériles miniers et rejets de concentrateur (ou résidus miniers). Ces derniers peuvent être densifiés à différentes consistances : i) résidus épaissis (50 à 70 % de solides), ii) résidus en pâte dans le cas des mines souterraines où ils sont souvent renvoyés sous terre sous forme de remblai minier (> 70 % de solides) et iii) résidus filtrés (≥ 80 % de solides). Toutefois, une importante quantité de ces résidus est généralement entreposée en surface dans des parcs à résidus sous forme de pulpe à un pourcentage solide $C_w < 50$ %.

Les parcs à résidus sont des zones d'entreposage de résidus miniers qui sont généralement ceinturées par des structures de confinement. Certains de ces résidus miniers peuvent contenir des minéraux sulfureux tels que la pyrite, la pyrrhotite, etc. Ces résidus peuvent dans certaines conditions générer du drainage minier acide (DMA) lorsqu'ils sont en contact avec de l'eau et de l'oxygène de l'air. Ce DMA est très nocif pour l'environnement (flore, faune et humain) et constitue l'une des problématiques les plus importantes associées à la gestion des résidus miniers et auxquelles fait face l'industrie minière.

Dans le but de protéger l'environnement, des législations en matière de gestion responsable des rejets miniers ont été mises en vigueur afin de limiter l'impact du DMA sur l'environnement (Aubertin *et al.*, 2002). À ce sujet, au Québec, les minières doivent gérer ses rejets miniers solides et liquides en respectant la Directive 019 (MDDEP, 2012).

1.1 Problématique

Dans l'exploitation minière, la bonne gestion du DMA est capitale pour la survie des écosystèmes. Ce DMA peut être inhibé par des minéraux neutralisants intrinsèques, principalement les minéraux carbonatés (calcite et dolomite) présents dans les résidus miniers. La disponibilité de ces minéraux neutralisants peut être limitée, ne permettant pas une neutralisation complète de l'acide produit. De ce fait, des mesures permettant de traiter le DMA doivent être mises en place. Nous distinguons deux principales mesures de traitements (Genty, 2012) :

- Mesures actives, qui font appel à l'utilisation de composés alcalins, le plus souvent la chaux;

- Mesures passives, qui peuvent être réalisées par l'installation ou la mise en place de drains calcaires ou dolomitiques et/ou des biofiltres passifs sulfato-réducteurs (BPSR) (Neculita *et al.*, 2007).

Toutefois, on peut agir en amont afin de limiter voire empêcher les réactions d'oxydation et par conséquent la production du DMA. Parmi les mesures de prévention, on peut distinguer :

- L'exclusion des sulfures, par désulfuration des résidus miniers (Bussiere *et al.*, 1995; Benzaazoua *et al.*, 2000);
- L'exclusion de l'eau et/ou de l'oxygène, par la mise en place de recouvrements tel que les barrières imperméables (étanches) ou les barrière à l'oxygène (Bussière & Guittonny, 2021).

Les matériaux naturels tels que le sable, le silt, le gravier ou les matériaux recyclés tel que les résidus miniers non générateurs de DMA peuvent être utilisés dans la construction de ces recouvrements.

Dans le cas particulier de la technique de couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC), il y a cinq à six composantes de base (Aubertin *et al.* (1995) in Parent (2003)). Pour celle de la nappe phréatique surélevée couplée à un recouvrement monocouche (NPS), les résidus sont couverts uniquement d'une couche de matériaux de granulométrie grossière ou fine (selon le rôle que va jouer ce recouvrement). Pour les CEBC, la couche superficielle et la couche de rétention d'eau peuvent être affectées par la mise en place de la végétation. Cette végétation peut engendrer la production de la matière organique et de ce fait leurs propriétés hydrogéologiques pourraient être modifiées.

La performance des CEBC ainsi que celle des recouvrements monocouches combinés avec une NPS sont évaluées en utilisant différents paramètres tels que le degré de saturation en eau (S_r), les succions et le flux d'oxygène. Les travaux de (Proteau, 2021) et ceux de (Ben Khouya, 2020), ont respectivement démontré que la colonisation racinaire et la prolifération végétale exercent une influence non négligeable sur ces propriétés.

L'influence de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques des matériaux qui composent les recouvrements utilisés comme techniques de restauration des sites miniers a été peu ou pas étudiée. La végétation, installée sur les couches supérieures de ces recouvrements, est susceptible par photosynthèse et bien d'autres processus de produire la matière organique qui peut

être suffisante pour modifier les propriétés hydrogéologiques de ces matériaux. Pour le design de ces techniques de restauration des parcs à résidus, il serait donc pertinent et impératif de pouvoir prédire le comportement hydrogéologique de ces matériaux en fonction de la présence de la matière organique.

1.2 Hypothèses de recherche

Les hypothèses formulées dans le cadre de ce projet sont les suivantes :

- La matière organique renforce la capacité de rétention des sols et augmente ainsi leur teneur en eau;
- La perméabilité du sol augmente avec la présence de la matière organique;
- La matière organique fait croître les pores du sol en formant des agrégats.

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif général de ce projet de recherche consiste à évaluer l'influence de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques des matériaux naturels et recyclés (sable et silt) amendés avec de la matière organique. Ces matériaux ont été sélectionnés en raison de leur importance dans la mise en place des techniques de restauration de type CEBC. Ces recouvrements sont susceptibles d'être envahies par la végétation au niveau de leurs couches supérieures. De façon plus précise, l'atteinte de cet objectif passe par la réalisation des objectifs spécifiques formulés comme suit :

- Mesurer les courbes de rétention d'eau des matériaux de base ainsi que les matériaux amendés avec de la matière;
- Mesurer la conductivité hydraulique saturée des matériaux de base ainsi que des matériaux amendés avec de la matière organique à l'aide des techniques appropriées et selon la nature des matériaux;
- Évaluer statistiquement l'impact de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques des matériaux naturels;
- Adapter les modèles prédictifs pour la CRE en intégrant la teneur en matière organique à ces modèles prédictifs;

- Simuler le comportement hydrogéologique une CEBC constituée de sable et de silt amendés avec la tourbe, afin d'évaluer l'effet de la tourbe sur la couche de rétention d'humidité (CRH).

1.4 Structure du mémoire

Ce document, en plus de l'introduction générale (chapitre 1) qui est consacrée au contexte, à la problématique, aux objectifs et aux hypothèses de recherche, est constitué de quatre autres chapitres :

- Le chapitre 2 est consacré à la revue de la littérature portant sur les processus de gestion des rejets miniers, la formation, la prévention et le contrôle de la formation du drainage minier acide (DMA) ; On y retrouve également un aperçu sur les notions fondamentales relatives à l'écoulement de l'eau en milieu poreux, la matière organique et ses caractéristiques et les tourbières. L'emphase est mise sur l'influence de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques des sols et les propriétés hydrogéologiques des tourbières;
- Le chapitre 3 présente les matériels et les méthodologies utilisés dans le cadre de ce travail. Il est question dans ce chapitre de caractériser les matériaux utilisés et de décrire le programme expérimental ainsi que la démarche suivie;
- Le chapitre 4 met en avant la contribution scientifique majeure résultant de la rédaction d'un article destiné soumis à une revue scientifique. Cet article aborde les résultats de la caractérisation granulométrique et géotechnique, ainsi que la prédiction de la capacité de rétention en eau (CRE) du sable amendé avec de la tourbe.
- Le chapitre 5 est consacré à la présentation des résultats obtenus et qui n'ont pas été intégrés à l'article. Ces résultats portent d'abord sur les courbes de rétention d'eau et la conductivité hydraulique saturée des matériaux silteux avec et sans matière organique. Puis, sur les résultats de la prédiction de la courbe de rétention d'eau des matériaux amendés et sur ceux de la modélisation numérique. Enfin ce chapitre présente une discussion des résultats obtenus;
- Le chapitre 6 présente les principales conclusions et quelques perspectives pour d'éventuelles études futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les rejets provenant de l'exploitation minière sont communément entreposés en surface dans des parcs à résidus. Ces rejets miniers peuvent contenir des minéraux sulfureux et sous certaines conditions peuvent produire du drainage minier acide (DMA). Dans l'optique de limiter la génération du DMA, différents types de recouvrements peuvent être installés sur les sites d'entreposage des résidus miniers. Cependant, en raison de la mise en place de la végétation (de façon naturelle ou artificielle), ces matériaux de recouvrements vont progressivement s'enrichir en matière organique. Cette matière organique peut éventuellement modifier les propriétés hydrogéologiques des matériaux de recouvrement (courbe de rétention d'eau CRE et conductivité hydraulique saturée k_{sat}). De ce fait, les critères d'évaluation de la performance de ces recouvrements (tel que la pression d'entrée de l'air AEV, la conductivité hydraulique saturée) seront modifiés; de même que les modélisations numériques de leur comportement hydrogéologique pourront également être affectées. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en considération ce paramètre (matière organique) et d'anticiper son impact pour une évaluation adéquate de la performance des recouvrements.

C'est donc suivant ce qui précède que, cette revue de la littérature fait une brève présentation des différentes techniques d'entreposage des rejets miniers (spécifiquement les rejets solides), ainsi qu'une présentation du processus de formation, de contrôle et de prévention du DMA. Ensuite, elle s'attarde à l'écoulement de l'eau en milieux poreux, axé sur les CRE et les k_{sat} des matériaux. Enfin, une récapitulation des travaux mettant en évidence l'effet de la matière organique sur les propriétés hydrogéologiques (CRE et k_{sat}) des matériaux non organiques (argile, silt, sable, etc.) est présentée.

2.1 Généralité sur la gestion des résidus miniers en surface

L'exploitation minière consiste à extraire et à valoriser des masses de minerais issus de gisements, c'est-à-dire des concentrations minérales justifiant une exploitation dans des conditions économiques du moment (Jébrak & Marcoux, 2008). Cette activité d'exploitation produit de grandes quantités de rejets liquides et solides. Les rejets solides sont constitués principalement par le mort-terrain, les roches stériles, les rejets du concentrateur et les boues de traitement. Ces rejets peuvent être entreposés en surface dans les parcs à résidus (Figure 2.1), des haldes à stériles (Figure 2.2), ou peuvent subir des transformations afin d'être renvoyés sous terre pour remblayer les

ouvertures minières souterraines (on parle dans ce cas de remblais miniers), ou encore peuvent être utilisés dans d'autres applications géotechniques.

Certains rejets miniers peuvent contenir des sulfures métalliques (pyrite, pyrrhotite, etc.) qui en présence de l'eau de ruissellement ou des précipitations et de l'oxygène de l'air sont susceptibles par oxydation de générer de l'acidité et donc du drainage minier acide (DMA). Afin de minimiser les impacts environnementaux à long terme, ces rejets doivent être gérés de façon sécuritaire afin de respecter les normes environnementales.

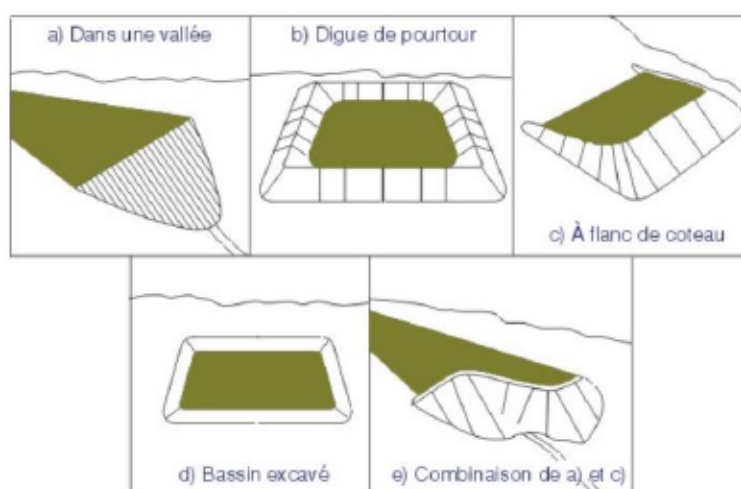


Figure 2.1 Configurations usuelles des digues de parcs à résidus miniers (tirée de Aubertin *et al.*, 2002).

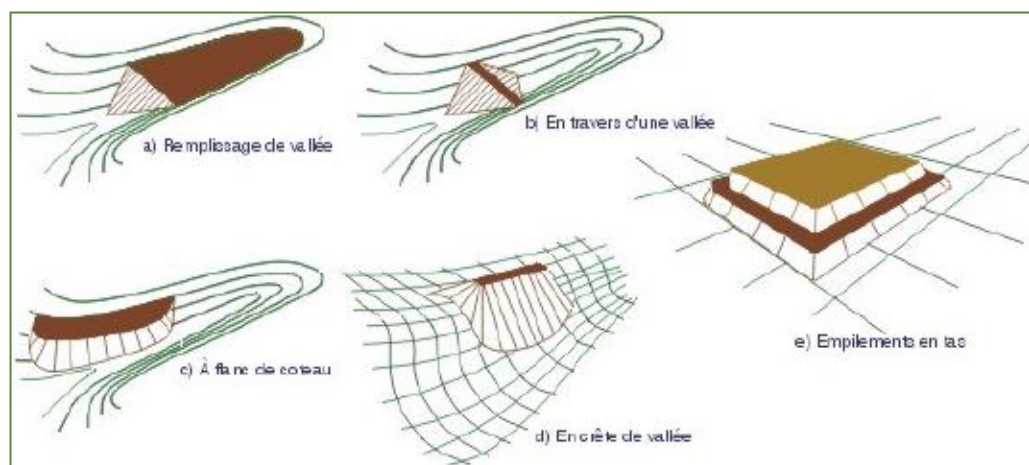


Figure 2.2 Types d'empilement de roches stériles (tirée de Aubertin *et al.*, 2002).

2.1.1 Types de rejets miniers solides

Les principaux rejets miniers solides générés par l'activité d'exploitation sont les suivants (Aubertin *et al.*, 2002) :

- Le mort-terrain, résulte du décapage de la surface du sol ;
- Les roches stériles issues des opérations d'extraction permettent d'accéder au gisement. Il s'agit de fragments de roche, de géométries et de dimensions très variables de l'ordre du micromètre à celui du mètre (Aubertin *et al.*, 2005) ;
- Les rejets du concentrateur (résidus miniers) produits au cours du processus de traitement du minerai. Ils sont sous forme de pulpe (de 30 à 45% solide selon leur teneur en eau) constituée de grains de tailles fines (pouvant atteindre quelques centaines de microns) (Martin *et al.*, 2005) ;

Les boues provenant du traitement chimique des eaux issues du traitement du minerai. Elles sont généralement déversées dans les parcs à résidus.

2.1.2 Méthode de dépôt des résidus miniers

Le dépôt hydraulique des résidus sous forme de pulpe, constitue la méthode conventionnelle de stockage des résidus miniers. Cette méthode est économiquement plus avantageuse qu'elle n'apporte de stabilité aux aires d'entreposage. Cependant, de nouvelles approches ont été proposées afin d'améliorer la stabilité physique et l'intégrité des aires d'entreposage et qui conduit à la production de résidus miniers densifiés sous différentes formes parmi lesquels on trouve :

- Les résidus épaisés, densifiés à l'aide d'épaississeurs jusqu'à l'obtention d'une pulpe ayant un pourcentage solide compris entre 50 et 70 % ;
- Les résidus en pâte, densifiés à l'aide d'épaississeurs et de filtres à disque dont le pourcentage solide est $> 70\%$;
- Les résidus secs ou asséchés (ou filtrés), densifiés à l'aide de filtre haute pression et le pourcentage solide est $\geq 80\%$;
- les remblais en pâte cimentés pour le remblayage des excavations (mines souterraines).

Au cours de ces dernières années, l'empilement de résidus filtrés dans des aires d'entreposage sans digues de retenue est de plus en plus utilisé (Aubertin *et al.*, 2002; Bussière, 2007).

Le dépôt hydraulique des résidus se fait de trois façons, par lances à robinet, par dépôt ponctuel ou par hydrocyclones (Figure 2.3 et Figure 2.4).

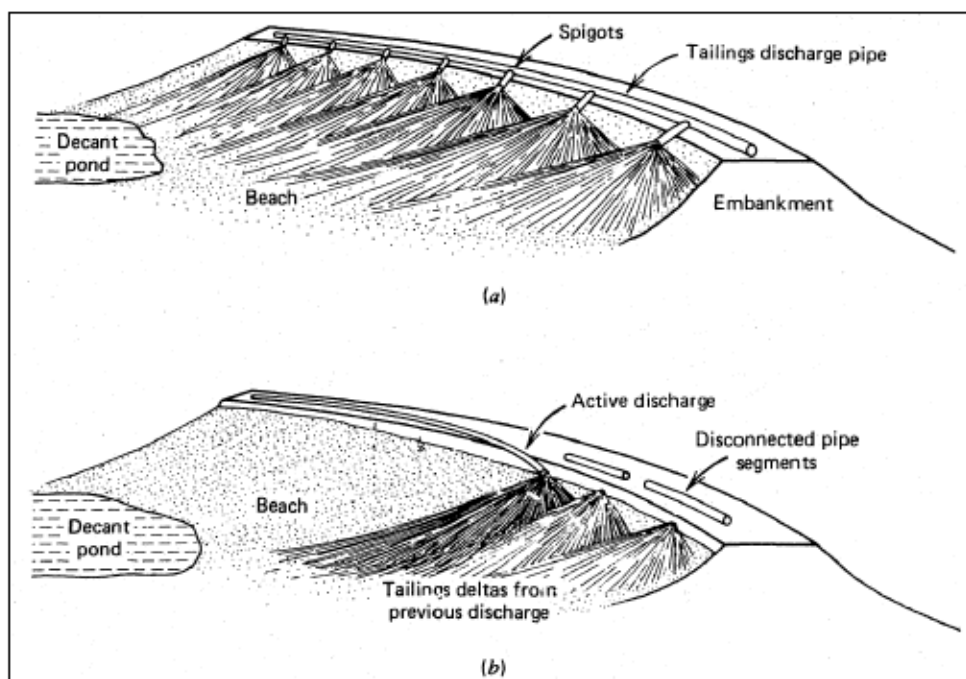


Figure 2.3 Méthodes de décharge par : (a) lances à robinet. (b) dépôt ponctuel (tirée de Vick, 1990).

Le dépôt ponctuel exige que l'extrémité ouverte du tuyau par laquelle les résidus se déversent soit déplacée par déconnexion et relocalisation de façon périodique. Ce type de décharge se fait en un seul endroit à la fois au-dessus de la digue (ou sa crête).

Le dépôt par lances à robinet (ou par emboîtement) est constitué de lances généralement espacées de 15 à 46 m emboîtées le long du pipeline. Ceci sans qu'il soit nécessaire de déplacer fréquemment ou de déconnecter les segments du pipeline. Chaque segment est généralement équipé de vannes individuelles à son extrémité pour contrôler et distribuer les résidus (Vick, 1990).

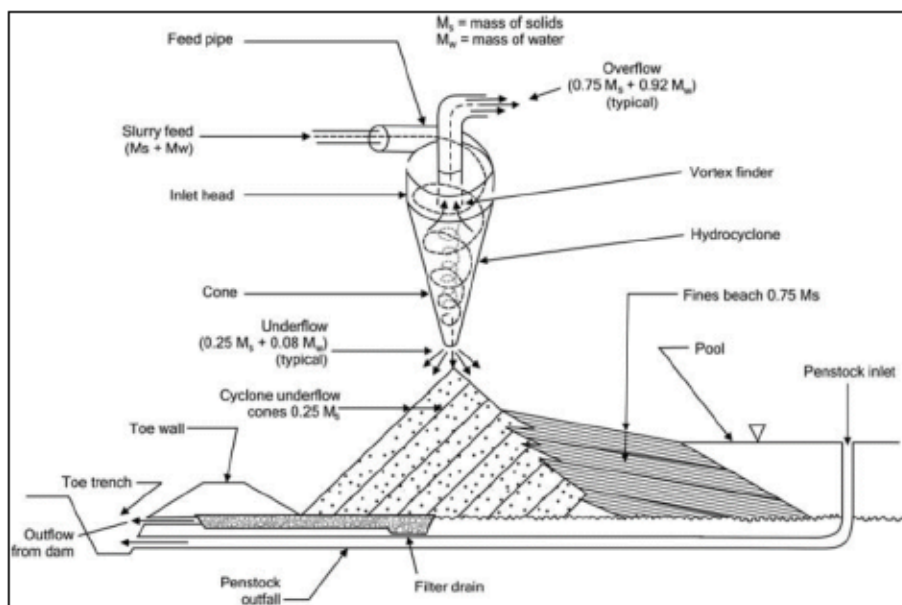


Figure 2.4 Méthode de décharge par hydrocyclone (tirée de Blight, 2010).

Le dépôt par hydrocyclone permet de diviser la pulpe en deux fractions de particules, une fraction grossière (la sousverse ou *underflow* en anglais) la plus importante et une autre fine (la surverse ou *overflow* en anglais). Les particules grossières peuvent être utilisées pour la construction de la digue tandis que les particules fines sont déversées dans le parc (Blight, 2010).

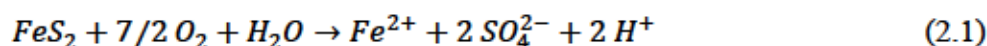
Le dépôt hydraulique et les caractéristiques physiques de ces résidus miniers prédisposent ces derniers à une susceptible liquéfaction, pouvant engendrer des conséquences graves sur l'environnement et sur la stabilité de ces ouvrages.

2.2 Généralité sur le drainage minier acide (DMA)

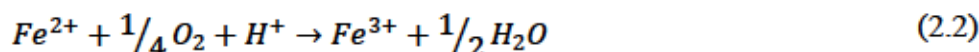
L'extraction et le traitement des gisements miniers (constitué pour la plupart de minéraux métalliques) libèrent le plus souvent d'énormes quantités de résidus miniers composés de minéraux sulfureux. L'exposition de ces minéraux à l'oxygène de l'air et à l'eau de ruissellement ou de surface peut entraîner l'oxydation du soufre, puis à la formation d'acides sulfuriques et ainsi générer le drainage minier acide (DMA). Le DMA est caractérisé par un pH très faible (Nordstrom, 2000), une concentration élevée en sulfates (Ritchie, 1994), la présence des métaux lourds en solution (Jambor, 1994) et une conductivité électrique élevée (Monterroso & Macías, 1998). Le DMA est donc une solution acide s'écoulant et contaminant les eaux souterraines et celles de surfaces.

2.2.1 Formation du DMA

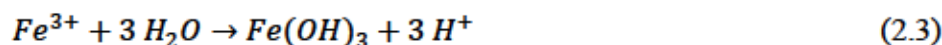
Le DMA se forme lorsque les minéraux sulfureux contenus dans les rejets miniers s'oxydent. Les principaux minéraux sulfureux communément impliqués dans l'oxydation sont la pyrite (FeS_2), la pyrrhotite (Fe_{1-x}S , $0 < x < 0,20$) et l'arsénopyrite (FeAsS). Généralement, on distingue deux types de réactions d'oxydation dites chimiques, une réaction directe qui a lieu en présence de l'oxygène et une réaction indirecte avec le Fe (III). Cependant, il est possible que les microorganismes soient impliqués dans la réaction. On parle dans ce cas d'oxydation biochimique (Keith & Vaughan, 2000). C'est le cas par exemple de la pyrite (Figure 2.5) qui est plus largement décrite (Singer & Stumm, 1970; Lawson, 1982; Holmes & Crundwell, 2000; Blowes *et al.*, 2014) et utilisée pour caractériser les principales réactions susceptibles de se produire. Les mécanismes de la réaction d'oxydation directe (par l'oxygène) de la pyrite sont donnés par (Nicholson, 1994; Aubertin *et al.*, 2002) :



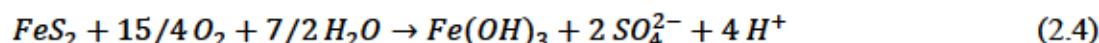
Dans l'équation (2.1), on constate que, l'oxydation directe d'une mole de pyrite conduit à la formation de deux moles de H^+ . Par la suite le Fe^{2+} s'oxyde à son tour pour donner le Fe^{3+} (Équation (2.2)).



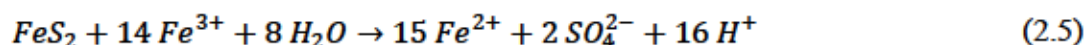
Cette réaction déclenche et contrôle le DMA. Toutefois, si cette réaction est très rapide pour des $\text{pH} > 4$, elle devient extrêmement lente et indépendante du pH dans des milieux plus acides. Par conséquent, la présence de certaines bactéries, telles les thiobacillus ferrooxidans (Kleinmann *et al.*, 1981; Nordstrom, 2000) favorise ainsi l'augmentation de la vitesse de la réaction (catalyseur) ce qui conduit à la formation d'énorme quantité de Fe^{3+} . Si le pH baisse, mais qu'il demeure suffisamment élevé ($\text{pH} > 3 - 3,5$), alors le Fe (III) peut précipiter sous forme d'hydroxyde (Équation (2.3)).



La somme des équations (2.1) à (2.3), permet d'obtenir la réaction globale d'oxydation de la pyrite par l'oxygène dissout (Équation (2.4)), où 4 moles de H^+ sont générées pour chaque mole de pyrite oxydée.



Lorsque le milieu est assez acide ($pH < 3$) et en absence de l'oxygène, la pyrite peut également être oxydée par le Fe^{3+} (réaction d'oxydation indirecte de la pyrite) et on obtient 16 moles de H^+ par mole de pyrite, l'équation s'écrit (Nordstrom & Southam, 1997) :



Le fer Fe^{2+} présent en solution peut encore s'oxyder en Fe^{3+} et ainsi de suite, ce qui enclenche un processus cyclique.

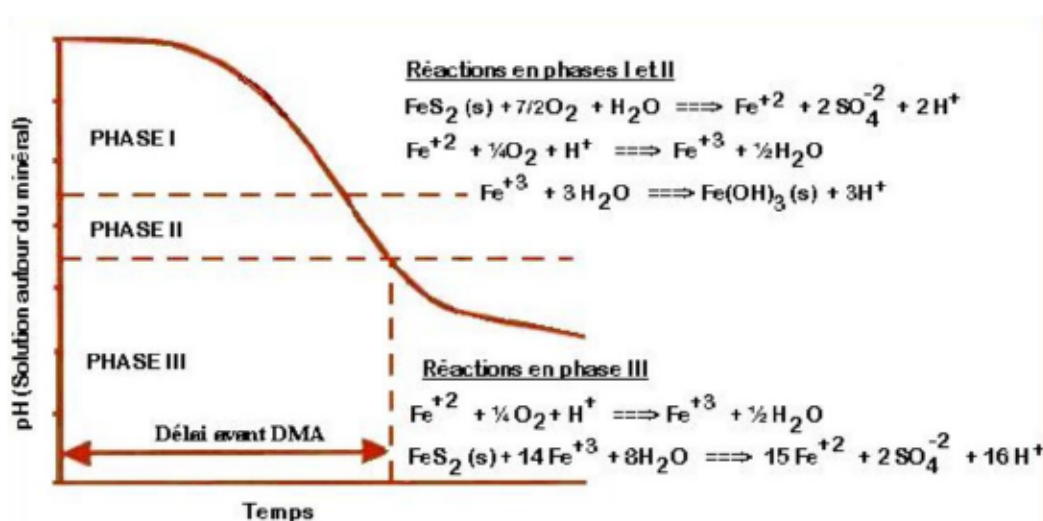
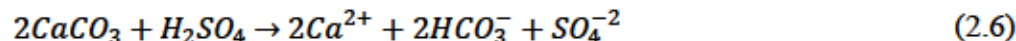
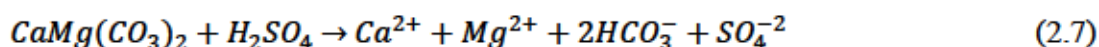


Figure 2.5 Les phases et les équations successives de la formation du DMA par l'oxydation de la pyrite en fonction du temps et du pH de l'eau (tirée de Aubertin *et al.*, 2002).

2.2.2 Neutralisation du DMA

Tout comme le pouvoir de génération du DMA dépend de la nature et du type des minéraux sulfureux, les résidus miniers peuvent également contenir des minéraux possédant un potentiel neutralisant intrinsèque (minéraux acidivores), dont la capacité de neutralisation de l'acide sulfurique détermine le pouvoir neutralisant de ces résidus. Il existe plusieurs minéraux acidivores, et parmi eux, certains possèdent un plus grand potentiel de neutralisation, tels que les minéraux carbonatés, plus particulièrement la calcite et la dolomite dont les équations de neutralisation sont les suivantes (Aubertin *et al.*, 2002) :





Ces réactions indiquent qu'il faut deux moles de calcite et une mole de dolomite pour neutraliser une mole d'acide sulfurique et produire des sels dissous. Lorsque le pouvoir de génération d'acidité est supérieur au pouvoir neutralisant des résidus miniers, le DMA se produit et des mesures doivent donc être entreprises pour éliminer ou réduire l'impact du DMA sur l'environnement.

2.2.3 Gestion du DMA

Le contrôle de la production du DMA dépend du fait qu'on voudrait le traiter lorsqu'il est produit ou le prédire une fois à la source (avant qu'il ne soit produit), en restreignant les réactions d'oxydation des minéraux sulfureux afin de permettre la stabilité chimique des résidus miniers pendant longtemps, voire à vie.

2.2.3.1 Traitement du DMA

On procède au traitement chimique des eaux ou effluents miniers lorsque le processus de génération du DMA est déjà amorcé. Pour cela, la réglementation au Québec par le biais de la Directive 019 sur l'industrie minière impose les limites suivantes aux effluents finaux annuels : 0,2 mg/L pour As; 0,3 mg/L pour Cu; 3 mg/L pour Fe; 0,5 mg/L pour Ni et Zn; 0,2 mg/L pour Pb et un pH compris entre 6 et 9 (les valeurs données ici sont des moyennes annuelles (MDDEP, 2012)). Les deux principaux types de traitement des eaux minières contaminées par le DMA sont illustrés par la Figure 2.6 (Genty, 2012) :

- Le traitement actif dont le principe consiste à recueillir toutes les eaux en provenance du parc à résidus à l'aide d'un système de canalisation pour les conduire dans l'usine où elles seront traitées chimiquement par l'ajout en continu d'un composé alcalin (souvent la chaux) afin de neutraliser l'acidité ou de faire précipiter les métaux. Ce qui augmentera le pH de l'eau et accélérera le taux d'oxydation chimique du fer (Johnson & Hallberg, 2005). Il est mis en place lorsque la mine est encore en activité.
- Le traitement passif consiste à l'utilisation de procédés chimiques, physiques et biologiques se produisant dans la nature afin de neutraliser l'acidité ou de faire précipiter les métaux. Ceci en se servant soit des drains calcaires ou dolomitiques (oxique et anoxique) et des

biofiltres passifs sulfato-réducteurs (BPSR) (Neculita *et al.*, 2007). Ce système de traitement est mis en place après la fermeture de la mine.

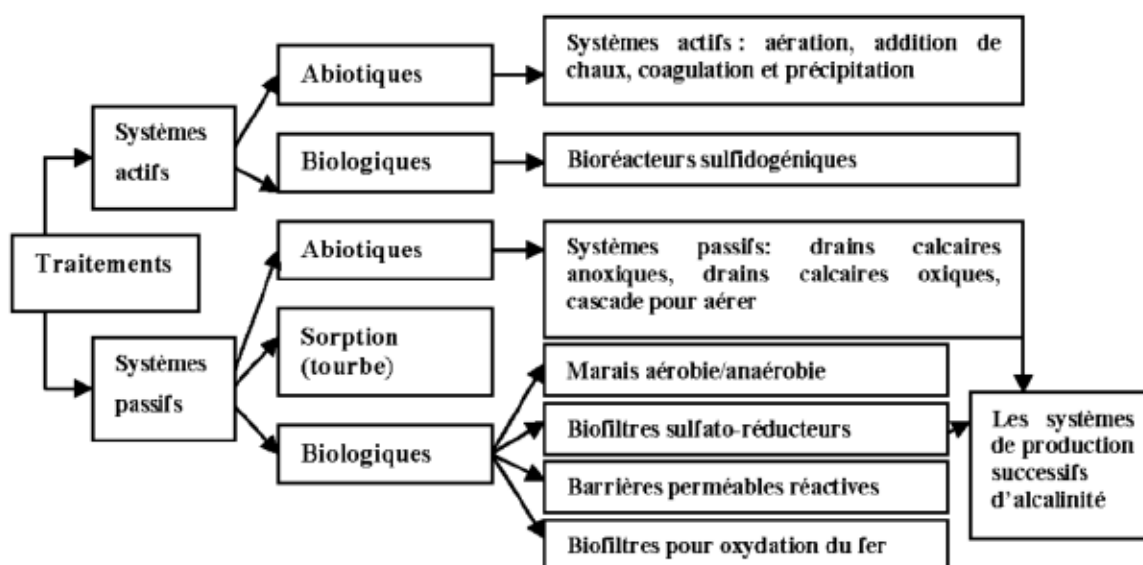


Figure 2.6 Stratégies biologiques et abiotiques de traitement du DMA (tirée de Genty, 2012).

2.2.3.2 Prévention du DMA

Les techniques utilisées pour prévenir la formation du DMA ont pour objectif de limiter l'accès de l'oxygène jusqu'aux résidus miniers. Pour ce faire, il faut éviter la formation du DMA en éliminant, ou en réduisant à des niveaux très faibles la disponibilité de l'un ou de plusieurs des trois composants nécessaires à la formation de ce dernier à savoir, les sulfures, l'eau ou l'oxygène (Lottermoser, 2010).

- Exclusion des sulfures : il s'agit d'exclure les sulfures des résidus miniers par désulfuration pour minimiser la génération du DMA. La désulfuration peut se faire par flottation ou par séparation gravimétrique (Bussiere *et al.*, 1995; Benzaazoua *et al.*, 2000). Benzaazoua *et al.* (1999) considèrent que les matériaux sulfureux peuvent être utilisés dans la fabrication du remblai minier. Dans la même lancée, Johnson and Hallberg (2005) proposent une panoplie de méthodes de prévention du DMA par exclusion des sulfures (Figure 2.7);
- Exclusion de l'eau : elle consiste à empêcher l'eau de s'infiltrer jusqu'aux résidus miniers en limitant les apports d'eau dans le milieu. Pour cela, des barrières imperméables doivent être construites pour éviter l'infiltration des eaux de surfaces ou souterraines. Ces barr(Weber *et al.*, 2017b; Weber *et al.*, 2017a)ières peuvent être construites à partir de

matériaux naturels de faible conductivité hydraulique (sols, résidus) ou de matériaux synthétiques de faible perméabilité (géomembranes, géocomposites bentonitiques et composites polymériques) (Aubertin *et al.*, 1995; MEND, 2001; Koerner, 2012). D'autres barrières nécessitent de détourner l'eau vers des exutoires préalablement établis en utilisant des pentes (Aubertin *et al.*, 1996a; Bussière *et al.*, 2003; Parent & Cabral, 2006; Aubertin *et al.*, 2009).

- Exclusion de l'oxygène : elle vise à limiter l'apport en oxygène vers les résidus miniers réactifs en les maintenant le plus longtemps possible saturés en eau. Les techniques utilisées nécessitent généralement une bonne disponibilité en eau et sont reconnues pour leur efficacité en climat humide (Bussière *et al.*, 2004; Kalonji, 2014). Pour constituer une bonne barrière à l'oxygène, l'eau est utilisée en raison de la faible diffusion de l'oxygène dans celle-ci que dans l'air (Hillel, 1998; Mbonimpa *et al.*, 2003). Comme techniques de barrière à l'oxygène, il y a le recouvrement en eau, le recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée (NPS), le recouvrement multicouche (type couverture avec effet de barrière capillaire, CEBC) et le recouvrement consommateur d'oxygène. La CEBC et la NPS seront abordées dans les sections suivantes.

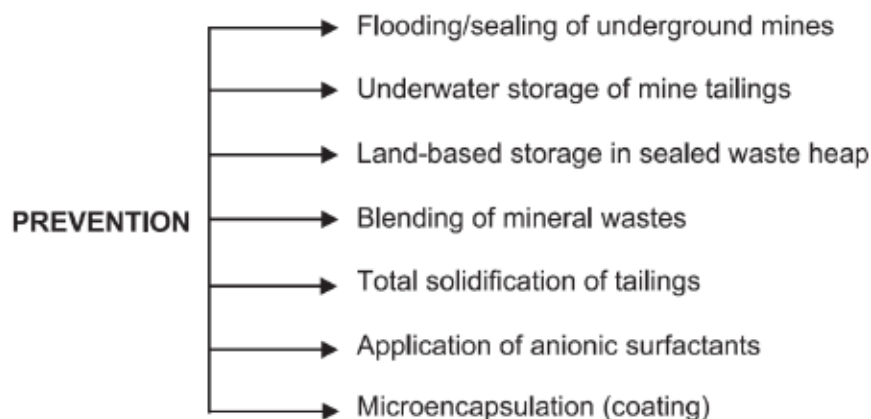


Figure 2.7 Diverses approches évaluées pour prévenir ou minimiser la production d'eaux de DMA (tirée de Johnson & Hallberg, 2005).

2.3 Recouvrement multicouche (Couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC))

La couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC), technique reconnue pour prévenir la production du DMA est constituée d'une superposition successive de couches composées de plusieurs types de sols ou de matériaux géosynthétiques. Ce type de couverture vise à limiter la diffusion de l'oxygène et minimiser l'infiltration de l'eau jusqu'aux résidus miniers réactifs de façon à ralentir, voir arrêter la production d'eaux acides et provoquer leur oxydation (Aubertin *et al.*, 1995; Aubertin *et al.*, 1996a). Les CEBC ont déjà montré leur utilité en climat humide (Dagenais, 2005) quant à la prévention et au contrôle de la génération du DMA dans les parcs à résidus miniers.

2.3.1 Principe de fonctionnement et configuration d'une CEBC

En principe, une CEBC contient trois à cinq couches, faites de matériaux différents dont chacune joue un ou plusieurs rôles bien spécifiques (Figure 2.8). Sa conception est basée sur la superposition de couches constituées de matériaux différents possédant une distribution granulométrique et des propriétés hydrogéologiques distinctes qui viennent limiter la migration de l'oxygène vers les résidus réactifs. En fait, elle consiste à couvrir une couche de sol à granulométrie grossière par un sol relativement fin afin de créer un effet de barrière capillaire en conditions non saturées (Gillham, 1984; Nicholson *et al.*, 1989; Morel-Seytoux, 1992). Cet effet de barrière capillaire permet de maintenir, la couche de granulométrie fine appelée couche de rétention d'humidité (CRH), à un degré de saturation en eau (S_r) élevé ($> 85\%$). Ceci permet de diminuer la diffusion de l'oxygène à travers la CEBC. La couche à granulométrie grossière a une conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) plus élevée que celle à texture plus fine. De ce fait, à saturation, le matériau grossier atteint plus rapidement sa valeur d'entrée d'air (AEV ou « air entry value ») et se désature plus vite. Sa conductivité hydraulique non saturée $k(\psi)$ devient alors plus faible que celle du matériau sus-jacent (fin) qui a une AEV plus élevée. La conductivité hydraulique du matériau grossier non saturé étant trop faible pour laisser passer l'eau présente dans le matériau fin, celle-ci se retrouve piégée dans le matériau d'où l'appellation CRH.

La conception d'une CEBC nécessite l'utilisation de divers matériaux tels que les matériaux naturels (sable, silt, gravier, roches concassées, etc.), les matériaux recyclés (Aubertin *et al.*, 2002).

La Figure 2.8 est l'illustration d'une CEBC à cinq couches placées sur des rejets miniers générateurs d'acide.

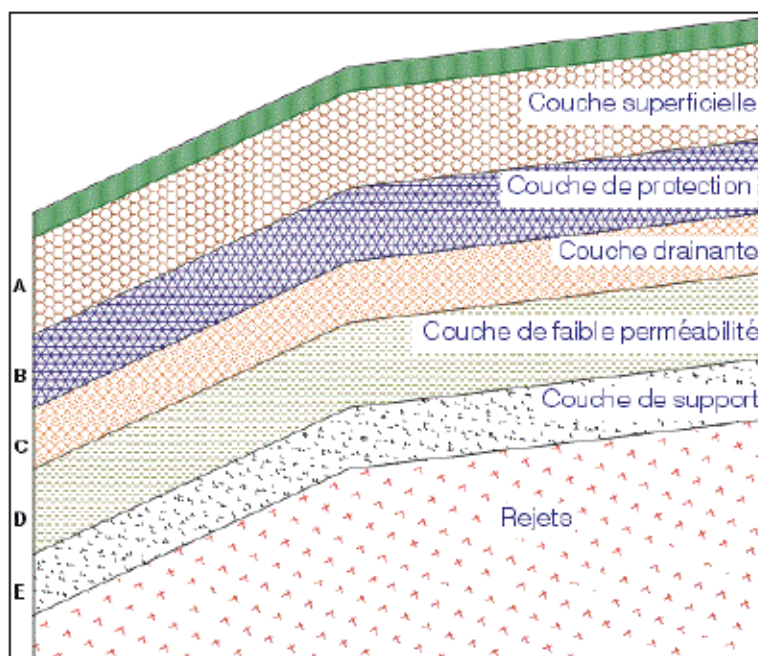


Figure 2.8 Configuration typique d'une CEBC avec cinq couches de différents matériaux (tirée de Aubertin *et al.*, 2002).

2.3.2 Rôle et caractéristiques des matériaux constitutifs d'une CEBC à cinq couches

Les différentes couches présentées sur la Figure 2.8, sont constituées de matériaux ayant des propriétés hydrogéologiques différentes et jouant des rôles différents au sein de la CEBC. Aubertin *et al.* (2002) et Demers and Pabst (2021) ont fait une description détaillée des couches illustrées plus haut :

- La couche superficielle A, vise à séparer les couches inférieures du milieu extérieur, à réduire les effets des fluctuations de température et d'humidité, à résister à l'érosion et peut servir aussi de support à la végétation. Cette couche a une épaisseur habituellement comprise entre 10 et 20 cm et dans certains cas 50 à 90 cm. Elle est le plus souvent composée de sols organiques et de végétation, tout comme elle peut contenir des géosynthétiques perforés, des lits de graviers et des enduits routiers;

- La couche de protection B, a une épaisseur pouvant dépasser 1 m et $10^{-4} < k_{sat} < 10^0$ et a de multiples fonctions. Elle peut servir à minimiser l'intrusion racinaire et animale à travers la barrière ainsi qu'à protéger les couches sous-jacentes contre les aléas climatiques (cycle gel-dégel, précipitation, etc.). Cette couche peut également emmagasiner provisoirement une portion des eaux d'infiltration jusqu'à leur élimination par évapotranspiration. Pour des raisons économiques ou de protection efficace, on peut être contraint d'utiliser un silt sableux trouvé tout près du site ou du sable et du gravier et même des roches concassées;
- La couche drainante C, contrôle l'écoulement de l'eau latéral, mieux encore réduit le gradient hydraulique de la couche sous-jacente. Elle réduit ainsi le débit d'infiltration dans la couche D et peut aider les couches A et B à avoir une forte capacité de rétention d'eau. Elle amenuise aussi la remontée capillaire sur elle et l'assèchement de la couche D par effet de barrière capillaire. Elle est faite de matériaux granulaires (sable ou sable et gravier) ou de géosynthétiques drainant et avec $10^{-3} < k_{sat} < 10^{-1}$. Son épaisseur est comprise entre 30 et 50 cm voir plus (100 cm);
- La couche à faible perméabilité D, vise à limiter l'infiltration d'oxygène dans les résidus et contrôle donc les échanges entre ce dernier et l'extérieur. La texture très fine (à faible perméabilité) des matériaux constituant cette couche empêche également l'infiltration d'eau. Étant donné que, les propriétés de barrière capillaire résultent du contraste de rétention d'eau entre cette couche et les couches C et E, elle est alors maintenue à un degré de saturation élevé. Les matériaux utilisés sont le silt et l'argile, de $k_{sat} < 10^{-5}$ cm/s et d'épaisseur variant de 50 à 100 cm ;
- La couche de support E, constituée d'un matériau grossier (sable et gravier) permet de fournir le contraste nécessaire pour créer un effet de barrière capillaire et empêcher la désaturation de la couche D (CRH). En plus de servir de couche de support aux couches sus-jacentes du recouvrement, elle empêche la remontée capillaire du lixiviat contaminé provenant des résidus. Comme la couche C elle a une $10^{-3} < k_{sat} < 10^{-1}$ et une épaisseur de l'ordre de 30 à 50 cm.

2.4 Couverture monocouche avec nappe phréatique surélevée (NPS)

Cette autre technique de recouvrement, efficace pour prévenir la production du DMA consiste à envoyer les résidus du concentrateur afin de limiter l'apport d'oxygène vers ces derniers. Cet

ennoiment conditionne les résidus à être saturés, ce qui permet de réduire la diffusion d'oxygène. En fait, le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau est environ 10 000 fois plus faible que celui dans l'air et sa solubilité dans l'eau est assez faible (Mbonimpa *et al.*, 2003).

2.4.1 Principe de fonctionnement et configuration de la NPS

La technique de la nappe phréatique surélevée selon Ethier *et al.* (2018), consiste à maintenir le niveau de la nappe phréatique sous la surface des résidus à une distance plus faible que la pression d'entrée d'air des résidus afin de les maintenir à un degré de saturation élevé et de limiter le flux d'oxygène dans les résidus réactifs. L'objectif principal de cette technique est de maintenir les résidus réactifs saturés en permanence, indépendamment des variations saisonnières et des changements climatiques (Pabst, 2021). Pour des raisons sécuritaires, la profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface doit être $< \frac{1}{2}$ de la pression d'entrée de l'air des résidus (Ouangrawa *et al.*, 2009) pour les résidus non oxydés et à la surface des résidus lorsque ceux-ci sont déjà pré-oxydés (Pabst *et al.*, 2018).

La nappe phréatique étant maintenue au niveau désiré, les résidus sont recouverts par une monocouche constituée de matériaux à granulométrie grossière (sable, gravier) ou fine (résidus miniers désulfurés ou des résidus miniers non générateurs de DMA) (Figure 2.9). Toutefois, le maintien et le contrôle du niveau de la nappe phréatique sont fonction du bilan hydrique qui doit être positif (limitation des pertes en eau) même en période de sécheresse. Ce bilan consiste à évaluer les apports (les précipitations, le ruissellement de surface et la recharge souterraine) et les pertes en eau (l'évaporation, l'infiltration à travers les barrages, le ruissellement à travers les déversoirs et la percolation vers la nappe phréatique) (Aubertin *et al.*, 1999; Dagenais, 2005; Pabst, 2021).

MEND (1996) propose trois méthodes permettant de surélever la nappe phréatique :

- La modification du bilan hydrique dans le parc à résidus : elle consiste à accroître l'apport d'eau ou à réduire les pertes en eau des résidus;
- L'amélioration de la capacité de rétention d'eau des résidus : cela revient à améliorer les caractéristiques physiques des résidus avant leur mise en place, de façon à parvenir à un niveau de saturation élevé. On peut procéder par épaissement des résidus;
- La construction de barrières freinant l'écoulement de l'eau souterraine : elle comprend l'installation d'une barrière à l'intérieur des résidus de manière à réduire l'écoulement

horizontal des eaux interstitielles qui s'effectue souvent d'amont en aval à l'intérieur des résidus.

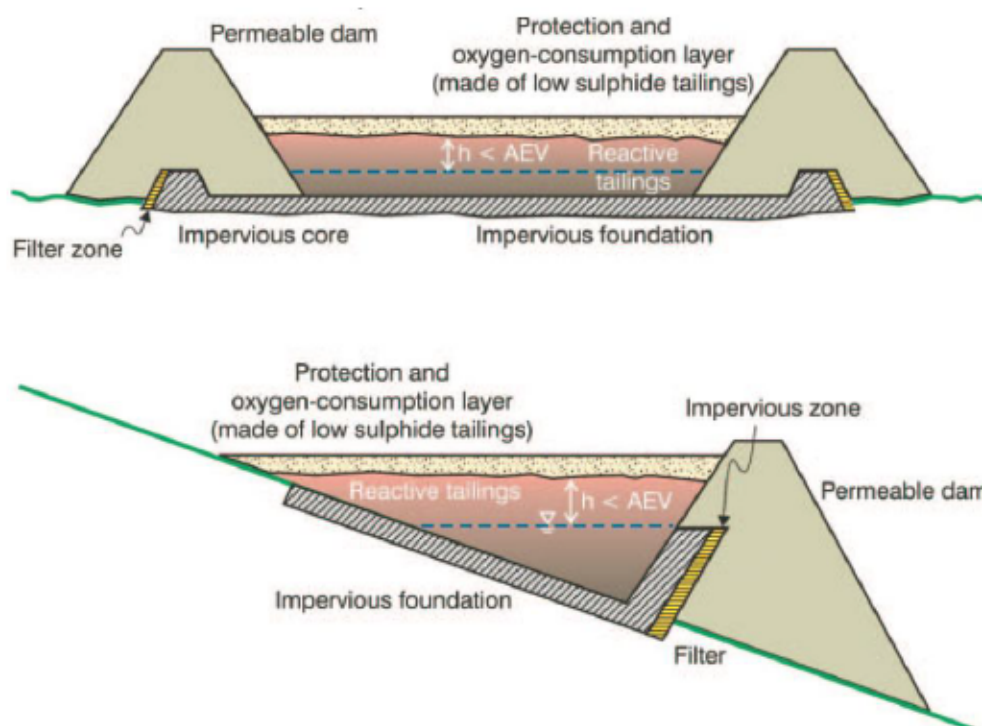


Figure 2.9 Schéma d'une nappe phréatique surélevée dans des résidus réactifs pour contrôler la production du DMA à long terme (tirée de Aubertin *et al.* (1999)).

La couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC) et le recouvrement monocouche combiné avec nappe phréatique surélevée (NPS) sont réputées efficaces sur des résidus frais comme sur ceux pré-oxydés. Leurs fonctionnements reposent, sur la connaissance des lois qui régissent les écoulements en milieu non saturés.

2.5 Notions d'écoulement de l'eau en milieux poreux

La question du mouvement des fluides en milieux saturé et non saturé est une interrogation essentielle en hydrogéologie de même qu'en géotechnique. La zone non saturée est située à l'interface entre l'atmosphère et la nappe phréatique. Il s'agit d'un système à trois phases (solide, liquide, gaz) où seule une partie des pores est remplie d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol. Par contre, la zone saturée est un système à deux phases (solide, liquide) dans lequel la totalité du système poreux est remplie d'eau et située en dessous de la nappe phréatique (Figure 2.10). La nécessité de comprendre les conditions d'écoulement de l'eau en milieux poreux a conduit à la

mise en place des modèles prédictifs et descriptifs des paramètres caractéristiques des différentes conditions d'écoulement qui seront présentés dans cette partie.

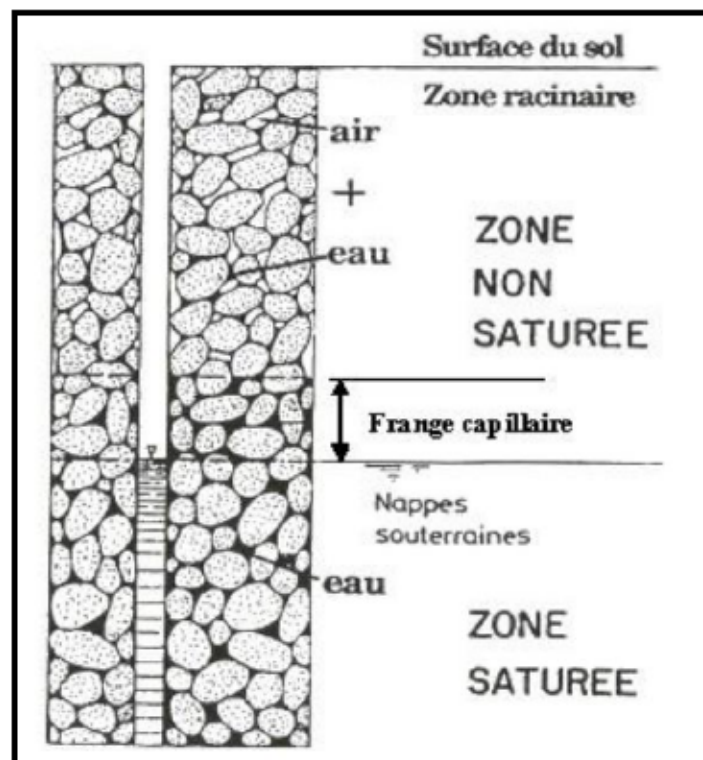


Figure 2.10 Répartition en profil de l'humidité dans les sols et la distinction entre la zone saturée et la zone non saturée (tirée de (Musy, 2001)).

2.5.1 Écoulement de l'eau en milieu poreux saturé

2.5.1.1 Définition et caractérisations

Darcy, dans ses expériences a mis en évidence une relation proportionnelle entre le débit d'eau (Q) s'écoulant à travers une colonne de sable (homogène) de section (A) et le gradient hydraulique (i). Ceci en posant les hypothèses d'un milieu isotrope, d'un fluide incompressible et d'un écoulement laminaire, isotrope et continu (Figure 2.11).

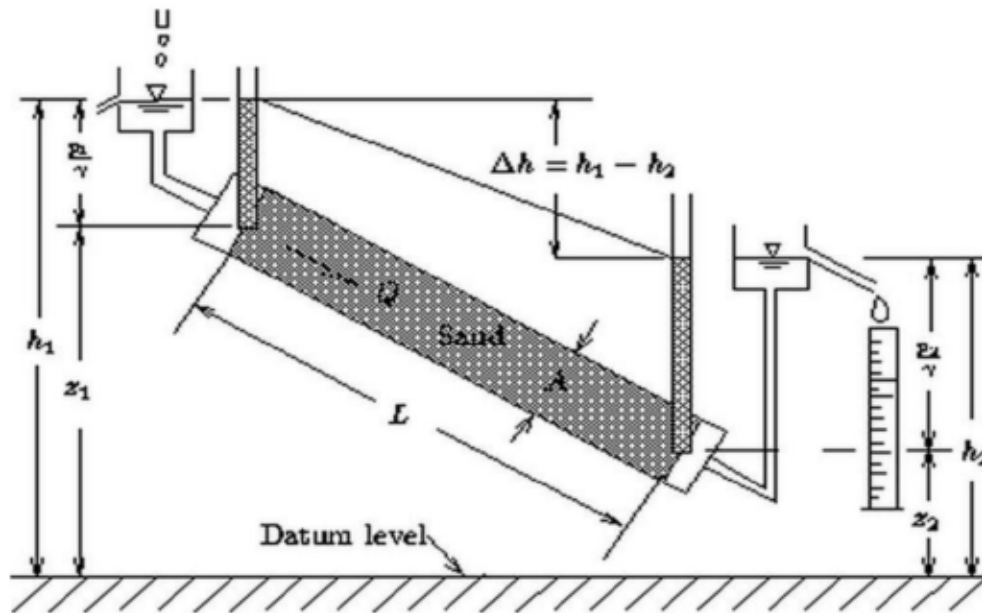


Figure 2.11 Écoulement à travers la colonne de sable pour démontrer la loi de Darcy.

Dans les milieux poreux saturés, l'écoulement de l'eau est généralement décrit par cette loi de Darcy. Dans un milieu à une dimension, elle s'exprime comme suit (Delleur, 1999; McCarthy, 2007; Fredlund *et al.*, 2012) :

$$Q = k_{sat} i A \quad (2.8)$$

où,

Q est le volume d'eau s'écoulant par unité de temps (débit) [$L^3 \cdot T^{-1}$] ;

k_{sat} est la conductivité hydraulique saturée ou coefficient de perméabilité de Darcy [$L \cdot T^{-1}$] ;

i est le gradient hydraulique [-] ;

A est l'aire de la section transversale du milieu poreux [L^2].

Le gradient hydraulique correspond au rapport de la différence de charge hydraulique par unité de distance d'écoulement entre deux points. Il est la force motrice de l'écoulement.

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (2.9)$$

où,

$\Delta h = (h_1 - h_2)$ est la variation de charge hydraulique (différence entre la charge ou la hauteur d'eau à la limite d'entrée (h_1) et à la limite de sortie (h_2) par rapport à un certain niveau de référence) [L] ;

L est la longueur du milieu poreux à travers lequel l'eau s'écoule entre les points h_1 et h_2 [L].

En milieu anisotrope et hétérogène, les conductivités hydrauliques sont différentes dans toutes les directions (horizontale k_h et verticale k_v). L'expression de la loi de Darcy se développe de facto en un milieu à trois dimensions (cartésien) et est décrite par un tenseur :

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = [k_{ij}] \times \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

où,

q_x, q_y et q_z représentent les débits spécifiques (ou vitesse de Darcy) suivant les axes x, y et z ;

i_x, i_y et i_z correspondent aux gradients hydrauliques suivants les axes x, y et z ;

k_{ij} est le tenseur de second ordre (3×3) de la conductivité hydraulique.

La loi de Darcy n'est prise en compte que si certaines conditions sont respectées. L'écoulement doit être laminaire et homogène sans seuil, le milieu doit être saturé en eau, le fluide doit être incompressible et isotherme. Ces conditions sont habituellement vérifiées dans la majorité des sols saturés. Cependant, la linéarité de la relation entre q et i peut être modifiée par des écoulements turbulents favorisés par la présence de macropores (cas des matériaux grossiers) et de fractures (dessiccation, fissuration) (Pabst, 2011; Kalonji, 2014).

2.5.1.2 Mesure de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat})

La conductivité hydraulique saturée peut être définie comme la capacité d'un sol à retenir ou à laisser l'eau s'écouler. Elle est l'une des propriétés hydrogéologiques les plus importantes à mesurer ou à évaluer pour la caractérisation du comportement des sols (le retrait et la consolidation). C'est donc un paramètre qui contrôle les caractéristiques de l'écoulement de l'eau.

La conductivité hydraulique saturée peut être mesurée sur le terrain comme au laboratoire. Au laboratoire elle est obtenue à partir des essais de perméabilités réalisés à l'aide de perméamètres. Ces mesures peuvent également être réalisées par des essais œdométriques (Bussière, 1993). On

utilise le plus souvent les essais de perméabilité standardisés, y compris ceux à charge constante et à charge variable en fonction de la valeur de la k_{sat} attendue ou du type de matériau à caractériser (Peregoedova, 2012; Bussière & Guittonny, 2021), donc :

- Pour des matériaux granulaires (grossier) à $k_{sat} > 10^{-5}$ cm/s des essais à charge constante dans des perméamètres à parois rigides sont recommandés, tandis que ;
- Pour des matériaux à grains fins à $k_{sat} < 10^{-5}$ cm/s, il est recommandé d'utiliser des essais à charge variable dans des perméamètres à parois flexibles ;

Sur le terrain, on peut utiliser pour la mesure de la k_{sat} , des essais Lefranc (pour les sols meubles ou de forte perméabilité), des essais Lugeon (pour des sols cohérents ou de faible perméabilité), des essais de pompage ou d'injection (par puits de pompage ou piézomètre) et les essais Double-Anneau (à charge constante ou variable).

2.5.1.3 Estimation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat})

La conductivité hydraulique est un paramètre essentiel pour la compréhension et la résolution des questions hydrogéologiques et géotechniques. Les méthodes de mesures de la k_{sat} (terrain et laboratoire) mentionnées précédemment sont très coûteuses et difficiles à réaliser. De ce fait, des méthodes permettant l'estimation de la k_{sat} par des expressions (équations) mathématiques ont été développées. Ces méthodes d'estimation sont généralement recommandées lors de la phase préliminaire des projets miniers. Ces estimations sont faites à partir des caractéristiques géotechniques de base des matériaux. De plus, ces estimations permettent une meilleure planification du programme d'essais en fonction des résultats anticipés. Ces nombreuses équations empiriques ont été développées dépendamment du type de sols (grossiers ou fins et plastiques ou à faible plasticité) (Chapuis & Aubertin, 2003; Chapuis, 2004; Chapuis, 2012).

Les modèles employés pour estimer la k_{sat} sont ceux de Kozeny-Carman (KC), de Kozeny-Carman modifié (KCM) et de Hazen. L'expression de ces équations est présentée comme suit :

- Modèle de Kozeny-Carman (KC) (Aubertin *et al.*, 1996c; Chapuis & Aubertin, 2003) :

$$k_{sat} = C \frac{g}{\mu_w \rho_w} \frac{e^3}{S_s^2 G_s^2 (1 + e)} \quad (2.11)$$

où

k_{sat} est la conductivité hydraulique saturée [$L.T^{-1}$] ;

C est la constante du modèle ;

g est l'accélération gravitationnelle ($g = 9,81 m.s^{-2}$) ;

e est l'indice des vides du matériau [-] ;

μ_w est la viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3} Pa.s$ à 20°C) ;

ρ_w est la masse volumique de l'eau ($= 1\,000 kg.m^{-3}$ à 20°C) ;

G_s est la densité relative des grains solides [-] ;

S_s est la surface spécifique des grains solides [$m^2.kg$].

$$S_s = \frac{\alpha}{\rho_s D_H} \quad (2.12)$$

où,

α est le facteur de forme [-] ;

D_H est le diamètre homogène ou le diamètre des pores d'un sol homogène ayant la même surface spécifique que celui considéré [L].

Le diamètre D_H est évalué à partir de la courbe granulométrique (Chapuis & Légaré, 1992) :

$$D_H = \left(\sum \frac{P_{NoD} - P_{Nod}}{d} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

où,

P_{NoD} est le pourcentage massique des grains de diamètre inférieur au tamis D [-] ;

P_{Nod} est le pourcentage massique des grains de diamètre inférieur au tamis d (D et d sont des tamis successifs) [-] ;

d est le diamètre du tamis [L].

- Modèle de Kozeny-Carman modifié (KCM) (Aubertin *et al.*, 1996c; Mbonimpa *et al.*, 2002), résumé dans le Tableau 2.1 :

Tableau 2.1 Équations mathématiques du modèle de Kozeny-Carman modifié d'estimation de la $k_{sat,G}$.

Paramètres	Expressions	
	Matériaux à faible cohésion/plasticité	Matériaux cohérents et/ou plastiques
k_{sat}	$k_{sat,G} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_U^{1/3} D_{10}^2$ <p>(2.14)</p>	$k_{sat,P} = C_P \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} \frac{1}{\rho_s^2 w_L^{2\chi}}$ <p>(2.15)</p>
	<p>avec,</p> <p>$C_G \approx 0.1$; $\gamma_w \approx 9.8 \text{ kN.m}^{-3}$;</p> <p>$\mu_w \approx 10^{-3} \text{ Pa.s}$; $x \approx 2$; D_{10} en cm.</p>	<p>avec,</p> <p>$C_P \approx 5.6 \text{ g}^2.\text{m}^{-4}$; ρ_s en kg.m^{-3} ;</p> <p>$\chi \approx 1.5, (0 \leq \chi \leq 2)$; w_L en %.</p>
<p>χ est le paramètre du matériau, utilisé dans la relation $S_s - w_L$: ($S_s = \lambda w_L^\chi$) ;</p> <p>x est le paramètre introduit dans la fonction de taux de vide pour prendre en compte l'effet de la tortuosité ;</p> <p>w_L est la limite de liquidité ;</p> <p>D_{10} est le diamètre (taille) des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [cm] ;</p> <p>C_U est le coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60}/D_{10}$) [-] ;</p> <p>D_{60} est le diamètre (taille) des grains correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique [cm].</p>		

La conductivité hydraulique dans un sol saturé est fonction de l'indice des vides (Lambe & Whitman, 1979) et elle est souvent considérée constante.

- Modèle de (Hazen, 1911)

Hazen, pour estimer la conductivité hydraulique saturée des sables a développé la formule empirique suivante :

$$k_{sat} = C_H D_{10}^2 \quad (2.16)$$

où,

$C_H (cm^{-1}s^{-1})$ est le coefficient empirique de Hazen, dont les valeurs varient de 1 à 1 000. Mais généralement supposée égale à 100.

$D_{10}(cm)$ défini comme plus haut.

L'applicabilité de cette formule est généralement restreinte aux matériaux ayant : $C_U < 5$ et $0.01 \text{ cm} < D_{10} < 0.03 \text{ cm}$ (Aubertin *et al.*, 1996c; Mbonimpa *et al.*, 2002).

2.5.2 Écoulement de l'eau en milieu poreux non saturé

2.5.2.1 Définition et caractérisations

L'écoulement d'eau en milieu non saturé est celui le plus souvent rencontré dans la nature. Ces milieux (zone vadose) sont communément situés à l'interface entre la surface du sol (en contact avec l'atmosphère) et celle de la nappe phréatique. Cette zone, est constituée de trois phases (sol-eau-air) avec les pores du sol partiellement remplis d'eau et d'air contrairement à la zone saturée en eau (deux phases : sol-eau) où, la totalité des poreux est rempli d'eau. La charge hydraulique (h) par unité de hauteur ou de pression pour ces sols non saturés, est donnée par l'expression suivante :

$$h = \psi + z \quad (2.17)$$

où,

ψ est la hauteur de pression encore appelée aspiration ou succion matricielle [L] ;

z est la hauteur de charge à partir d'un niveau de référence [L] (Les valeurs de l'axe z sont orientées vers le bas).

La loi de Darcy particulièrement utilisée pour l'écoulement d'eau en milieu saturé ainsi que l'équation de conservation de masse ont été utilisées par Richards (1931) afin de développer une équation permettant de décrire l'écoulement de l'eau en milieu non saturé. Hillel (1980) a décrit cet écoulement en considérant un volume élémentaire de sol de la forme d'un parallélépipède rectangle dans un domaine cartésien x, y, z , tel que le montre la Figure 2.12. Avec $\Delta x, \Delta y$ et Δz

comme les côtés du volume élémentaire et $\Delta x \Delta y \Delta z$. Si l'on considère uniquement le débit spécifique q (volume d'eau qui passe à travers une surface unitaire par unité de temps) dans la direction x , la différence entre le débit d'entrée et celui de sortie d'eau de l'élément est définie de la manière suivante :

$$\Delta q_x = q_x \Delta y \Delta z - [q_x + (\partial q_x / \partial x) \Delta x] \Delta y \Delta z \quad (2.18)$$

Cette différence (réapprovisionnement) doit être égale à la quantité d'eau accumulée dans le volume élémentaire du sol par unité de temps, et est donnée par :

$$\Delta q = -(\partial q / \partial x) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.19)$$

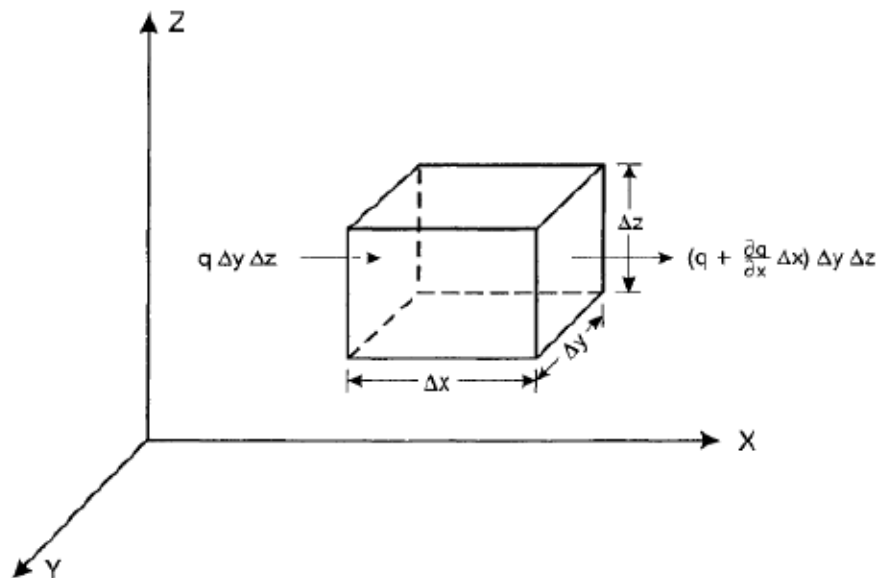


Figure 2.12 Volume élémentaire de sol avec le bilan (entrée et sortie) des débits (tirée de Hillel, 1980).

Le réapprovisionnement en eau du volume élémentaire du sol peut également être exprimé en fonction de la variation de la teneur en eau volumique (θ) dans le temps multiplié par le volume :

$$\Delta q = (\partial \theta / \partial t) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.20)$$

En définissant les équations (2.19) et (2.20) égales, on a :

$$(\partial \theta / \partial t) \Delta x \Delta y \Delta z = -(\partial q / \partial x) \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$\text{d'où } \partial \theta / \partial t = -\partial q / \partial x \quad (2.21)$$

En considérant également les débits dans les directions y et z en utilisant l'équation (2.21), on obtient la forme tridimensionnelle de l'équation de continuité. Ceci afin que cette équation soit autant valide pour un écoulement transitoire que pour un écoulement permanent.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (2.22)$$

avec q_x , q_y , q_z représentent les débits en x , y et z respectivement.

À partir de la loi de Darcy, conçue originellement pour un milieu saturé, le débit spécifique est :

$$q = - \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} + k_y \frac{\partial h}{\partial y} + k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.23)$$

où h est la charge hydraulique et k la conductivité hydraulique. En ajoutant la dépendance de la conductivité hydraulique à la succion, Richards (1931) a étendu cette loi pour les milieux non saturés ($k = k(\psi)$). L'équation (2.23) devient :

$$q = - \left(k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} + k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} + k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.24)$$

En se servant de la relation qui existe entre la θ et la ψ l'équation (2.24) peut encore s'écrire comme suit :

$$q = - \left(k_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} + k_y(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} + k_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.25)$$

En remplaçant q de l'équation (2.22) par l'équation (2.24), on obtient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \right) \quad (2.26)$$

D'après l'équation de Bernoulli, la charge hydraulique est considérée comme la somme de la pression (ou la succion dans notre cas) ψ et de la charge gravitationnelle (ou l'élévation) z ($h = \psi + z$). L'équation (2.26) devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] \right) \quad (2.27)$$

Puisque $\partial z / \partial x = 0$ et $\partial z / \partial y = 0$ et que $\partial z / \partial z = 1$ en raison du système de repère utilisé (repère cartésien).

L'équation d'écoulement non saturé de l'eau en milieu poreux est donc donnée par :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} \quad (2.28)$$

2.5.2.2 Courbe de rétention d'eau (CRE)

La courbe de rétention d'eau d'un milieu ou matériau poreux est la fonction qui représente la relation entre la teneur en eau volumique (θ) de ce dernier et la succion (ψ) qui lui est appliquée.

$$\theta(\psi) = n(\psi)S_r = w(\psi)[1 - n(\psi)] \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.29)$$

où,

θ est la teneur en eau volumique [-]

ψ est la succion exercée sur sol [L]

n est la porosité du sol [-]

S_r est le degré de saturation [-]

w est la teneur en eau massique [-]

γ_s est le poids volumique du sol [$M.L^{-1}T^{-2}$]

γ_w est le poids volumique de l'eau [$kN.m^{-3}$]

La succion matricielle peut être définie comme étant la hauteur d'eau au-dessus de la nappe phréatique :

$$\psi (cm) = \frac{\Delta u}{\gamma_w} \quad (2.30)$$

Ou encore comme une pression d'eau,

$$\psi (Pa) = \Delta u \quad (2.31)$$

avec,

Δu : la pression matricielle ($= u_a - u_w$), u_a et u_w sont respectivement les pressions d'air et d'eau à l'interface eau-air (en général $u_a = 0$ et u_w au-dessus de la nappe phréatique est négative, mais positive en dessous).

La CRE est probablement l'outil fondamental en géotechnique le plus largement utilisée pour caractériser les propriétés hydrauliques (Fredlund & Xing, 1994; Aubertin *et al.*, 1998) des milieux ou matériaux poreux non saturés tels que les sols et les résidus. Elle dépend principalement des propriétés de base du matériau, telles que la granulométrie, la porosité, la minéralogie (densité relative des grains solides) et des facteurs tels que la tortuosité du système des pores ainsi que le sens d'écoulement (en mouillage ou en drainage). La capacité de rétention d'eau d'un matériau par capillarité en drainage est fonction de la taille des pores. Plus la taille des pores est petite, plus l'eau se draine difficilement et inversement. Alors que par adhésion (absorption) elle est grande lorsque la taille des pores est petite et que la surface spécifique des grains est grande. Cependant, en mouillage, la hauteur d'ascension capillaire de l'eau dans un matériau est d'autant plus grande que la taille des pores est petite.

La CRE décrit de ce fait le profil à l'équilibre d'un matériau en drainage (la plus utilisée) ou de mouillage et est caractérisée par la présence de trois phases (Figure 2.13) :

- Phase 1 : palier à teneur en eau saturée constante (zone de saturation) où θ est égale à la teneur en eau à saturation θ_s et $\theta_s \approx n$ (porosité) et délimitée de la phase suivante par la pression d'entrée d'air ($AEV = \psi_a$) « air entry value » qui correspond au début de la désaturation. En drainage, l'AEV est une valeur critique de la succion pour laquelle les pores les plus grands commencent à se vider suite à l'application d'une succion à un matériau initialement saturé conduisant à une réduction de la teneur en eau;
- Phase 2 : pente de désaturation (zone transitoire) qui correspond au segment le long duquel on observe une diminution de θ avec une augmentation de la ψ . Elle est contrôlée par la distribution de la taille des pores du matériau. Cette phase est délimitée en amont par l'AEV et en aval par WEV;
- Phase 3 : palier à teneur en eau résiduelle (zone résiduelle) où la θ est proche de la teneur en eau résiduelle θ_r . Cette phase est délimitée de la phase précédente par la succion résiduelle ψ_r et s'obtient par l'intersection de la tangente à la pente de désaturation et celle au palier à teneur en eau résiduelle. Elle représente également la succion minimale (ψ_r) nécessaire pour atteindre la teneur en eau résiduelle θ_r .

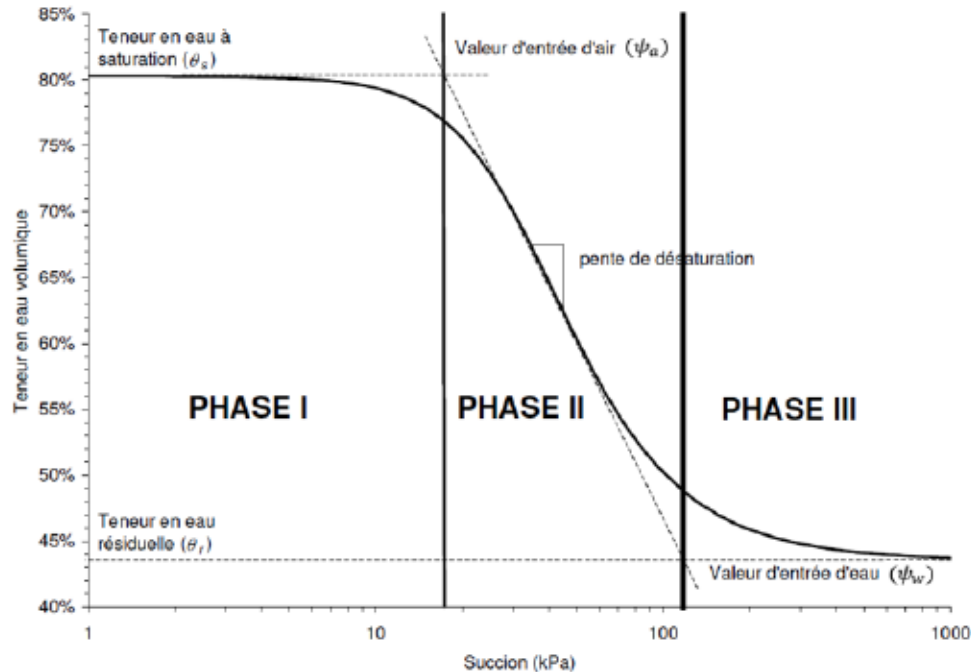


Figure 2.13 Représentation d'une courbe de rétention d'eau avec les points caractéristiques et les trois phases (tirée de (Parent, 2003)).

On distingue plusieurs méthodes permettant d'évaluer la valeur de ψ_a (le paramètre le plus important de la CRE) à partir de la relation $\theta - \psi$. La plus simple et la plus utilisée est la méthode des tangentes ($\psi_a = \psi_{BC}$) (Brooks & Corey, 1964; Fredlund & Xing, 1994). En suite la méthode du modèle descriptif de van Genuchten qui consiste à estimer ψ_a comme l'inverse du paramètre (α) qui est obtenu par une procédure dite d'ajustement des points expérimentaux ($\psi_a \approx \alpha_{vG}^{-1}$) (van Genuchten, 1980). Et enfin la méthode consistant à désigner ψ_a comme la succion correspondant à 90 % ou 95 % de saturation des matériaux ($\psi_a = \psi_{90} = \psi_{95}$) (Aubertin *et al.*, 1998; Aubertin *et al.*, 2003).

2.5.2.2.1 Mesure de la courbe de rétention d'eau (CRE)

Il existe différentes méthodes permettant d'évaluer la CRE au laboratoire ainsi que sur le terrain. Les essais sont généralement réalisés en drainage. Ils se font le plus souvent à l'aide de la cellule de Richards ou la cellule de pression « *Tempe Cell* » (Delage & Cui, 2000). Outre cette méthode, il existe également, les essais en colonne, la plaque drainante, la cellule triaxiale, le papier filtre, les tensiomètres, les psychromètres, les solutions salines. Tableau 2.2 fait la synthèse des principales méthodes de mesures de la CRE et leurs gammes de succions.

Tableau 2.2 Méthodes d'évaluation de la CRE en fonction des succions (Fredlund & Rahardjo, 1993; Lal *et al.*, 2004).

Méthode de mesure	Gamme de succion (kPa)
Boite à sable	0-10
Entonnoir de Haines	0-20
Mélange sable-kaolinite	10-50
Table de succion (en verre ou plexiglas)	0-60
Plaque de céramique	0-70
Tensiomètre	0-90
Consolidation avec des pierres poreuses	1-1 000
Cellules Tempe, extracteurs avec plaques poreuses	10-1 500
Osmose (glycol ou autre)	30-1 500
Psychromètre	100-2 000
Centrifugeuse	10-3 000
Membrane de pression, pressure plate	10-10 000
Équilibre des pressions de vapeur	3 000-1 000 000
Papier filtre	1 000-10 000 000

2.5.2.2.2 Modèles descriptifs de la CRE

Les modèles descriptifs de la CRE sont nombreux et peuvent être représentés par diverses expressions mathématiques telles que les modèles exponentiels, les modèles de loi de puissances, les modèles cosinus hyperboliques, les modèles polynomiaux et les modèles avec fonctions d'erreurs.

Parmi ces modèles qui permettent de décrire la courbe de rétention d'eau à partir de données expérimentales, les plus utilisés sont ceux de (Gardner, 1958; Brooks & Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund *et al.*, 1994). Ils sont présentés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 Formules mathématiques des modèles descriptifs les plus utilisés pour évaluer la CRE.

Gardner (1958)	
Formule mathématique	Paramètres
$\theta_e = \left(\frac{1}{1 + \alpha \psi^{n_G}} \right)$ (2.32)	où, <i>a</i> et <i>n_G</i> sont des constantes du modèle.
Brooks et Corey (1964)	
Formule mathématique	Paramètres
$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\lambda_{BC}}$ (2.33)	où, <i>θ_e</i> est la teneur en eau réduite ou effective (normalisée) ; <i>θ</i> est la teneur en eau volumique ; <i>θ_s</i> est la teneur en eau volumique à saturation ; <i>θ_r</i> est la teneur en eau volumique résiduelle ; <i>λ_{BC}</i> est le paramètre de lissage de courbe relié à l'agencement des pores ; <i>ψ_a</i> est la pression d'entrée d'air ; <i>ψ</i> est la pression de succion.
van Genuchten (1980)	
Formule mathématique	Paramètres
$\theta_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}}} \right]^{m_{vG}}$ (2.34)	où, <i>α_{vG}</i> , <i>m_{vG}</i> , <i>n_{vG}</i> sont les constantes d'ajustement du modèle. <i>α_{vG}</i> est le paramètre du sol lié à la hauteur capillaire (<i>α_{vG}</i> ≅ 1/AEV) [L ⁻¹] ; <i>m_{vG}</i> et <i>n_{vG}</i> sont les paramètres du modèle, liés à la distribution granulométrique. Elles sont souvent données par les équations : - <i>m_{vG}</i> = 1 - 1/ <i>n_{vG}</i> - <i>m_{vG}</i> = 1 - 2/ <i>n_{vG}</i>

Tableau 2.3 Formules mathématiques des modèles descriptifs les plus utilisés pour évaluer la CRE.
(suite)

Fredlund et Xing (1994)	
Formule mathématique	Paramètres
$\theta = c(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}}$ <p style="text-align: center;">(2.35)</p> <p>avec,</p> $c(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{\ln[1 + (\psi_0/\psi_r)]}$ <p style="text-align: center;">(2.36)</p>	<p>où,</p> <p>$C(\psi)$ est le facteur de correction pour l'état complètement drainé, autrement dit il induit une teneur en eau nulle lorsque la succion s'approche de sa limite où $\psi = 10^7 \text{ cm} = 10^6 \text{ kPa}$, quand $\theta = 0$;</p> <p>e est le nombre népérien (2,71828) ;</p> <p>a_f est la valeur approximative de ψ_a ;</p> <p>n_f est le paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau ;</p> <p>m_f est le paramètre de lissage de courbe (relié à la teneur en eau résiduelle et la fonction de correction $c(\psi)$;</p> <p>ψ_0 est la succion à l'état sec ($\psi_0 = 10^7 \text{ cm}$ en général ou $\psi_0 = 10^6 \text{ kPa}$) ;</p> <p>$\psi_r$ est la succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle.</p>

2.5.2.2.3 Modèles prédictifs de la CRE

Les méthodes de mesures de la CRE présentées plus haut sont coûteuses et prennent beaucoup de temps. C'est pour cette raison que des modèles prédictifs ont été développés pour les phases préliminaires des projets (Arya *et al.*, 1999; Aubertin *et al.*, 2003). Ces différentes méthodes prédictives sont basées sur les propriétés géotechniques de base des sols (granulométrie, porosité, indice des vides) et éventuellement sur des paramètres tels que la teneur en matière organique, la minéralogie des argiles. Parmi ces modèles, on peut citer ceux de, Arya and Paris (1981), Kovács (1981), Haverkamp and Parlange (1986), Arya *et al.* (1999) et de Kovács modifié (MK) (Aubertin *et al.*, 1998; 2003).

Le modèle *MK* est l'un des modèles de prédiction de la CRE et qui prend en compte les forces capillaires et d'adhésion et utilise les propriétés géotechniques de base des sols comme, la granulométrie (D_{10} et C_U) et l'indice des vides e (ou la porosité n) pour les sols granulaires et la limite de liquidité w_L (LL), la densité relative des grains G_s et e (ou n) pour les sols argileux (Tableau 2.4). Les équations proposées pour le modèle *MK* conservent les mêmes concepts physiques à partir desquels le modèle original de Kovács (1981) a été construit (Aubertin *et al.*, 2003) :

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (2.37)$$

avec,

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \quad (2.38)$$

où,

S_a^* valeur tronquée de la composante d'adhérence, introduite à la place de S_a utilisée dans le modèle d'origine, pour s'assurer que la composante d'adhérence ne dépasse pas l'unité à faible aspiration ($0 \leq S_a^* \leq 1$) ;

θ est la teneur en eau volumique [–]

n est la porosité totale du milieu poreux [–]

S_c est le degré de saturation dû à la capillarité [–]

S_a est le degré de saturation dû à l'adhésion [–]

Les parenthèses ou crochets de Macauley sont définis par : $\langle y \rangle = 0,5(y + |y|)$; pour $S_a \geq 1$, $S_a^* = 1$, et pour $S_a < 1$, $S_a^* = S_a$.

La saturation capillaire (S_c) agit principalement à faible succion. Tandis que la saturation d'adhésion (S_a) agit lorsque pratiquement toute l'eau capillaire est déjà drainée donc à forte succion. Elles sont données par les relations suivantes :

$$S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m \exp[-m(h_{co}/\psi)^2] \quad (2.39)$$

$$S_c(0 \leq S_c \leq 1)$$

$$S_a = a_c c(\psi) \frac{(h_{co}/\psi)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \quad (2.40)$$

où,

a_c est le coefficient d'adhésion [–]

e est l'indice des vides [–]

ψ_n est le paramètre normatif [L] (pour h_{co} et ψ exprimés en *cm*, $\psi_n = 1 \text{ cm}$)

h_{co} est la remontée capillaire équivalente [L]

$c(\psi)$ est le paramètre d'ajustement (défini comme à l'équation (2.38)) [–]

m est le paramètre fonction de la distribution des pores ($m = 1/C_U$) [–]

Tableau 2.4 Expression des différents paramètres en fonction de la nature du matériau.

Paramètres	Expression	
	Matériaux à faible cohésion/plasticité	Matériaux cohérents et/ou plastiques
h_{co} (Remontée capillaire équivalente)	$h_{co,G} = \frac{0,75}{(1,17 \log C_U + 1) e D_{10}} \quad (2.41)$	$h_{co,P} = \frac{\xi}{e} w_L^{1,45} \quad (2.42)$ <p>avec,</p> $\xi = 0,15 \rho_s \quad (2.43)$
ψ_r (Succion résiduelle)	$\psi_r = 0,11 \left(\frac{C_U}{e D_{10}} \right) \quad (2.44)$ <p>ou encore</p> $\psi_r = 0,86 h_{co,G}^{1,2} \quad (2.45)$	$\psi_r = 0,86 h_{co,P}^{1,2} = 0,86 \left(\frac{\xi}{e} \right)^{1,2} w_L^{1,74} \quad (2.46)$ <p>ou encore,</p>

Tableau 2.4 Expression des différents paramètres en fonction de la nature du matériau. (suite)

Paramètres	Expression	
	Matériaux à faible cohésion/plasticité	Matériaux cohérents et/ou plastiques
		$\psi_r = 0,088 \left(\frac{\rho_s}{e}\right)^{1,2} w_L^{1,74}$ (2.47)
a_c (Coefficient d'adhésion)	$a_c = 0,01$	$a_c = 7 \cdot 10^{-4}$
m (Paramètre de distribution de la taille des pores)	$m = 1/C_U$	$m = 3 \cdot 10^{-5}$
ψ_n (Succion normalisée)	$\psi_n = 1 \text{ cm}$	
C_U (Coefficient d'uniformités)	$C_U = D_{60}/D_{10}$	
D_{60} et D_{10} : Diamètre des particules à 60% et 10% de passant cumulé respectivement.		

2.5.2.2.4 Effet d'hystérésis

Les modèles prédictifs mentionnés ci-dessus sont limités à cause des effets d'hystérésis, qui ne sont pas pris en compte par la plupart de ces modèles. C'est ainsi que (Maqsood *et al.*, 2004; Maqsood *et al.*, 2006, 2012) ont utilisé le modèle de Kovács modifié (MK) pour prédire ces phénomènes d'hystérésis. Les travaux au laboratoire et sur le terrain pour la construction de la CRE ont montré que la relation $\theta - \psi$ peut dépendre du chemin ou de l'essai, en mouillage (sol initialement non saturé) ou en drainage (séchage, S_r initial de 100 %) appliqué pendant le test.

On remarque sur la Figure 2.14 que la CRE comporte deux courbes principales, ainsi que deux courbes intermédiaires et que la teneur en eau volumique pour une succion nulle en drainage est plus grande que celle en mouillage en raison de l'emprisonnement de l'air dans les interstices du sol lors du mouillage du sol sec. Le plus souvent, seule l'une des courbes principales est utilisée (en pratique généralement la courbe en drainage). Les effets d'hystérésis sont attribuables aux facteurs suivant (Hillel, 1980; Lu & Likos, 2004):

- La non-uniformité de la géométrie des pores individuels (« *ink-bottle effect* »), ou effet de « bouteille d'encre »;
- La différence d'angle de contact liquide-solide entre les cycles de mouillage et de séchage ;
- La présence d'air emprisonné ;
- L'altération partielle de la structure due aux effets de gonflement et retrait (les variations de volume du sol (tassement)) ;
- L'effet de condensation capillaire (qui peut avoir un effet mouillant à forte succion).

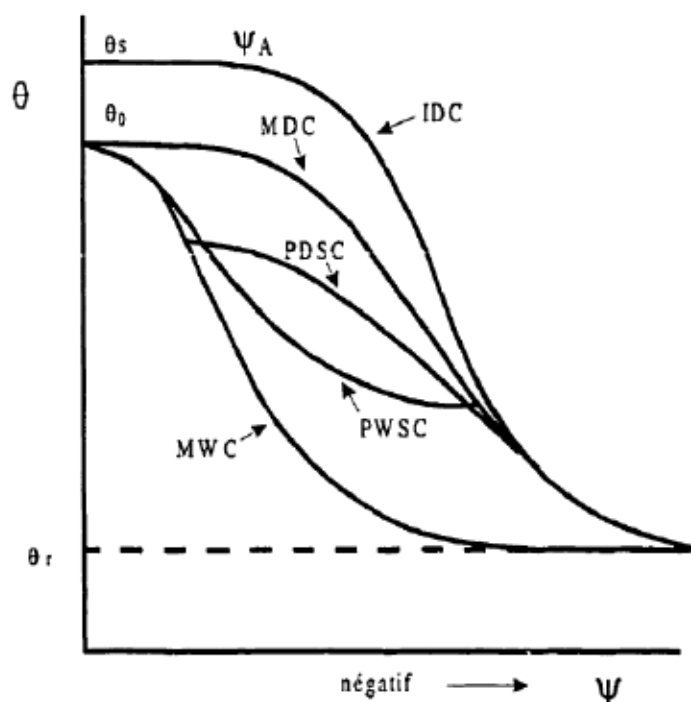


Figure 2.14 Courbes de rétention d'eau schématisées avec effets d'hystérésis. IDC est la courbe initiale en drainage, MWC est la courbe principale en mouillage, MDC est la courbe principale en drainage, PDSC est une courbe intermédiaire en drainage, PWSC est une courbe intermédiaire en mouillage, θ_0 : teneur en eau maximale à saturation (aussi notée θ_{\max} parfois) (Bussière, 1999).

2.5.2.2.5 Fonction de perméabilité

Les propriétés d'un sol à laisser s'écouler l'eau dans des conditions non satur es sont li es à la fonction de perméabilité ou encore à la conductivité hydraulique non satur e, not e $k(\theta)$ ou $k(\psi)$. Tout comme la courbe de rétention d'eau (CRE), la conductivité hydraulique en milieu non saturé,

est significativement affectée par les changements à la fois de l'indice des vides et du degré de saturation (teneur en eau) du sol et principalement contrôlée par la distribution de la taille des pores. La fonction de perméabilité peut être déterminée au laboratoire à l'aide de différentes techniques à savoir, la méthode du débit sortant, la méthode par régime permanent et la méthode par profil instantané (Hillel, 1980; Fredlund & Rahardjo, 1993). Ces techniques impliquent des mesures avec des perméamètres ou des colonnes, en conditions contrôlées avec suivi des valeurs de θ et de ψ . Cette mesure de la fonction de perméabilité $k(\psi)$ au laboratoire étant difficile et longue, elle est habituellement déduite à partir de la courbe de rétention d'eau $\theta(\psi)$. Sur la Figure 2.15, est présenté deux exemples de fonctions de perméabilité pour un sable et un silt.

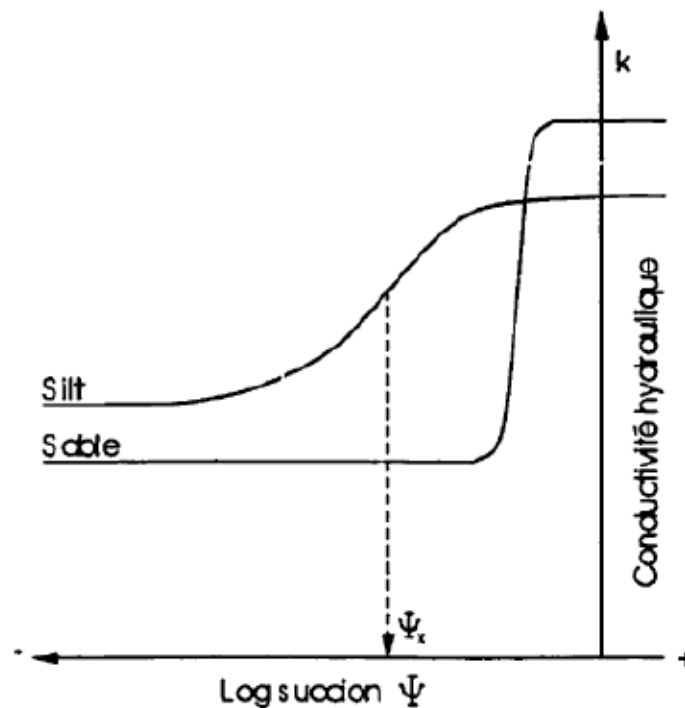


Figure 2.15 Fonctions de perméabilité schématisées pour un sable et un silt (tirée de Aubertin et al., 1995).

Dans la littérature, il existe des modèles empiriques, macroscopiques, fractals et statistiques (qui ne seront pas présentés ici), permettant d'obtenir la fonction de perméabilité ($k(\psi)$) à partir de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) et de la conductivité hydraulique relative (k_{rel}) en passant par la CRE ($\theta(\psi)$). L'équation traduisant cette relation est :

$$k(\psi) \text{ ou } k(\theta) = k_{sat} \cdot k_{rel} \quad (2.48)$$

- Pour $\psi \leq \psi_a$, on a :

$$k(\psi) = k_{sat} \text{ ou } k_{rel} = 1$$

- Pour $\psi > \psi_a$, on a :

$$k(\psi) < k_{sat} \text{ ou } k_{rel} < 1$$

D'après (van Genuchten, 1980) - (Mualem, 1976), la fonction de conductivité hydraulique non saturée est obtenue par :

$$k(\theta) = k_{sat} \cdot k_{rel}(\theta) = k_{sat} \theta_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - \theta_e^{1/m_{vG}} \right)^{m_{vG}} \right]^2 \quad (2.49)$$

ou,

$$k(\psi) = k_{sat} \cdot k_{rel}(\psi) = k_{sat} \frac{\{1 - (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}-1} [1 + (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}}]^{-m_{vG}}\}^2}{[1 + (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}}]^{m_{vG}/2}} \quad (2.50)$$

2.6 La matière organique et ses propriétés

La matière organique (MO) est la matière obtenue par la décomposition des êtres vivants (animaux, végétaux ou champignons) sous l'effet de certains décomposeurs, dont les micro-organismes. En termes géologiques, la matière organique constitue la première couche du sol qui prend naissance dès lors que la vie végétale et animale vient s'installer dans les débris de l'altération d'une roche mère. À la mort de ces êtres vivants, leur matière s'incorpore aux substances minérales du sol. La compréhension de la matière organique est essentielle voir impérative pour établir son influence sur la CRE du sol.

2.6.1 Caractéristiques de la matière organique

La MO du sol est la composante organique du sol, constituée de trois parties, à savoir les petits résidus (frais) et les petits organismes vivants du sol, la matière organique en décomposition (active) et la matière organique résistante ou stable (humus). Ces parties peuvent être regroupées en deux composantes principales, les composantes vivantes et non vivantes (Figure 2.16) à des proportions variables. La composante vivante comprend la macrofaune et la microfaune du sol, ainsi que les communautés microbiennes du sol, qui peuvent être actives ou dormantes (10 à 40 %). La partie non vivante de la matière organique du sol est dérivée des apports de plantes et de faune mortes dans le sol (40 à 60 %).

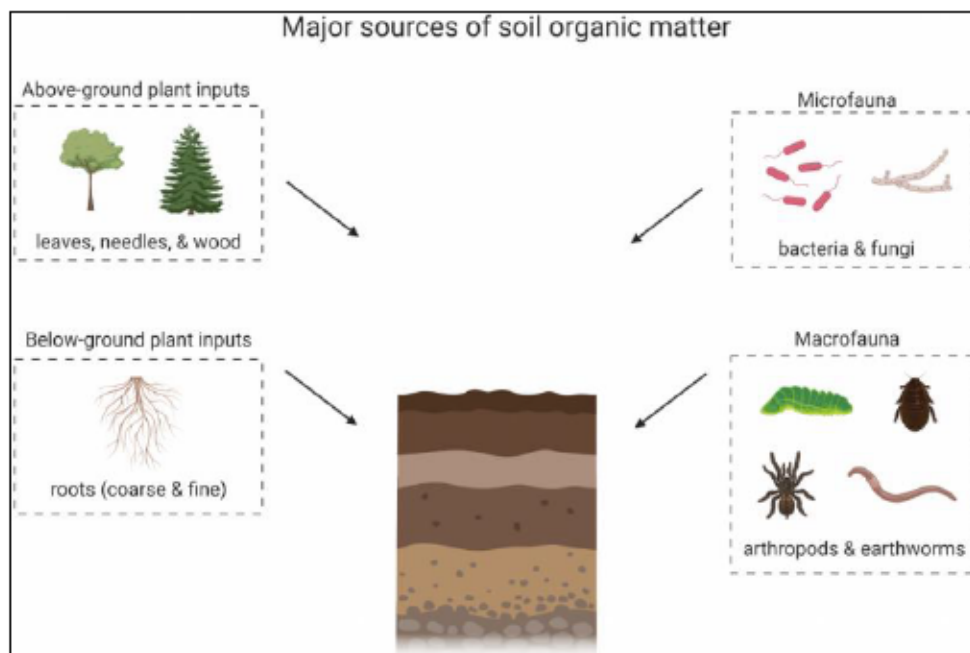


Figure 2.16 Principales sources d'intrants qui forment la matière organique du sol (tirée de (Quideau *et al.*, 2021).

Cette MO du sol provient en général des tissus végétaux, subdivisés en deux groupes :

- Les résidus végétaux, qui contiennent 60 à 90 % d'humidité ;
- La matière sèche restante qui est constituée principalement de carbone (C) (45-55 %), d'oxygène (O) (35-45 %), d'hydrogène (H) (3-5 %), de petites quantités d'autres éléments très importants pour la nutrition des plantes, notamment, l'azote (N), le soufre (S), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) et le fer (Fe) et de matières minérales. Bien que présents en petites quantités, ces nutriments sont très importants du point de vue de la gestion de la fertilité des sols.

Au fur et à mesure que les résidus végétaux sont décomposés, la matière organique résistante ou stable (humus) est progressivement mise en place. La MO peut donc être subdivisée en catégories. Ces différentes catégories sont généralement classifiées en fonction de leurs rôles et des constituants des sols (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 Différents types de matières organiques et leur fonction (Huber & Schaub, 2011).

Type de matière organique (MO)	Fonctions / rôles
Matière organique vivante : végétaux et animaux vivants.	Transformation / minéral.
Matière organique fraîche : Vestiges végétaux, animaux et déchets ménagers relativement récents, à forte teneur en sucre et à haute valeur énergétique.	Substrat énergétique et de croissance / fertilité chimique.
Matière organique transitoire (Matière organique partiellement décomposée) : Bien qu'en état de décomposition, cette matière fournit une importante teneur organique et nutritive aux sols, agissant comme compost ou engrais. C'est une matière évoluée (cellulose réduite, lignine, protéines).	Substrat énergétique / fertilité physique (structure du sol).
Matière humique (Matière organique décomposée) : elle met beaucoup de temps à se décomposer et ne contient pas trop de nutriments, mais fournit un support pour l'absorption de l'eau dans les sols (lignine, cellulose, matières azotées microbiennes).	Fertilité physique (stabilité à long terme).

D'après Huber and Schaub (2011) la matière organique est bénéfique pour le sol parce qu'elle favorise la pénétration et le stockage de l'eau, ainsi que la limitation de l'hydromorphie, du ruissellement, de l'érosion, du tassement/compactage et elle constitue une meilleure alimentation hydrique pour le sol.

2.6.2 Influence de la matière organique sur la courbe de rétention des sols

Plusieurs travaux ont été réalisés sur les facteurs qui contrôlent la courbe de rétention d'eau du sol. Les principaux facteurs sont : la densité apparente (Gupta & Larson, 1979), la texture (distribution granulométrique) (Gupta & Larson, 1979; (Arya *et al.*, 1999), la structure (Jamison, 1953) et la matière organique (Gupta & Larson, 1979). Cette dernière quant à elle est connue pour avoir une grande capacité de rétention d'eau. Cette capacité de rétention est une propriété hydrique essentielle du sol qui régule l'emmagasinage, la répartition, la disponibilité et l'évaporation potentielle de l'eau du sol. Elle a de profondes influences sur les processus hydrologiques des sols. Les facteurs

suscités sont le plus souvent utilisés dans les fonctions de pédotransfert (PTF) pour la prédiction de la courbe de rétention d'eau du sol (Kern, 1995; Wösten *et al.*, 2001; Saxton & Rawls, 2006). Certains chercheurs s'étant attardés sur le contenu de la matière organique décomposée (humus), ont démontré qu'il a une capacité de rétention d'eau relativement plus élevée en raison de sa faible densité apparente (Perie & Ouimet, 2008), de sa porosité élevée et de son faible encroûtement (de Rouw & Rajot, 2004). Selon de Jong *et al.* (1982), la texture est la propriété du sol qui influe le plus sur l'allure de la courbe de rétention d'eau. En revanche la teneur en carbone organique affecte surtout la teneur en eau du sol. De plus l'incorporation du compost dans le sol, entraîne une augmentation de la rétention d'eau des sols même après plus d'un an (Aggelides & Londra, 2000; Schmid *et al.*, 2017; Kranz *et al.*, 2020).

La rétention d'eau du sol est affectée par la MO en raison de l'affinité de cette dernière avec l'eau et de son influence sur la structure et la densité apparente du sol, sur laquelle elle agit non seulement en diminuant la densité de la phase solide, mais aussi dans sa capacité à construire la structure du sol de manière à augmenter sa porosité (Kay *et al.*, 1997; Rawls *et al.*, 2003; Bot & Benites, 2005; Yang *et al.*, 2014). McBride and Mackintosh (1984) et Kern (1995) ont affirmé que la matière organique du sol affecte la rétention d'eau du sol en modifiant ses paramètres structuraux et d'adsorption. Cependant, il a été démontré que les effets de la MO sur la rétention d'eau du sol dépendent des proportions des composants texturaux et de la teneur en MO du sol. Car, le carbone organique retient plus d'eau que les sols minéraux (Rawls *et al.*, 2003). D'après Fernandez-Rueda Ma and Paz-Gonzalez (1998), la capacité de rétention du sol augmente avec la teneur en MO, à de faibles succions donc proche de la saturation. À des succions plus élevées, la matière organique du sol affecte la rétention d'eau du sol principalement en modifiant la structure du sol (la densité apparente); tandis qu'à des succions plus faibles, la matière organique du sol fonctionne en augmentant la capacité d'adsorption du sol pour retenir davantage d'eau (Yang *et al.*, 2014; Tassinari *et al.*, 2022). Nong *et al.* (2019) ont mené des expériences sur des échantillons de sables et ont constaté qu'un amendement avec la MO sur le sable propre, ne produit aucun changement significatif sur l'AEV. Cependant, une augmentation de la MO produit une augmentation de la teneur en eau résiduelle. Par contre, pour le sable argileux amendé avec de la matière organique, l'AEV ainsi que la pente de la CRE diminuent avec la matière organique. Tandis que les teneurs en eau résiduelle restent non affectées (Figure 2.17). Selon Wesseling *et al.* (2009), pour des sables allant d'une texture légère à grossière, un amendement de 10 % de MO augmente la capacité de

rétenion d'eau indépendamment de la succion correspondante. Reina-Leal *et al.* (2019) constatent que sur une kaolinite amendée avec la MO (0, 20, 50 et 75 %) et pour une valeur de succion donnée, l'augmentation de la teneur en MO conduit à l'augmentation de la valeur de la teneur en eau, tout en entraînant la diminution de la valeur de l'AEV, ainsi que la pente de la CRE (Figure 2.18). De même, Ankenbauer and Loheide (2017) observent que, les sols qui ont moins de MO ont tendance à garder moins d'humidité que les sols avec plus de MO. Néanmoins, il est important de préciser que les effets de la MO sur la capacité de rétenion du sol dépendent grandement de la texture et de la teneur initiale en carbone organique du sol (Rawls *et al.*, 2003; Olness & Archer, 2005; Saxton & Rawls, 2006).

D'après Rawls *et al.* (2003), à de faibles teneurs initiales de carbone organique, une augmentation de la teneur en carbone organique conduit à une augmentation de la rétenion d'eau dans les sols sableux et à une diminution de la rétenion d'eau dans les sols à texture fine (argileux). Toutefois, ils constatent aussi qu'à faible teneur en carbone organique, la sensibilité de la rétenion d'eau aux variations de la teneur en carbone organique est plus élevée dans les sols sableux et qu'à des valeurs élevées de carbone organique initiales. Une augmentation des teneurs en carbone organique entraîne dans toutes les textures une augmentation de la rétenion d'eau. Pour apporter plus de précision aux observations, les auteurs précédents (Kern, 1995; Ebrahimi *et al.*, 2014) affirment que la teneur en argile et la matière organique ont des effets similaires sur la rétenion d'eau du sol. Mais, la matière organique est le principal facteur de variabilité de rétenion d'eau du sol dans le contexte où la teneur en argile est faible et relativement uniforme. Ceci confirme la conclusion de Jamison (1953) selon laquelle la matière organique entraîne une forte influence dans les sols sableux à faible teneur en argile.

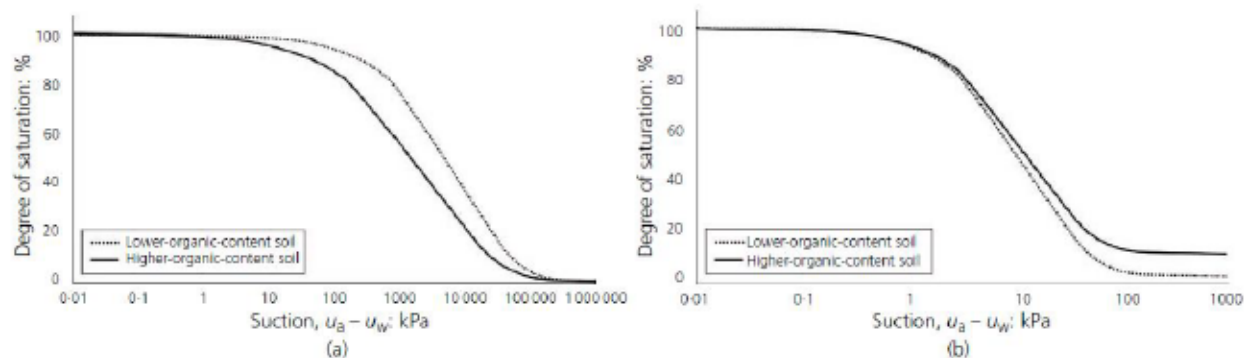


Figure 2.17 Schémas des CRE du sol à haute et à faible teneur en matières organiques : (a) un sable argileux et (b) un sable propre.

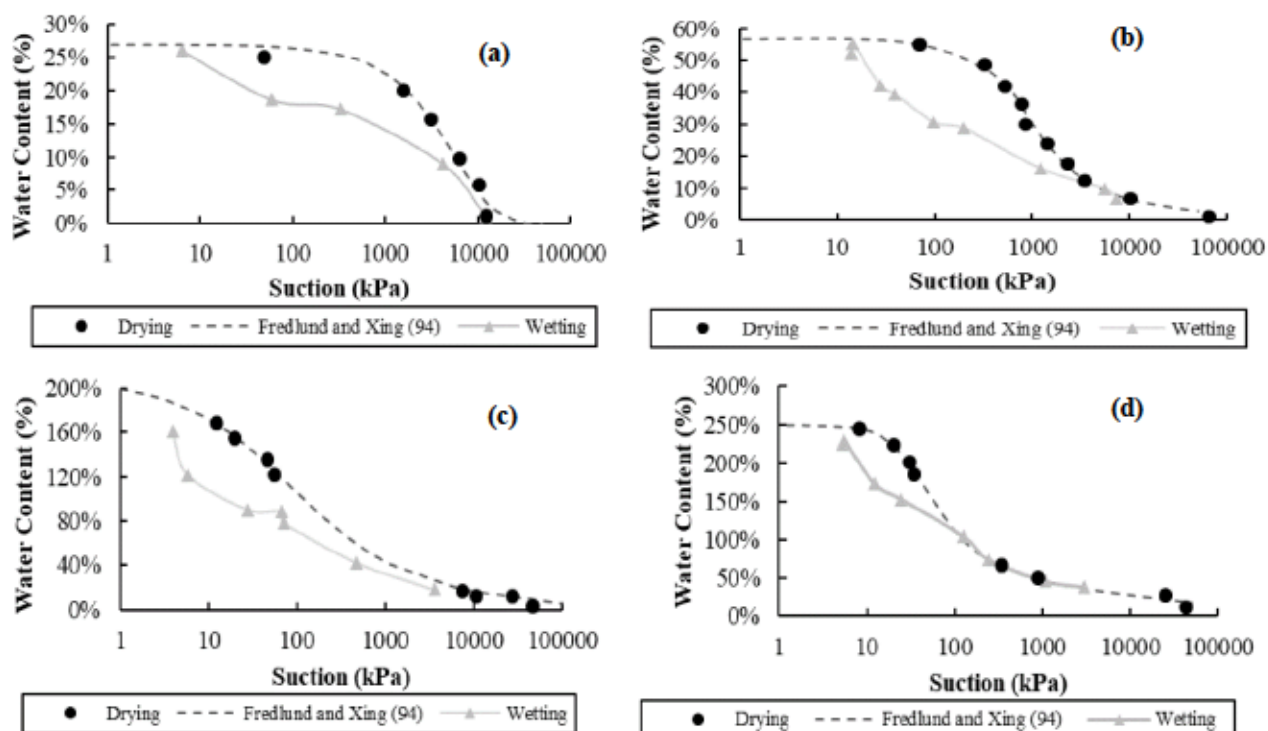


Figure 2.18 CRE du kaolin avec différentes valeurs de teneur en matière organique : a) 0%, b) 20%, c) 50% et d) 75%.

Les travaux examinant les effets de la teneur en MO sur la courbe de rétention d'eau du sol sont variés et souvent contradictoires (Tableau 2.6). Certaines observations faites par des chercheurs suggèrent que la MO pourrait ne pas être un prédicteur important pour estimer avec précision la rétention d'eau du sol à des succions spécifiques (Arya & Paris, 1981; Kern, 1995; Kozak & Ahuja, 2005; Nemes & Rawls, 2006). Ce qui implique que le contenu organique joue un rôle faible, voire

négligeable, dans le contrôle de la capacité de rétention d'eau des sols. Danalatos *et al.* (1994) et Khlosi *et al.* (2013) quant à eux, ont constaté que la teneur en MO du sol n'était pas un facteur majeur lié aux variations de la capacité de rétention d'eau du sol (loam sableux à argile lourde). Ce constat peut être expliqué par le fait que les sols de ces deux études avaient une teneur relativement faible en MO (0 – 3,5 %) et une large gamme de distributions granulométriques du sol, donnant plus de poids statistique à ce dernier facteur. Ainsi, pour observer une influence de la matière organique sur la capacité de rétention des sols, il faut tenir compte de la distribution granulométrique et de la densité apparente du sol. Cependant, l'apport du carbone organique dans les sols aura un effet plus important sur la rétention d'eau des sols à texture grossière que des sols à texture fine. Ceci du fait que la MO associée aux particules de sol forme des agrégats ce qui peut entraîner une augmentation de la porosité du sol (Proteau, 2021). Le Tableau 2.6 résume les différents résultats (effets de la MO sur la CRE ou pas) des auteurs pour des succions de -33 kPa à -1 500 kPa. McBride and Mackintosh (1984) ont constaté que la teneur en eau à -1500 kPa n'était affectée que lorsque la teneur en MO > 5%. Hollis *et al.* (1977) ont trouvé que la teneur en matière organique était la variable du sol la plus influente pour estimer la teneur en eau à -5 kPa. Pour d'autres, la rétention d'eau du sol à -33 kPa est plus fortement affectée par le carbone organique que la rétention d'eau à -1 500 kPa (Rawls *et al.*, 2003). Lal (1979) et Danalatos *et al.* (1994) n'ont pas trouvé d'effet de la teneur en MO sur la rétention d'eau. Ils ont attribué cela à la teneur généralement faible en carbone organique de leurs échantillons. Selon plusieurs auteurs Jamison and Kroth (1958), Petersen *et al.* (1968) et de Jong (1983), une augmentation de la teneur en MO a entraîné une augmentation de la teneur en eau à toutes les succions. Bauer and Black (1981) ont constaté que le carbone organique avait un effet important dans les sols sableux et marginal dans les sols à texture moyenne et fine sur la rétention d'eau de ces échantillons. Des observations similaires ont été faites par Riley (1981).

Tableau 2.6 Effets observés de la teneur en matière organique sur la rétention d'eau du sol à deux succions -33 et -1 500 kPa.

Auteurs	-33 kPa	-1 500 kPa	Sols	MO/CO %
Petersen <i>et al.</i> (1968)	Non	Oui	Loam silteux	0,12 – 1,64
Lal (1979)	Non	Non	Argiles et loams	0,16 – 4,17
Riley (1981)	Oui	Oui	Loams et sols sableux et silteux	1,83 – 4,62
de Jong (1983)	Oui	Oui	Loam argileux	0,32 – 6,69
Beke and MacCormick (1985)	Non	Oui	Mélange sable, limon et argile	0,1 – 4,9
Danalatos <i>et al.</i> (1994)	Non	Non	Argiles et loams	0,2 – 2,9
Bell and Keulen (1995)	Non	Oui	Mélange sable, silt et argile	10,4 – 31,8
Danalatos <i>et al.</i> (1994)	Oui	Oui	Loam sableux à argile lourde	0 – 3,5
Danalatos <i>et al.</i> (1994)	Oui	Oui	Loams silteux	0,36 – 26,3
Ankenbauer and Loheide (2017)	Oui	Oui	Loam limoneux, loam sableux ou loam	3 – 17 %
Danalatos <i>et al.</i> (1994)	Oui	Oui	Sable argileux	2,0 – 9,8
Danalatos <i>et al.</i> (1994)	Oui	Oui	Kaolinite	0 – 75

2.6.3 Influence de la matière organique sur la conductivité hydraulique des sols

La MO exerce une influence notable sur les propriétés physiques des sols et sur la conductivité hydraulique en particulier. De nombreuses études ont été réalisées dans le contexte agricole en utilisant de nombreux amendements minéraux et organiques pour améliorer les propriétés physiques et chimiques des sols présentant des problèmes pour la croissance des plantes.

Des études ont été menées afin de déterminer les effets des mélanges sols - MO sur les propriétés hydrauliques initiales des sols. Dans leurs études, Mathers and Stewart (1984) ont suggéré une augmentation significative de la k_{sat} lorsque la teneur en MO (fumier et engrais) est élevée dans les

loam argileux des terres cultivées. Zebarth *et al.* (1999) à leur tour, ont apporté des amendements de MO (composés de déchets organiques accumulés pendant 4 années) aux sols sableux et ont constaté que les k_{sat} de ces sols restent élevées, donc indépendantes des amendements (teneurs de 0,48 à 3,11 %). Cette observation peut être expliquée par la porosité assez élevée du sol au départ. Eusufzai and Fujii (2012) ont rapporté que l'application de compost, de paille de riz et de sciure de bois aux loams argileux augmente la k_{sat} de ces derniers (Figure 2.19). Cela à cause de l'augmentation de l'agrégation et de la macroporosité du sol. Dans une étude similaire El Halim and El Baroudy (2014), ont conclu que des teneurs en sciure de bois fine et fraîche ont entraîné une augmentation de la k_{sat} des loams argileux. Elle se traduit par une augmentation considérable de la k_{sat} à une teneur de 15 % de MO. Nayak *et al.* (2017) ont étudié les effets de la MO initiale sur les propriétés hydrauliques de trois sols (loam argileux, loam sableux et loam argilo-silteux) et ont enregistré une augmentation de la k_{sat} , avec une valeur maximale constatée dans les loam sableux et celle minimale dans les loams argileux. Par ailleurs, Demir and Dogan Demir (2019) ont observé qu'une application de doses croissante de MO, diminue la k_{sat} des sols sableux avec une plus importante réduction constatée pour un amendement de 8 % de MO.

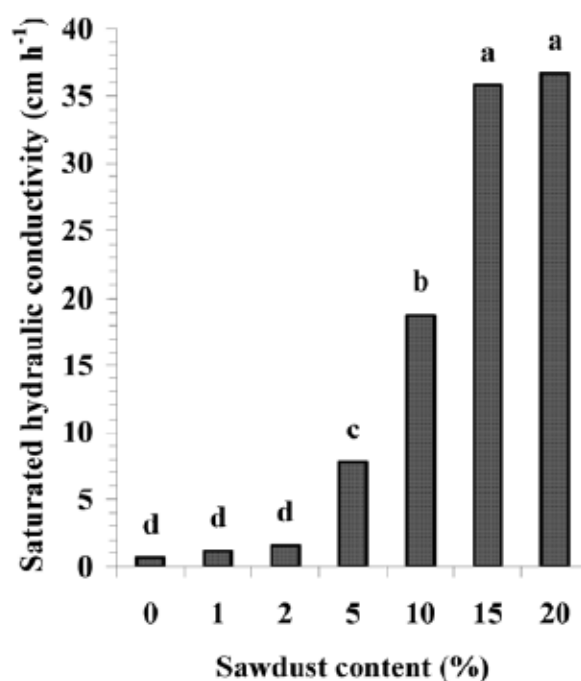


Figure 2.19 Variation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) en fonction de la teneur en sciure de bois.

2.6.4 Influence de la matière organique sur la distribution granulométrique des sols

Peu d'études sur l'impact de la MO sur la distribution granulométrique des sols par amendement direct ont été effectuées. Nous présenterons uniquement les travaux traitant de l'influence de l'élimination de la MO par utilisation du peroxyde d'hydrogène (à 30 et 35 °C), sur la granulométrie.

Les études sur les modifications de la distribution granulométrique des sols dues à l'élimination de la MO à l'aide de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) sont pour la plupart, décrites ou réalisées en contexte agricole. Kostopoulou and Panayiotopoulos (1993) ont révélé qu'une élimination ou oxydation de la MO entraîne une augmentation de la fraction argileuse pour trois alfisols. De même, Hereter *et al.* (2002) au cours de leurs travaux sur des terres arables, découvrent que la teneur en MO semble être la caractéristique du sol qui a le plus d'influence sur les résultats granulométriques. Cependant, cette influence est fonction de la teneur en MO. Lorsque les échantillons ont une faible teneur en MO (< 2 %), la granulométrie n'est pas impactée par la MO. Les travaux de Jensen *et al.* (2017) sur l'estimation des teneurs en argile et en silt des terres cultivées et arables, ont révélé que celles-ci sont affectées par la MO, du fait de leur sous et surestimation en présence de la MO. D'où la nécessité d'éliminer la MO avant l'estimation exacte des particules de sol < 20 µm. Selon Papuga *et al.* (2022), les différences observées dans la distribution granulométrique des sols avec et sans matière organique sont difficiles à prédire. Toutefois, ce n'est que dans les sols légers (contenant une fraction argileuse initiale < 10 %) qu'ils ont constaté que le processus d'élimination de la MO provoque une augmentation de la fraction argileuse et une diminution de la fraction limoneuse. Alors que dans les sols présentant une fraction argileuse initiale plus élevée (> 10 %), le processus d'élimination de la MO a entraîné une diminution des fractions argileuse et sableuse ainsi qu'une augmentation simultanée de la fraction limoneuse. Les auteurs estiment que ces différences sont dues premièrement au fait que la MO est minéralisée avec l'élimination de ses produits de décomposition, et deuxièmement du fait que le processus d'élimination de la MO a un effet sur les particules minérales associées à la MO.

2.6.5 Teneur de la matière organique dans le sol

La MO est un élément à prendre en compte puisque sa faible teneur dans les sols diminue la stabilité des agrégats et augmente la susceptibilité du sol au compactage et à l'érosion. En plus d'améliorer la capacité de rétention d'eau, elle joue le rôle de protection du sol, et qui est l'une des principales sources d'azote et d'éléments utiles aux plantes. Elle représente en général 1 à 10 % de la masse des sols. Les teneurs de MO du sol varient dans la littérature d'un type de sol à l'autre et d'une texture à l'autre. Le Tableau 2.7 présente en fonction du type de sol quelques teneurs de MO/carbone organique dans les sols selon des auteurs dans leurs différents travaux.

Tableau 2.7 Teneur de la matière organique du sol selon certains auteurs dans leurs travaux.

Auteurs	Type de sols	Teneurs
Lal (1979)	Sols nigériens (argiles et loams)	0,16 – 4,17 %
de Jong <i>et al.</i> (1982)	Sols des prairies canadiennes	0,32 – 6,69 %
Danalatos <i>et al.</i> (1994)	Sols de Grèce (loam sableux à loam)	0,2 – 2,94 %
Fernandez-Rueda Ma and Paz-Gonzalez (1998)	Sols de prairies et agricoles de deux régions d'Espagne	2,03 – 13 %
Yang <i>et al.</i> (2014)	Sols des prairies alpines (loam limoneux à loam) du Plateau du Qinghai-Tibétain	0,36 – 26,3 %
Ankenbauer and Loheide (2017)	Sols des prairies de Tuolumne (loam limoneux, loam sableux ou loam) au États unis	3 – 17 %
Tassinari <i>et al.</i> (2022)	Sols des tourbières de montagne au Brésil (sols sableux)	15 – 69,9 %

De plus Tabi (1991) dans son étude présente les niveaux de matière organique pour différentes textures de sol abitibien. La texture lourde correspond aux sols qui ont une teneur en argile égale ou supérieure à celle du loam argileux (Tableau 2.8).

Tableau 2.8 Niveaux de matière organique du sol selon la texture.

Niveau	Texture légère	Texture lourde
Très pauvre	0 – 2 %	0 – 2 %
Pauvre	2,1 – 3,5 %	2,1 – 4,5 %
Moyen	3,6 – 6,5 %	4,6 – 10 %
Riche	6,6 – 8 %	10,1 – 13 %
Très riche	8% et plus	13% et plus

Rompré and Carrier (1997) dans leurs travaux répertorient les sols de l'Abitibi et du Témiscamingue et certaines de leurs propriétés à partir des dépôts de loams aux dépôts d'argiles et d'argiles limoneuses en passant par les dépôts d'argiles lourdes et de sables et loams sableux (Tableau 2.9).

Tableau 2.9 Synthèse de la proportion en carbone organique dans les sols de l'Abitibi et du Témiscamingue (Rompré & Carrier, 1997).

Abitibi	
<i>Matériau</i>	<i>Teneur du carbone organique (%)</i>
Loams et loams limoneux argileux minces	1,67 – 6,36
Loams et loams limoneux argileux profonds	2,96 – 8,30
Argiles lourdes	0,59 – 14,82
Argiles et argiles limoneuses	0,83 – 22,93
Témiscamingue	
<i>Matériau</i>	<i>Teneur du carbone organique (%)</i>
Sables et loams sableux minces	1,89 – 3,79
Sables et loams sableux profonds	1,59 – 3,12
Loams et loams limoneux argileux minces	1,77 – 5,90
Loams et loams limoneux argileux profonds	1,77 – 3,29
Argiles lourdes	1,94 – 13,53
Argiles et argiles limoneuses	2,70 – 2,88

La teneur en MO détermine si un sol organique est classé comme un sol légèrement organique (3-20 % de teneur MO), un sol organique (20-75 % de teneur MO) ou une tourbe (plus de 75 % de teneur MO) (Zulkifley *et al.*, 2013). La tourbe se distingue d'autres MO du sol par sa faible teneur en cendres (moins de 25 %).

2.7 Généralité sur les tourbières

Une tourbière est une zone constamment humide (saturée en eau) et caractérisée par la présence de la tourbe qui a une forte teneur en matière organique, peu ou pas décomposée. Selon Huat *et al.* (2011), la tourbe peut être définie comme l'accumulation de matériaux organiques purs, contenant au moins 65 % de matière organique et moins de 35 % de minéraux; tandis que d'après Kazemian (2017), la tourbe est un sol organique contenant plus de 75 % de matière organique. Seulement, les tourbières ne couvrent que 3 % de la surface terrestre et contiennent 30 % du carbone organique des sols de la planète. Tarnocai *et al.* (1995) précisent que 12 % de la surface terrestre du Canada dont une partie de la région Boréale est couverte par les tourbes.

2.7.1 Les types de tourbières

La structure de la tourbe va de la fibrique à la saprique en passant par la mésique ; et les proportions relatives de carbone (C), d'azote (N), d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) varient en fonction de la composition botanique et du degré de décomposition (Zaccone *et al.*, 2015). Les tourbières sont caractérisées ou différenciées par le type de matière organique. von Post (1922) a proposé une échelle de classification et qui repose sur des facteurs comme la composition botanique, le degré d'humification et la couleur de l'eau de la tourbe à la suite d'un pressage. Dans cette classification, il existe 10 degrés de décomposition allant de H_1 (très fibreux) à H_{10} (très peu fibreux), qui représentent l'état de décomposition des résidus végétaux accumulés. De plus, Huat *et al.* (2011) ont suggéré que les tourbes proches de la surface appartiennent à la catégorie H_3 et H_4 , mais au fur et à mesure que la profondeur augmente, elles sont classées dans les catégories H_5 à H_7 .

Pour l'ASTM (1992), la classification précédente peut être ramenée à trois catégories basées sur la teneur en fibres et en cendres, et l'acidité du sol. Les trois catégories sont réparties en, (i) fibrique ou fibreuse (le moins décomposé avec plus de 67 % de fibres), (ii) mésique ou semi-fibreuse (décomposition intermédiaire), et (iii) saprique ou amorphe ou encore humus (la plus décomposée avec moins de 33 % de fibres). Du point de vue de la teneur en fibres uniquement, les catégories

H_1 à H_3 contenant plus de 67 % de fibres sont appelées tourbes fibreuses. Les tourbes mésiques correspondent aux catégories H_4 à H_6 et se composent de 33 à 67 % de fibres. Les trois dernières catégories, H_7 à H_{10} , contenant moins de 33% de fibres sont des tourbes sapriques (von Post, 1922; ASTM, 1992).

2.7.2 Propriétés hydrauliques des tourbières

De façon générale, les propriétés hydrauliques les plus importantes des sols sont la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) et non saturée $k(\psi)$ et la courbe de rétention d'eau (CRE). Concernant les mesures de la k_{sat} et de la CRE des tourbes, plusieurs études ont été réalisées à l'aide de différentes méthodes de laboratoire et de terrain.

2.7.2.1 Facteurs dont dépendent ces propriétés

Les propriétés hydrauliques des tourbières dépendent du degré d'humification (décomposition) de la matière organique, de la proportion en fibres, de la teneur en minéraux et en matière organique, de la porosité, de la densité apparente, et même de la profondeur (Boelter, 1968; Päivänen, 1973; Bradley, 1996; Letts *et al.*, 2000; Huat *et al.*, 2011; José Ricardo da Rocha *et al.*, 2011; Rezanezhad *et al.*, 2016; Menberu *et al.*, 2021). La porosité est un facteur essentiel pour la caractérisation des propriétés hydrauliques des sols et en particulier des tourbes. La porosité totale de ces tourbes est élevée, allant jusqu'à 96 % pour celles non décomposées, et à environ 90 % pour celles hautement décomposées. Pourtant, celle dans les sols minéraux est beaucoup plus faible, variant entre 30 et 65 % (Szajdak *et al.*, 2011). Cependant, l'humification entraîne une réduction des macropores, mais une augmentation des micropores, ainsi qu'une augmentation de la densité apparente du sol. On note également une augmentation de l'humification en fonction de la profondeur.

2.7.2.2 Conductivité hydraulique des tourbières

Les tourbes non décomposées selon Szajdak *et al.* (2011) ont une conductivité hydraulique élevée, qui est de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-3} cm/s alors que les tourbes fortement décomposées ont une conductivité hydraulique autour de 10^{-6} cm/s. Les résultats des travaux indiquent une faible conductivité hydraulique dans les tourbes présentant une densité apparente élevée et une faible porosité (Lewis *et al.*, 2012). Hoag and Price (1995) et Bradley (1996) ont constaté également une diminution de la k_{sat} avec la profondeur. Toutefois, les efforts déployés pour estimer la k_{sat} des

tourbes à l'aide de différentes méthodes de terrains et de laboratoires ont abouti à une large gamme de valeurs de conductivité hydraulique saturée (Tableau 2.10).

Dans le Tableau 2.10, la k_{sat} qui varie de 10^{-8} à 10^{-1} cm/s pour les tourbes, or pour l'argile et l'argile silteuse, la k_{sat} est de 10^{-9} à 10^{-4} cm/s (Robitaille & Tremblay, 1997). Les auteurs font état du fait que les sols tourbeux présentent une gamme de k_{sat} plus large que celle des sols minéraux à texture fine. Partant de ce qui précède, on constate que la k_{sat} diminue avec le degré de décomposition, la densité apparente et la profondeur. En revanche, la capacité de rétention augmente avec les mêmes facteurs. Ceci se traduit par le fait que la décomposition diminue la taille des pores et la proportion en fibres, mais augmente la densité apparente et permet ainsi une meilleure rétention.

Tableau 2.10 Valeurs de la k_{sat} de certaines études sélectionnées dans diverses tourbières.

<i>Pays</i>	<i>Type de Tourbes</i>	<i>Profondeur (cm)</i>	k_{sat} (cm/s)	<i>Références</i>
Angleterre	Fen (Carex)	5 – 90	$1 \times 10^{-6} - 1,6 \times 10^{-5}$	SurrIDGE <i>et al.</i> (2005)
Canada	Couverture	30	$1,74 \times 10^{-4}$	SchlOTZHauer and Price (1999)
Canada	Couverture de Sphaigne	15 – 20	$2,8 \times 10^{-2}$	Hoag and Price (1995)
		50	$5,5 \times 10^{-8}$	
Pologne	Carex	40 – 90	$5,6 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$	Gnatowski <i>et al.</i> (2010)
Canada	Couverture (H92)	5 – 100	$10^{-7} - 10^{-4}$	Kennedy and Price (2005)
Écosse	Bog (Sphaigne)	100 – 700	$1 \times 10^{-6} - 1,2 \times 10^{-5}$	Clymo (2004)
É.U	Sphaigne	15 – 25	$3,81 \times 10^{-2}$	Boelter (1968)
	Boisée décomposée	60 – 70	$5,58 \times 10^{-4}$	
	Bien décomposé	50 – 60	$0,45 \times 10^{-5}$	
Canada	Carex boréale	0 – 200	$1 \times 10^{-6} - 9 \times 10^{-1}$	Hogan <i>et al.</i> (2006)
Irlande	Couverture de Sphaigne	10 – 20 et 30 – 40	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Lewis <i>et al.</i> (2012)
Allemagne	Sphaigne vierge	10 – 20	$8,5 \times 10^{-5} - 5,5 \times 10^{-3}$	Wang <i>et al.</i> (2021)
	Carex humifiée		$7,6 \times 10^{-6} - 9,3 \times 10^{-3}$	
Angleterre	Herbacée	70	$1,16 \times 10^{-3} - 4,63 \times 10^{-2}$	Bradley (1996)
	Boisée		$1,16 \times 10^{-4}$	
Finlande	Sphaigne	25 – 45	$0,58 \times 10^{-3} - 3,05 \times 10^{-3}$	Paivänen (1973)
	Carex		$0,17 \times 10^{-3} - 1,75 \times 10^{-3}$	
	Boisée		$1,42 \times 10^{-3} - 3,32 \times 10^{-3}$	

2.7.2.3 Courbe de rétention d'eau des tourbières

Selon Boelter (1968), la rétention d'eau est plus forte dans les tourbes décomposées que dans celles non décomposées. Comme on peut le constater sur la Figure 2.20, la teneur en eau des sols tourbeux est communément supérieure à celle des sols minéraux pour des valeurs de succion matricielle faibles. De même, pour de fortes valeurs de succion, les sols minéraux grossiers se désaturent plus rapidement que les tourbes, alors que la capacité de rétention d'eau de l'argile est progressivement plus grande que celle des mêmes tourbes. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'une grande quantité de micropores dans les tourbes, comparée aux argiles. Toutefois, les tourbes légèrement décomposées libèrent l'eau un peu plus lentement que celles non décomposées, lorsque la succion augmente (Szajdak *et al.*, 2011). Wang *et al.* (2021) indiquent que la tourbe vierge a des valeurs d'entrée dans l'air plus faibles et une courbe de rétention plus raide que les tourbes humifiées à extrêmement humifiées. Cela s'explique par le fait que la teneur en eau dans les sols tourbeux dépend du degré de décomposition et de la composition des résidus végétaux accumulés.

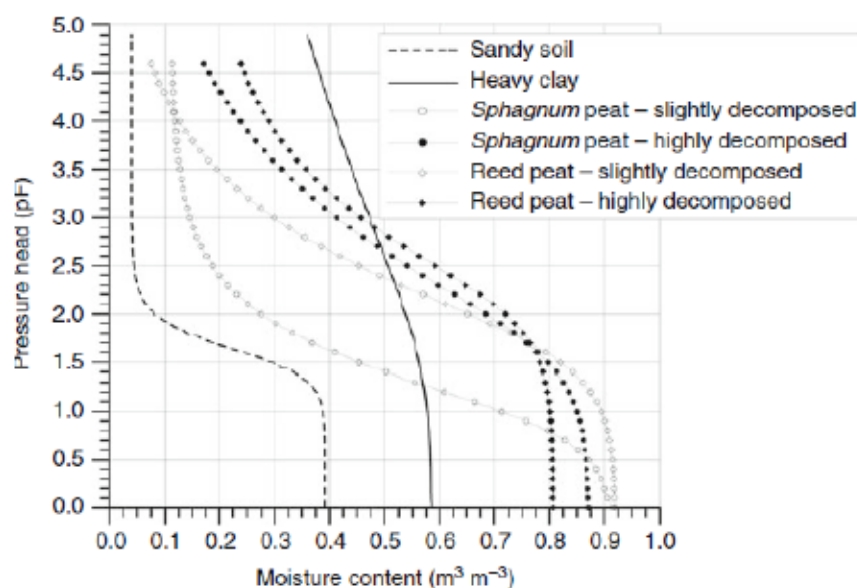


Figure 2.20 Courbes de rétention d'eau pour différents sols tourbeux et minéraux (tirée de Szajdak *et al.*, 2011).

2.7.3 Tests au Laboratoire pour la mesure de la k_{sat} et de la CRE

Les interprétations et applications des observations faites sur la k_{sat} et la CRE des tourbes sont complexes à cause de la multitude de méthodes de laboratoire utilisées.

2.7.3.1 Mesure de la k_{sat}

La k_{sat} est l'une des propriétés des sols les plus importantes à déterminer lors de la conception d'ouvrages d'ingénierie. Elle décrit la capacité d'un sol saturé à conduire l'eau. En ce qui concerne les tourbes, il existe des techniques spécifiques utilisées au laboratoire pour les mesurer (Tableau 2.11).

Tableau 2.11 Méthodes de laboratoires utilisées pour la détermination de la k_{sat} .

Propriété	Méthodes
k_{sat}	Perméamètre à charge constante (à parois rigides)
	Méthode ascendante à charge constante (Kruse <i>et al.</i> , 2008)
	Méthode du cube modifié (MCM) (Beckwith <i>et al.</i> , 2003)
	Cuve expérimentale (Rosa & Larocque, 2008)

On procédera à une explication détaillée de la méthode ascendante à charge constante, du cube modifié (MCM) et de la cuve expérimentale, compte tenu de leur spécificité aux tourbes.

- Méthode ascendante à charge constante (Figure 2.21)

Au laboratoire, l'échantillon prélevé grâce à un tuyau en PVC est délicatement retiré (en évitant de le remanier). Cette carotte de tourbe est par la suite taillée sous forme d'un cube ($9 \times 9 \times 9$ cm) et placé dans un moule ($11 \times 11 \times 13$ cm) puis le cube d'échantillon est revêtu avec de la résine de polyester. Ensuite il faut s'assurer d'avoir deux faces du cube d'échantillon exposées à l'air. Maintenant, coller un adaptateur sur la face supérieure exposée du cube pour assurer une connexion étanche à l'eau et à la pression (à l'aide d'un tube capillaire) avec l'appareil de mesure. Puis placer à la face inférieure une toile de tamisage. Enfin, le cube d'échantillon de tourbe est saturé lentement à partir du bas pendant au moins 12 heures dans une cuve.

Pour la mesure de la k_{sat} , il faut s'assurer de réguler le gradient hydraulique à un débit assez faible soit environ une goutte par seconde. Le niveau d'eau dans la cuve est maintenu constant à une hauteur (H) au moyen d'une bouteille de Mariotte. La k_{sat} est déterminée à partir de la loi de Darcy :

$$k_{sat} = \frac{V_w}{t} \times \frac{L}{A \cdot \Delta H} \quad (2.51)$$

où V_w est le volume d'eau percolé (m^3), A est la surface du cube d'échantillon (m^2), ΔH est la différence de charge hydraulique (m), L est la hauteur de l'échantillon (m), et t est la durée de la mesure (j).

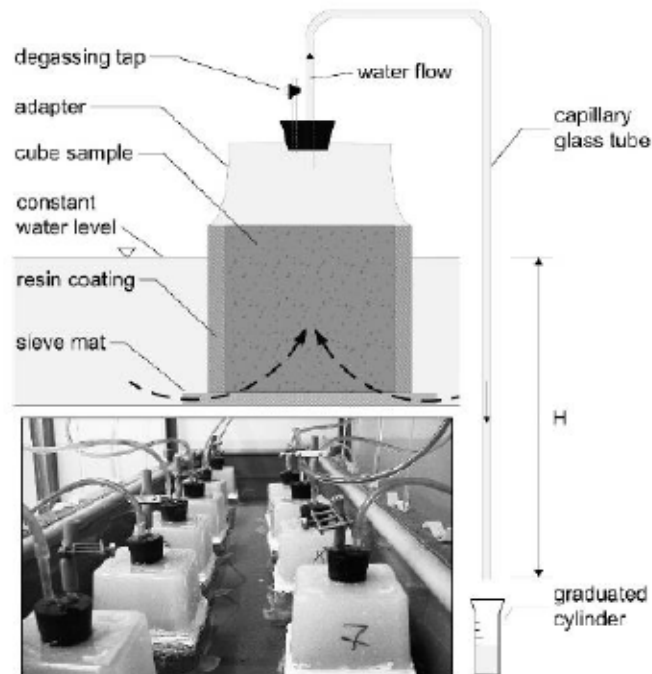


Figure 2.21 Dispositif expérimental pour la détermination de la k_{sat} avec la méthode ascendante, à charge constante.

- Méthode du cube modifié (MCM) (Figure 2.22)

Une fois la carotte dans le laboratoire et l'échantillon de tourbe délicatement extrait du tuyau en PVC, ce dernier est coupé en un cube ($7,5 \times 7,5 \times 7,5$ cm). Ensuite, verser complètement un coulis de gypse sur les côtés et procéder à la libération (exposition) de deux faces opposées. Le cube est par la suite saturé lentement (1 à 2 h) de bas en haut à l'aide de l'eau désionisée. Une fois saturé, le cube est placé sur un entonnoir et relié à un cylindre de mesure.

Pour mesurer la k_{sat} , l'eau est d'abord accumulée à une faible profondeur au sommet d'une face exposée pour créer un gradient hydraulique proche de l'unité. Lorsque le débit est devenu régulier, la k_{sat} a été calculée en utilisant la loi de Darcy.



Figure 2.22 La méthode du cube modifié et le dispositif expérimental pour la détermination de la k_{sat} .

- Méthode de la cuve expérimentale (Figure 2.23)

La cuve expérimentale de 60 cm de longueur, 25 cm de largeur et 40 cm de hauteur est construite avec des panneaux acryliques transparents de 4 mm d'épaisseur. Les extrémités amont et aval de la cuve sont équipés de déversoirs à hauteur variable et d'un support de base réglable, ce qui permet d'effectuer des mesures de k_{sat} avec différents niveaux d'eau et gradients hydrauliques. Une lampe au néon fixée à 30 cm au-dessus du réservoir fournit de la lumière 12 h par jour.

La cuve est lentement remplie d'eau du robinet à partir du fond et l'échantillon est laissé à saturation pendant 48 heures. Ensuite il faut établir un gradient hydraulique longitudinal en ajustant les hauteurs du support de base et des débordements (le gradient hydraulique transversal est nul). Une fois le gradient stable, la conductivité hydraulique des couches de tourbe est calculée en utilisant la loi de Darcy (équation).

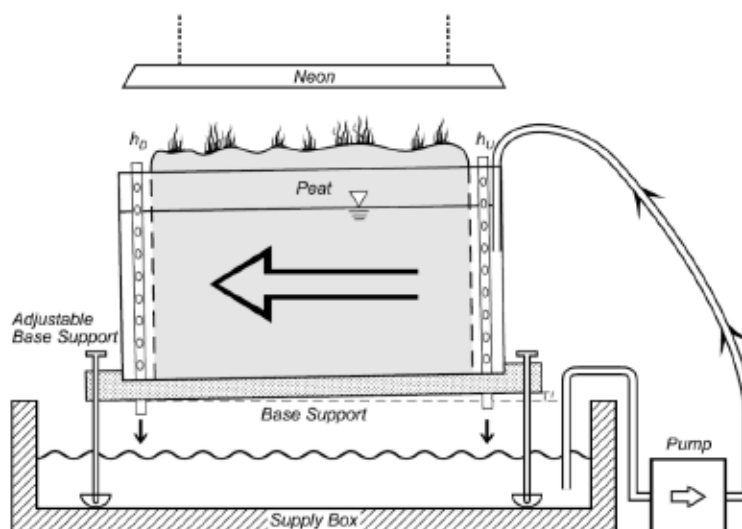


Figure 2.23 Cuve expérimentale de laboratoire construite pour les mesures de conductivité hydraulique de l'acrotelme.

2.7.3.2 Mesure de la CRE

La CRE est une propriété hydraulique très importante qui permet la caractérisation des sols dans les conditions non saturées. Sa détermination sur le terrain ou au laboratoire est d'une importance capitale pour l'estimation de la $k(\psi)$ qui est quant à elle très dispendieuse. Les techniques de mesures de la CRE des tourbes sont également celles utilisées pour les sols minéraux et sont fonction de la succion désirée (Tableau 2.12).

Tableau 2.12 Méthodes de laboratoires utilisées pour la détermination de la CRE.

<i>Propriété</i>	<i>Méthodes</i>
CRE	Boite à sable ou table à tension (pour des succions allant jusqu'à 13 kPa)
	Cellules de pression (pour des succions allant jusqu'à 1 500 kPa)
	Plaques de pression (succion maximale, 10 000 kPa)
	Membrane de pression (succion maximale, 10 000 kPa)

2.7.3.3 Modèles d'ajustement et de prédiction utilisés

Des travaux concernant des modèles prédictifs utilisés sur les sols tourbeux ne sont pas pour le moment bien documentés. Cependant, on constate une bonne documentation sur l'utilisation de quelques modèles d'ajustement pour les cas de la CRE et pour la $k(\psi)$ des sols tourbeux. Les différents modèles d'ajustement consistent à faire varier les paramètres d'ajustement ou de forme

(α , m et n) de leurs équations respectives (Tableau 2.13), pour ajuster les données mesurées sur le terrain et au laboratoire à celles des modèles de la CRE. À cet effet, certains travaux avec les modèles de van Genuchten (1980) - Mualem (1976) et de van Genuchten (1980), ont permis de déterminer les paramètres d'ajustement de la CRE et de prédire la $k(\psi)$ des Sphaignes et Carex. Selon les résultats, ces modèles unimodaux sont relativement bons pour décrire la dynamique des propriétés hydraulique des sols tourbeux, plus particulièrement dans des conditions de laboratoire (Gnatowski *et al.*, 2010; Dettmann *et al.*, 2014; Dettmann & Bechtold, 2016; Menberu *et al.*, 2021). Néanmoins, partant du fait que la porosité est l'un des paramètres les plus importants de ces différents modèles et que les sols tourbeux sont reconnus pour avoir une porosité multiple, il est évident qu'ils sont précisément plus estimables grâce aux modèles multiples (bimodaux ou trimodaux) (Figure 2.24). Durner (1994) a construit son modèle bimodal à partir d'une superposition linéaire de deux sous-courbes (unimodales) du modèle de van Genuchten et obtenir de bons résultats. Il conclut que le modèle de van Genuchten original est inadéquat pour les sols ayant des systèmes de pores hétérogènes. Weber *et al.* (2017a); Weber *et al.* (2017b) ont utilisé les modèles multiples de Peters (2013); (Peters, 2014); Iden and Durner (2014) (PDI) et de Durner (1994) et ont relevé qu'ils sont nécessaires pour décrire pleinement les CRE et $k(\psi)$ de types de tourbe spécifiques, comme la sphaigne vivante (non décomposée).

Tableau 2.13 Récapitulatif des équations des modèles d'ajustement des propriétés hydrauliques des tourbes.

<i>Équations du modèle</i>	<i>Paramètres</i>
van Genuchten (1980)	
$\theta_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha_{vG}\psi)^{n_{vG}}} \right]^{m_{vG}}$ <p style="text-align: center;">(2.52)</p>	$\alpha_{vG} \cong 1/AEV [L^{-1}]$; m_{vG} est souvent données par les équations : - $m_{vG} = 1 - 1/n_{vG}$ - $m_{vG} = 1 - 2/n_{vG}$
van Genuchten - Mualem (1980)	
$k(\theta) = k_{sat} \cdot k_{rel}(\theta) = k_{sat} \theta_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - \theta_e^{1/m_{vG}} \right)^{m_{vG}} \right]^2$ <p style="text-align: center;">(2.53)</p>	$m_{vG} = 1 - 1/n_{vG}$

Tableau 2.13 Récapitulatif des équations des modèles d'ajustement des propriétés hydrauliques des tourbes.(suite)

Équations du modèle	Paramètres
Durner (1994)	
$S_{re} = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i \psi)^{n_i}} \right]^{m_i}$ <p style="text-align: center;">(2.54)</p>	<p>S_{re} est le degré de saturation effectif ou réduit ;</p> <p>$m_i = 1 - 1/n_i$</p> <p>k est le nombre de « sous-systèmes » qui forment la distribution totale de la taille des pores, et w_i sont des facteurs de pondération pour les sous-courbes, sous réserve de $0 < w_i < 1$ et $\sum w_i = 1$.</p>
(Peters, 2013, 2014; Iden & Durner, 2014)	
$\theta(\psi) = (\theta_s + \theta_r)S_c(\psi) + \theta_r S_a(\psi)$ <p style="text-align: center;">(2.55)</p> $S_c(\psi) = \frac{\Gamma(\psi) - \Gamma(\psi_0)}{1 - \Gamma(\psi_0)}$ <p style="text-align: center;">(2.56)</p> $S_a(\psi) = 1 + \frac{1}{x_a - x_0} \left\{ x - x_a + b \ln \left[1 + \exp \left(\frac{x_a - x}{b} \right) \right] \right\}$ <p style="text-align: center;">(2.57)</p> $k(\psi) = (1 - \omega)k_{sat}k_{relc}(S_c) + \omega k_{sat}k_{rela}(S_a) + k_e(\psi)$ <p style="text-align: center;">(2.58)</p> $k_{relc}(S_c) = S_c^r \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i (1 - \Gamma_i(\psi))^{1/m_i}}{\sum_{i=1}^k w_i \alpha_i (1 - \Gamma_i(\psi_0))^{1/m_i}} \right)^{m_i} \right]^2$ <p style="text-align: center;">(2.59)</p>	<p>$S_c(\psi)$ et $S_a(\psi)$ sont respectivement les saturations relative de l'eau capillaire et adsorbée ;</p> <p>$k_{relc}(\psi)$ et $k_{rela}(\psi)$ sont respectivement les conductivités hydrauliques relatives capillaires et d'adsorption et $k_e(\psi)$ est la conductivité hydraulique effective pour la diffusion isotherme de la vapeur ;</p> <p>ω est la proportion relative des fines pellicules d'eau adsorbée ;</p>

Tableau 2.13 Récapitulatif des équations des modèles d'ajustement des propriétés hydrauliques des tourbes.(suite)

<i>Équations du modèle</i>	<i>Paramètres</i>
(Peters, 2013, 2014; Iden & Durner, 2014)	
$k_{rela}(S_a) = \left(\frac{\psi_0}{\psi_a}\right)^{a(1-S_a)}$ <p style="text-align: center;">(2.60)</p> $\Gamma(\psi) = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n}\right]^m$ <p style="text-align: center;">(2.61)</p>	<p>a est la pente sur l'échelle log-log ;</p> <p>τ est le facteur de tortuosité ;</p> <p>b est un paramètre de lissage ;</p> <p>$\Gamma(\psi)$, la fonction de saturation capillaire.</p>

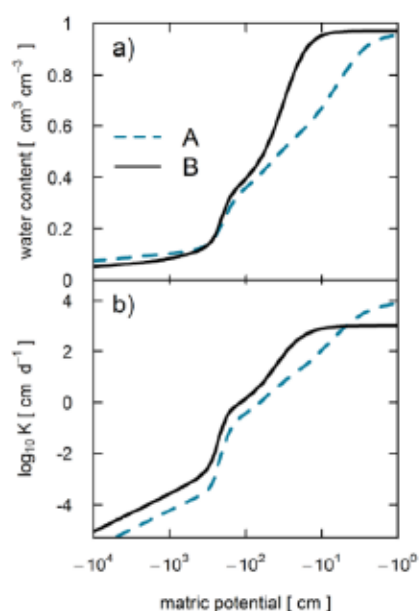


Figure 2.24 Courbe de rétention d'eau (a) et Courbe de conductivité hydraulique (b) des échantillons A (Mousse de sphaigne vivante) et B (tourbe décomposée) (Tirée de Weber et al., 2017a).

CHAPITRE 3 APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES

La méthodologie générale pour atteindre l'objectif de ce travail de recherche consiste à réaliser les travaux suivants (Figure 3.1) :

- Caractérisation physique (densité relative et distribution granulométrique, quantité de fibre, teneur en matière organique), chimique (ICP-AES) et minéralogique (DRX) des matériaux à l'étude incluant les mélanges avec les différentes proportions de matière organique;
- Évaluation des propriétés hydrogéotechniques des matériaux et des mélanges (courbes de rétention d'eau et conductivité hydraulique saturée);
- Élaboration du modèle de prédiction des CRE des matériaux avec différentes teneurs en matière organique en se basant sur les analyses statistiques.

Ce chapitre présente les caractérisations des matériaux de base et de la tourbe, la préparation des mélanges au laboratoire ainsi que la méthodologie des essais réalisés sur les différents matériaux de base et les mélanges. Les équipements, leur principe de fonctionnement de même que les normes et les procédures à suivre pour la réalisation des essais au laboratoire, y sont décrits. Les essais ont été réalisés au laboratoire de l'URSTM à une température $22\text{ °C} \pm 0,5$.

L'organigramme à la figure 3.1, propose la méthodologie des travaux retenues dans le cadre de ce projet de recherche.

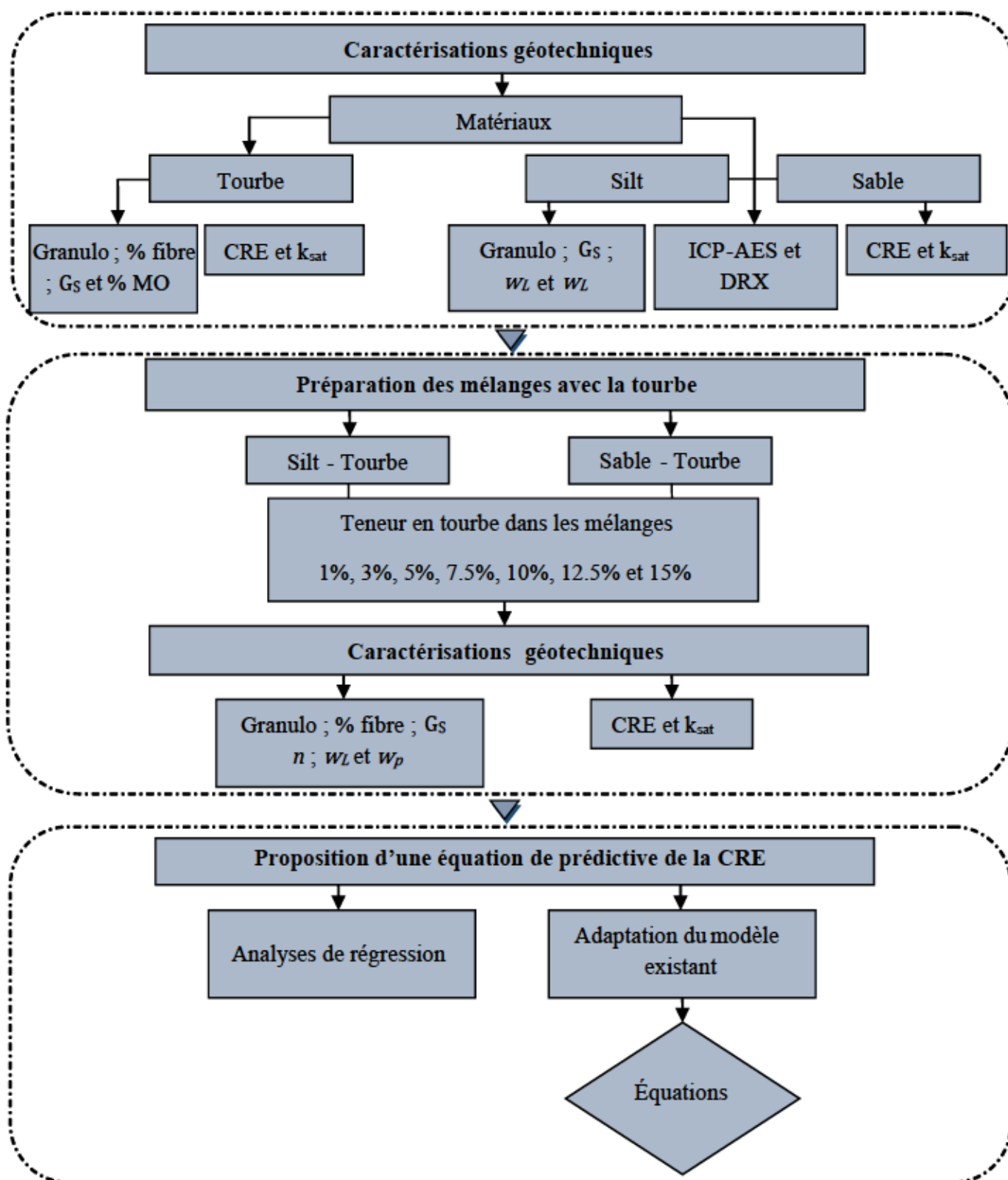


Figure 3.1 Organigramme de la méthodologie de l'étude.

3.1 Matériaux utilisés

Pour cette étude, les matériaux de bases utilisés sont le sable et le silt (Figure 3.2), à partir desquels des mélanges ont été préparés en rajoutant des amendements de tourbes à différentes proportions.

Le sable et le silt proviennent de la sablière Ansil d'Agrégat Rouyn-Noranda et ont été fournis par la fonderie Horne, tandis que la tourbe a été prise sur le marché (Canadian Tire).



Figure 3.2 Matériaux utilisés pour les caractérisations et les essais.

Les matériaux de base (sable et silt) ont été homogénéisés par quartage au laboratoire selon la norme ASTM C702 (1998) et conditionnés dans des chaudières. Par la suite, ils ont été séchés à l'étuve à $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ pendant plusieurs jours jusqu'à l'obtention d'une masse constante pour la détermination de la teneur en eau massique initiale (w). Le Tableau 3.1 présente un résumé des valeurs des teneurs en eau massique de nos échantillons.

Tableau 3.1 Teneurs en eau massiques des matériaux de base et de la tourbe.

Matériaux	Teneurs en eau massiques (%)
Sable	2 - 3
Silt	16 - 18
Tourbe	60 - 62

Après avoir été retirés de l'étuve, les échantillons de silt sont désagglomérés à l'aide d'un rouleau à pâtisserie de laboratoire en inox. Ensuite des prélèvements représentatifs d'environ 100 g de silt et 900 g de sable homogénéisés et séchés ont été faits pour réaliser les caractérisations physiques,

chimiques et minéralogiques. Ces caractérisations ont été réalisées avant la détermination des propriétés hydrogéotechniques (la tourbe, des matériaux de base et des différents mélanges avec tourbe).

3.2 Caractérisation géotechnique des matériaux de base et de la tourbe

3.2.1 Préparation des mélanges

Les mélanges ont été faits sur la base des pourcentages massiques de chaque matériau et de la tourbe. L'objectif était d'amender les matériaux de base (sable et silt) avec sept dosages massiques variables de tourbe (1 %, 3 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % et 15 %). Une fois les différentes masses d'échantillons connues, le tout est mélangé et méticuleusement homogénéisé à l'aide d'une spatule de laboratoire en une vingtaine de renversements complets dans une cuvette.

3.2.2 Densité relative des grains solides

La densité relative des grains solides (G_s ou D_r) peut être définie comme le rapport entre le poids spécifique des grains solides et le poids spécifique de l'eau. La Figure 3.3 présente le Pycnomètre à hélium Ultrapyc 1200e, Quantachrome utilisé pour déterminer la densité relative des matériaux de base et des mélanges (avec une erreur de l'ordre $\pm 0,01$ %), selon la norme ASTM D5550-14. Le pycnomètre permet d'analyser les masses d'échantillons comprises entre 10 g et 150 g et les résultats sont donnés avec une précision de 0,2. Le silt a été analysé tel quel, mais le sable a été tamisé et c'est la proportion de tailles fines ($< 80 \mu m$) qui a été analysée au pycnomètre. Les résultats sont les moyennes de trois (3) mesures les plus proches (Tableau 3.2). Il faudra toutefois noter que ce Pycnomètre à hélium effectue au total douze (12) mesures.



Figure 3.3 Pycnomètre à hélium Ultrapyc 1200e de Quantachrome Instruments.

Tableau 3.2 Densité relative des matériaux de base et de la tourbe.

Matériaux	Sable	Silt	Tourbe (To)
G_s	2,79	2,72	1,60

De ces valeurs, on constate que le sable a la valeur la plus élevée de G_s et la tourbe la plus faible. Dans le Tableau 3.3 sont regroupés les résultats de la détermination de la densité relative (G_s) des différents mélanges, obtenus par calcul en employant la relation suivante (Belem (2022) - note de cours sur les remblais miniers) :

$$G_{s\text{Mélange}} = \left(\frac{\%x_{\text{Matériau}}}{G_{s\text{Matériau}}} + \frac{\%x_{\text{Tourbe}}}{G_{s\text{Tourbe}}} \right)^{-1} \quad (3.1)$$

où $\%x_{\text{Matériau}}$ est la teneur de sable ou silt, $\%x_{\text{Tourbe}}$ est la teneur de tourbe dans les mélanges; $G_{s\text{Matériau}}$ et $G_{s\text{Tourbe}}$ sont respectivement la densité relative du sable ou du silt et de la tourbe.

Tableau 3.3 Densité relative des mélanges sable-tourbe et silt-tourbe.

Mélanges	Densité relative des mélanges (G_s)						
	1% To	3% To	5% To	7,5% To	10% To	12,5% To	15% To
Sable-tourbe	2,77	2,73	2,69	2,64	2,60	2,55	2,51
Silt-tourbe	2,70	2,66	2,63	2,58	2,54	2,50	2,46

À la lecture des résultats présentés dans le Tableau 3.3, il en ressort que l'ajout de la tourbe réduit la densité relative du sable et du silt. Avec des valeurs de G_s variant de 2,77 à 2,51 et de 2,70 à 2,46, respectivement pour les mélanges du sable et du silt.

3.2.3 Limites d'Atterberg

La limite d'Atterberg ou la limite de consistance est utilisée pour définir la plasticité des échantillons à grains fins en fonction de la teneur en eau. Elle a été mesurée à l'aide du Pénétrömètre à cône suédois (Figure 3.5). Les limites d'Atterberg permettent de classer les échantillons en se basant sur les différentes teneurs en eau correspondantes aux passages d'un état ou d'une limite à l'autre (Liquide – plastique – semi-solide – solide) (Figure 3.4). Pour des besoins de classification, ces limites et indices sont les suivants (Tremblay & Robitaille, 2014) :

- Limite de liquidité (w_L) : à l'aide de la méthode du pénétromètre à cône suédois applicable aux fractions de grains de taille inférieure à 0,42 mm (tamis #40). L'essai consiste à déterminer la teneur en eau à laquelle une pénétration définie (selon ASTM D4318) est obtenue. Elle correspond à la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique et ne dépasse pas généralement 100 %;
- Limite de plasticité (w_P) : elle se définit comme la teneur en eau à laquelle un échantillon roulé en un cylindre de 3 mm de diamètre commence à se fragmenter en morceaux de 3 à 10 mm de longueur. Elle est également applicable aux grains de taille inférieure à 0,42 mm. Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide et varie entre 0 % et 100 % néanmoins elle demeure en général inférieure à 40 %;
- La limite de retrait (w_S) est la teneur en eau maximale qu'un sol peut atteindre sans toutefois changer de volume. Elle sépare l'état solide de l'état semi-solide;

• Les indices de plasticité (I_p), de liquidité (I_L) et de consistance (I_C) en fonction des différentes limites sont donnés par les formules respectives suivantes :

$$I_p = LL - PL = w_L - w_P \quad (3.2)$$

$$I_L = \frac{w\% - PL\%}{LL\% - PL\%} = \frac{w\% - PL\%}{I_p\%} \quad (3.3)$$

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{LL - w}{LL - PL} \quad (3.4)$$

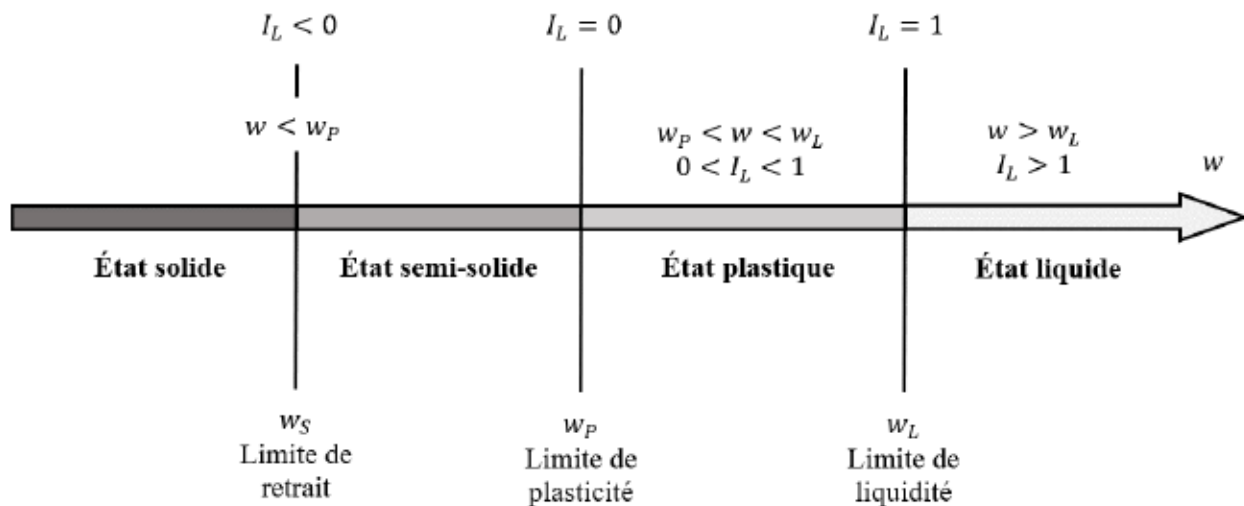


Figure 3.4 Différents états de consistances (adaptée de Tremblay & Robitaille 2014).

Le test pour la détermination de la w_L s'effectue par pénétration unique (au centre) reprise sur l'échantillon en faisant varier les teneurs en eau (par ajout d'eau) afin de couvrir une plage de pénétration comprise entre 7 et 15 mm. Sa valeur est estimée en utilisant l'équation de la droite de la teneur en eau en fonction de la pénétration du cône. De façon arbitraire la valeur de w_L est alors atteinte lorsque le cône s'enfonce de 10 mm dans l'échantillon.

Le test de mesure de la w_P est fait sur deux échantillons (duplicata) et la w_P est déterminée en calculant la moyenne arithmétique des deux teneurs en eau obtenues.

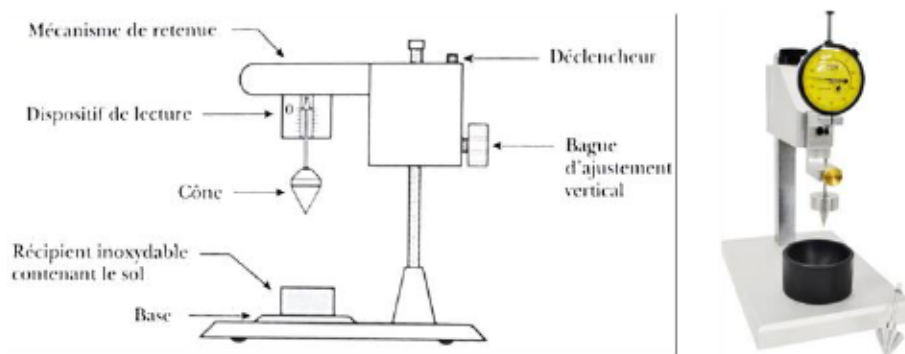


Figure 3.5 Pénétrömètre à cône suédois Tremblay & Robitaille (2014).

Les limites d'Atterberg ont été réalisées sur le silt et ses mélanges avec la tourbe. Pour ce faire, les mélanges ont été préalablement passés au tamis de diamètre $80 \mu m$ (N° 200). Ces limites sont utilisées dans le cas des matériaux à grains fins pour leur classification. Dans le Tableau 3.4, on peut trouver un résumé des caractéristiques qui permettent de classer le silt et ses différents mélanges.

Tableau 3.4 Paramètres des limites d'Atterberg du silt et ses mélanges.

	Mélange silt-tourbe			Classification
	WL (%)	WP (%)	IP (%)	USCS
Silt	19,03	12,85	6,18	CL-ML
99%Si + 1%To	21,63	16,88	5,44	CL-ML
97%Si + 3%To	22,59	17,66	4,92	CL-ML
95%Si + 5%To	23,93	18,72	5,21	CL-ML
92,5%Si + 7,5%To	27,25	20,30	6,95	CL-ML
90%Si + 10%To	28,57	21,59	6,98	CL-ML
87,5%Si + 12,5%To	33,19	24,20	8,59	ML-OL
85%Si + 15%To	34,97	26,73	8,25	ML-OL

Le constat à la lecture du Tableau 3.4 est que, les limites de liquidités et de plasticités augmentent avec la teneur en tourbe. Ce qui n'est pas totalement le cas pour l'indice de plasticité. Une fois les paramètres obtenus, ils sont placés sur le diagramme de plasticité (Figure 3.6) afin de les classer. Une fois, la limite de liquidité et l'indice portés dans le diagramme de plasticité, leur intersection en un point permet d'identifier le sol :

- Si le point est situé au-dessus de la ligne A, la fraction fine du sol est qualifiée d'argileuse ;
- La fraction fine du sol est considérée silteuse ou organique, quand le point de rencontre se trouve en dessous de la ligne A.

Le silt et ses mélanges de 1 à 10 % de tourbe sont classés en tant qu'argiles silteuses ou silts et sables argileux (CL-ML). Cependant, les mélanges de 12,5 et 15 % de tourbe sont des silts et argiles organiques ou sables fins silteux ou argileux (ML-OL).

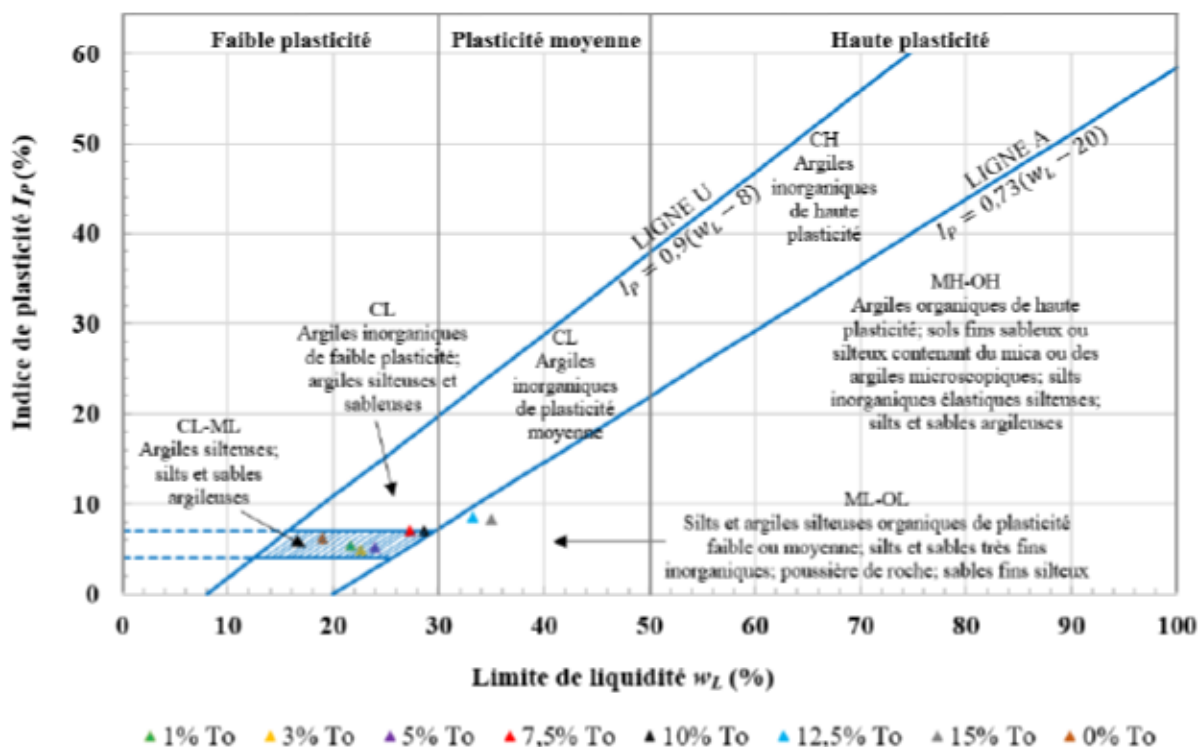


Figure 3.6 Diagramme de plasticité (adaptée de Tremblay and Robitaille (2014)).

3.2.4 Analyses granulométriques

L'analyse granulométrique d'un sol permet d'obtenir la courbe de distribution des particules en pourcentage en se servant des diamètres équivalents des particules. Cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage (particules grossières) que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes ou par granulométrie laser (particules fines). Les analyses granulométriques ont été effectuées en accord avec la norme ASTM D422.

3.2.4.1 Matériaux de bases et Tourbe

Le silt contient généralement des particules de taille fine ($< 75 \mu\text{m}$) et l'analyse granulométrique a été faite à l'aide du granulomètre laser MASTERSIZER 3000 de Malvern Panalytical par voie sèche du laboratoire de l'URSTM-UQAT (Figure 3.7a). Le MASTERSIZER 3000 est équipé d'une unité de dispersion par voie sèche ou par voie humide et utilise la technique de la diffraction laser (théorie de Fraunhofer & Mie de la diffraction de la lumière) pour mesurer la gamme de distribution des tailles allant de $0,01 \mu\text{m}$ à $3500 \mu\text{m}$ (10 nm à $3,5 \text{ mm}$), avec une précision de $\pm 2 \%$ pour le diamètre des particules.

Le sable, tout comme la tourbe, comporte une partie faite de grains de tailles fines ($< 80 \mu\text{m}$) à moyenne et une autre faite de particules grossières. La courbe granulométrique a été réalisée en deux étapes. Les échantillons ont été dans un premier temps tamisés grâce à une série de sept (7) tamis de diamètre allant de 5 mm (N° 4) à $80 \mu\text{m}$ (N° 200) (Figure 3.7b). Dans un second temps, la proportion fine recueillie dans l'assiette de fond, renfermant des particules de taille $< 80 \mu\text{m}$, a été analysée au moyen du granulomètre laser MASTERSIZER 3000 par voie sèche.



Figure 3.7 a) Granulomètre laser MASTERSIZER 3000 de Malvern Panalytical ; b) Série de tamis de différents diamètres.

Les résultats des analyses granulométriques ont permis d'obtenir des courbes granulométriques cumulatives typiques pour le silt (Laser) et combinées pour le sable, pour la tourbe et les mélanges (laser et tamisage). De ces courbes, certains paramètres tels D_{10} , D_{30} , D_{50} et D_{60} qui représentent les diamètres effectifs des particules équivalentes correspondant respectivement à 10 %, 30 % et 60 % de passant cumulés sur la courbe granulométrique et P_{80} qui est la proportion des particules $< 80 \mu\text{m}$ ou fines. En plus des D_{10} et du P_{80} , il y a aussi des paramètres tels que les coefficients d'uniformité (C_U) et de conformité (C_C) sont déterminés à partir des équations de (Holtz & Kovacs, 1991) suivantes :

- Coefficient d'uniformité, exprime l'étalement de la courbe granulométrique;

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.5)$$

On reconnaît cinq classes de granulométrie selon la valeur du coefficient d'uniformité (Tremblay et Robitaille, 2014) :

$C_U \leq 2$ granulométrie très serrée,

$2 < C_U \leq 5$ granulométrie serrée,

$5 < C_U \leq 20$ granulométrie semi-étalée,

$20 < C_U \leq 200$ granulométrie étalée,

$200 < C_U$ granulométrie très étalée.

- coefficient de courbure, décrit la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres D_{10} et D_{60} .

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (3.6)$$

Pour des valeurs du coefficient de courbure comprises entre 1 et 3, la granulométrie est dite bien graduée (dispersée). Cette courbe est caractérisée par une pente régulière ou douce, indiquant de ce fait la présence d'une grande variété de diamètres. Par contre, lorsque des valeurs du C_C sont inférieures à 1 et/ou supérieures à 3, la granulométrie est qualifiée de mal gradué. La courbe prend

la forme de creux orienté vers le haut indiquant l'absence de certains diamètres de particules entre D_{10} et D_{60} (Tremblay & Robitaille, 2014).

Les courbes granulométriques obtenues sont utilisées pour la classification des matériaux de base, ainsi que les différents mélanges. La méthode de classification utilisée est celle du système de classification unifiée des sols (Unified Soil Classification System, USCS) basée sur la norme américaine ASTM D2487.

Les courbes granulométriques des matériaux de base et de la tourbe utilisée sont présentées à la Figure 3.8. Les principales caractéristiques granulométriques (D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , P_{80} , C_U et C_c) obtenues pour les matériaux à l'étude sont présentés dans le Tableau 3.5.

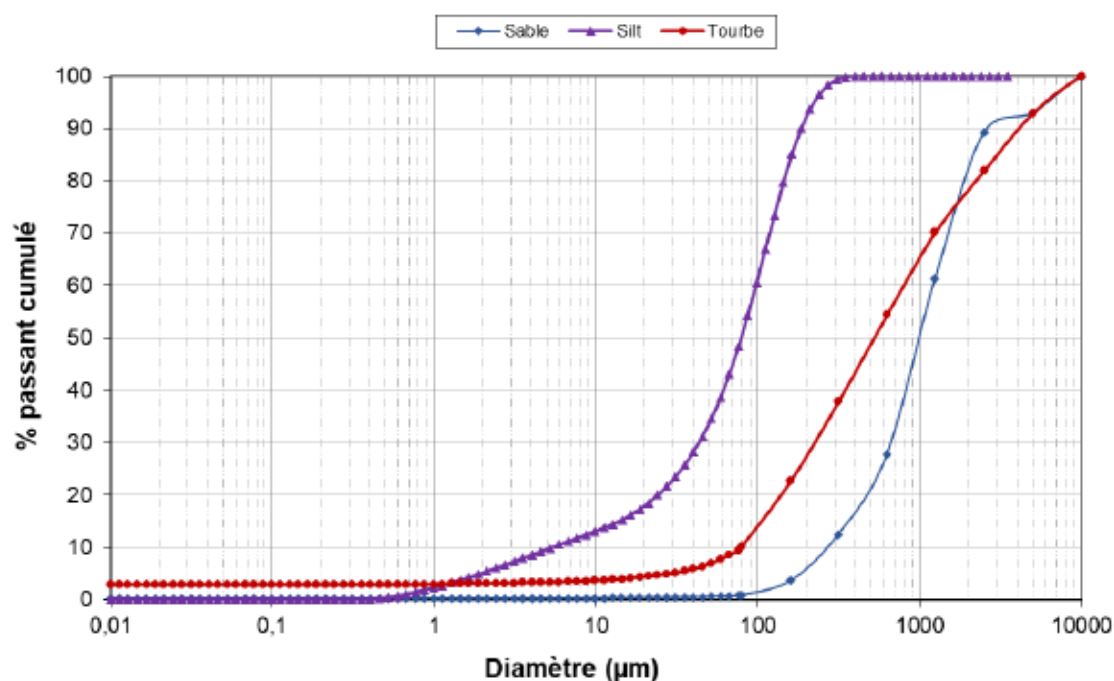


Figure 3.8 Courbes granulométriques du sable, du silt et de la tourbe.

Tableau 3.5 Paramètres granulométriques des matériaux de base et de la tourbe.

Matériaux	D_{10} (μm)	D_{30} (μm)	D_{50} (μm)	D_{60} (μm)	C_U (-)	C_c (-)	P_{80} (%)
Sable	261,17	659,60	992,60	1217,37	4,66	1,37	0,84
Silt	5,39	43,20	78,70	97,20	18,03	3,56	50,00
Tourbe	78,80	222,09	523,79	802,77	10,19	0,78	10,25

Le silt est caractérisé à moitié par des particules fines avec des pourcentages de passant au tamis $80 \mu\text{m}$ d'environ 50 % alors que le sable et la tourbe possèdent respectivement environ 0,84 % et 10,25 % de particules $\leq 80 \mu\text{m}$.

Conformément à la classification des sols USCS (Holtz and Kovacs (1991); ASTM, 2017), le silt a une granulométrie semi-étalée. Car, son C_U est compris entre 5 et 20 ($C_U = 18,03$) et peut être classé comme étant un silt argileux de faible plasticité ou une argile silteuse (CL-ML). Ceci du fait que sa w_L (19,03) < 50 % et appartient à la zone hachurée du diagramme de plasticité (voir figure 3.6). Cependant, les mélanges faits à 12,5 et 15 % de tourbe sont qualifiés de silts et argiles organiques ou sables fins silteux ou argileux (ML-OL). Car leurs limites de liquidité sont respectivement < 50 % et sont sous la ligne A dans le diagramme de plasticité. Le sable présente une granulométrie serrée ($2 < C_U (4,66) \leq 5$) et est classé comme étant un sable mal gradué (SP) ou sable graveleux ($C_U (4,66) < 6$), ainsi que tous ses mélanges à l'exception du mélange à 12,5% de tourbe qui a $C_U (6,15) \geq 6$ et $1 \leq C_C (1,32) \leq 3$ et se classe comme un sable bien gradué (SW).

3.2.4.2 Mélanges sable-tourbe et silt-tourbe

En ce qui concerne les différents mélanges, l'analyse granulométrique s'est réalisée en deux étapes comme pour le sable et la tourbe. Ils ont été, dans un premier temps, tamisés ensuite la partie fine $< 80 \mu\text{m}$ a été analysée au granulomètre laser MASTERSIZER 3000.

Les Figure 3.9 et Figure 3.10 montrent les distributions granulométriques des mélanges sable-tourbe et silt-tourbe, à des teneurs de tourbe de 1 %, 3 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % et 15 %. De ces figures, il ressort que les courbes granulométriques des mélanges sont plus proches de celles des matériaux de base et sont toutes comprises entre celles des matériaux de base et de la tourbe, à l'exception de la partie grossière pour le sable et la partie fine pour le silt. Les

Tableau 3.6 et Tableau 3.7 offrent un récapitulatif des principales caractéristiques granulométriques des différents mélanges sable-tourbe et silt-tourbe.

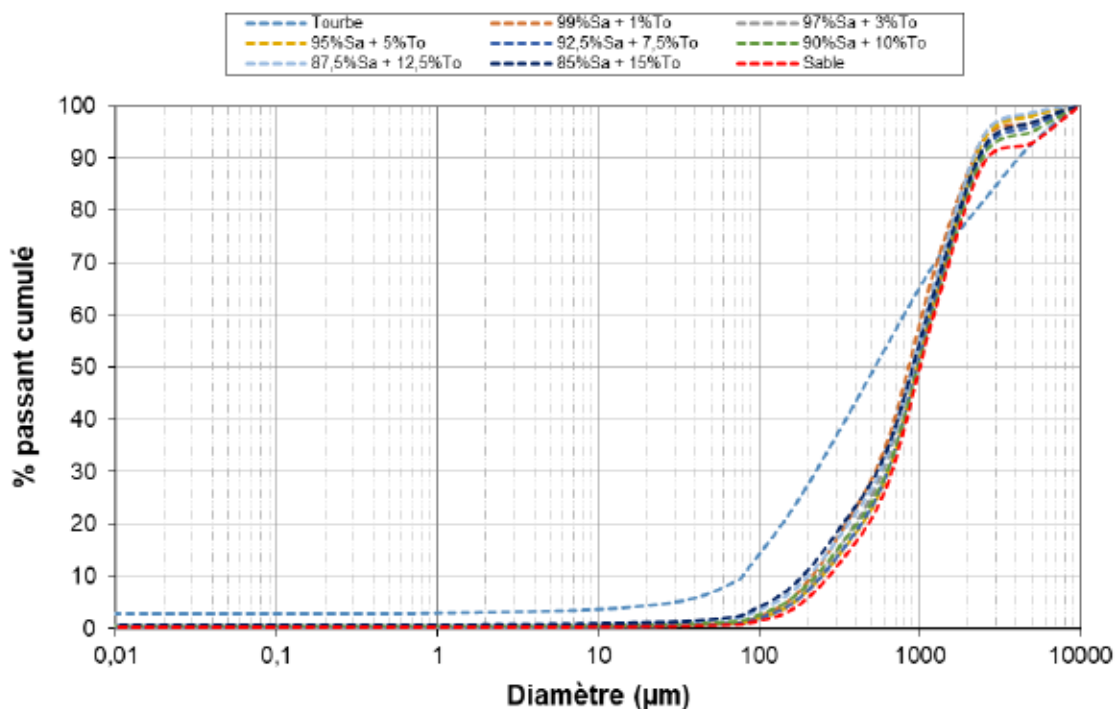


Figure 3.9 Courbes granulométriques du sable, de la tourbe et des mélanges sable-tourbe à différentes teneurs en tourbe.

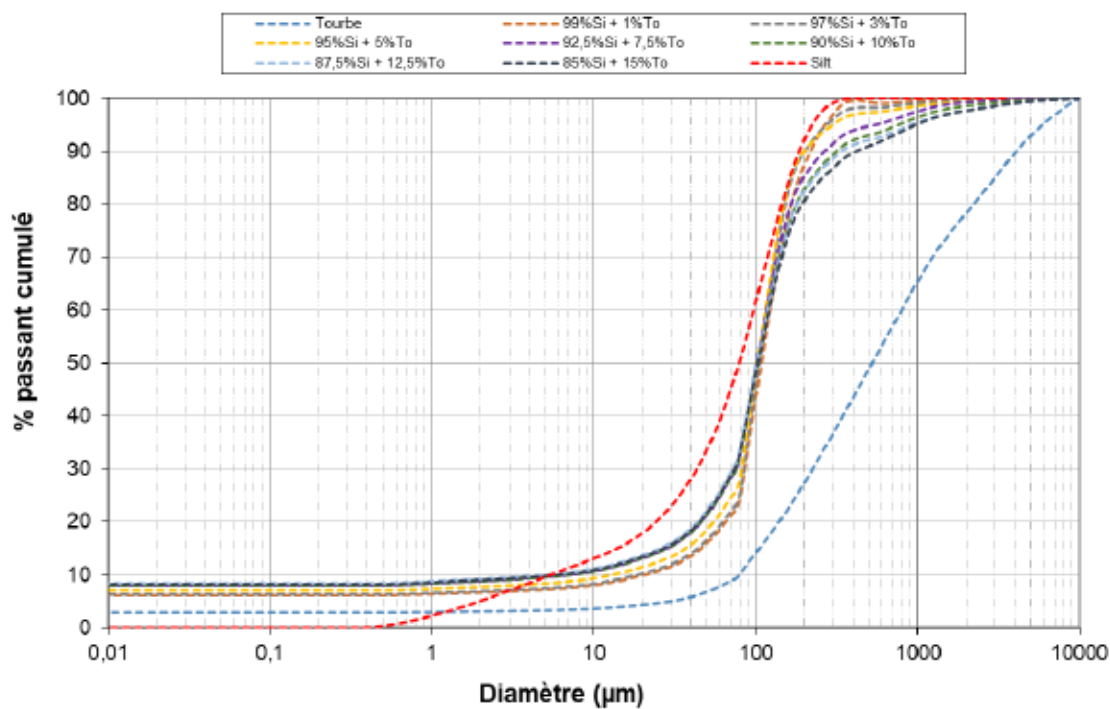


Figure 3.10 Courbes granulométriques du silt, de la tourbe et des mélanges silt-tourbe à différentes teneurs en tourbe.

Tableau 3.6 Paramètres granulométriques du sable et de ses mélanges avec la tourbe.

<i>Mélange sable-tourbe</i>							
	D₁₀ (µm)	D₃₀ (µm)	D₆₀ (µm)	P₈₀ (%)	C_u (-)	C_c (-)	USCS
<i>Sable</i>	261,17	659,90	1217,37	0,84	4,66	1,37	SP
<i>99%Sa + 1%To</i>	202,73	500,52	1032,52	1,14	5,09	1,20	SP
<i>97%Sa + 3%To</i>	222,09	566,05	1087,44	1,04	4,90	1,33	SP
<i>95%Sa + 5%To</i>	233,98	634,73	1162,78	1,21	4,97	1,48	SP
<i>92,5%Sa + 7,5%To</i>	232,32	625,52	1164,28	1,14	5,01	1,45	SP
<i>90%Sa + 10%To</i>	213,13	612,89	1192,86	1,56	5,60	1,48	SP
<i>87,5%Sa + 12,5%To</i>	194,27	540,54	1094,68	2,19	5,63	1,37	SP
<i>85%Sa + 15%To</i>	180,83	515,37	1111,83	2,59	6,15	1,32	SW
<i>Tourbe</i>	78,80	222,09	802,77	10,25	10,19	0,78	

Tableau 3.7 Paramètres granulométriques du silt et des mélanges de silt-tourbe.

<i>Mélange silt-tourbe</i>							
	D₁₀ (µm)	D₃₀ (µm)	D₆₀ (µm)	P₈₀ (%)	C_u (-)	C_c (-)	USCS
<i>Silt</i>	5,39	43,20	97,20	50,00	0,70	3,56	CL-ML
<i>99%Si + 1%To</i>	21,00	85,81	126,39	24,57	6,02	2,77	CL-ML
<i>97%Si + 3%To</i>	18,72	84,40	121,30	25,57	6,48	3,14	CL-ML
<i>95%Si + 5%To</i>	13,21	81,50	118,63	28,51	8,98	4,24	CL-ML
<i>92,5%Si + 7,5%To</i>	6,86	75,55	120,40	32,97	17,54	6,91	CL-ML
<i>90%Si + 10%To</i>	7,04	75,36	123,26	33,05	17,52	6,55	CL-ML
<i>87,5%Si + 12,5%To</i>	5,14	71,97	122,41	34,24	23,79	8,22	ML-OL
<i>85%Si + 15%To</i>	6,43	74,22	125,25	33,43	19,48	6,84	ML-OL
<i>Tourbe</i>	78,80	222,09	802,77	10,25	10,19	0,78	

Le

Tableau 3.6 montre que l'ajout de la tourbe au sable n'a pas un grand impact sur la granulométrie des particules et d'après la classification USCS, juste le mélange avec 15 % de tourbe diffère des

autres. De même, le Tableau 3.7 pour les mélanges du silt montre une différence au niveau de la classification USCS lorsqu'on a des proportions de tourbes de 12,5 % et 15 %.

3.2.5 Caractérisation de la matière organique

Pour des besoins de caractérisation et de classification de la tourbe, en plus de l'analyse granulométrique de celle-ci, on distingue également une caractérisation qui repose sur la détermination de la teneur en fibres et la teneur réelle en matière organique.

3.2.5.1 Détermination du contenu en fibre de la tourbe

Selon les auteurs, la classification des tourbes implique la détermination du contenu en fibre (particules > 0,2 mm, > 0,163 mm, > 0,15 mm ou > 0,1 mm) et aboutit aux trois catégories classiques, fibrique (*f*) la moins décomposée avec plus de 67% de fibres), mésique (décomposition intermédiaire avec 33 à 67 % de fibres) et saprique (la plus décomposée avec moins de 33 % de fibres). Cette teneur en fibre est obtenue en utilisant un processus de tamisage humide (Boelter, 1969; Dinkl & Levesque, 1976; Gobat *et al.*, 1991) qui est une opération de plus en plus utilisée en laboratoire.

Le principe de détermination de la teneur en fibre de la tourbe a été établi suivant le processus de tamisage humide proposé suivant :

- Un échantillon de 61 g de tourbe sèche est trempé pendant 15-20 minutes dans un bol de laboratoire et remué ;
- L'échantillon est ensuite lavé et passé à travers un ensemble de six tamis (2,0 mm, 0,63 mm, 0,212 mm, 0,18 mm, 0,15 et 0,106 mm) à l'aide d'un tamiseur mécanique humide ;
- Afin d'éviter tout frottement ou abrasion susceptible de diminuer la taille des fibres, des mesures de précaution ont été prises. Elles consistent à mettre l'amplitude des vibrations à 3 sur une échelle de 8. Ainsi que de scinder en deux essais (31,70 g et 29,30 g) la masse sèche de 61 g ;
- Les fibres retenues sur chacun des tamis après 35 minutes d'agitation sont collectées, séchées à l'étuve, pesées et rapportées à la masse de l'échantillon original séché.

$$f(\%) = \frac{\sum M_{Retenues_{Tamis}}(g)}{M_{Original_{Sec}}(g)} \times 100 \quad (3.7)$$

Le Tableau 3.8 résume les résultats obtenus de ce test.

Tableau 3.8 Calcul de la teneur en fibre de la tourbe.

Diamètre tamis (mm)	2	0,63	0.212	0,18	0,15	0,106
Masse sèche (g)	14,82	15,04	11,75	1,75	1,88	2,78
Teneur en fibre > à 0,2 mm	68,21					
Teneur en fibre > à 0,15 mm	71,08					
Teneur en fibre > à 0,1 mm	78,72					

Les résultats du Tableau 3.8 nous permettent d'affirmer que la tourbe est fibreuse, car $f > 67\%$ pour tous les cas.

3.2.5.2 Détermination du contenu en matière organique de la tourbe

La teneur en matière organique dans les sols est un indicateur clé de leur qualité, parce qu'elle joue un rôle important dans la fertilité des sols. On l'exprime en gramme par kilogramme (g/kg) ou en pourcentage (%). Cette teneur en matière organique peut être déterminée par la perte au feu. Elle décrit le processus de mesure de la variation de masse d'un échantillon par la combustion ou encore la volatilisation d'une partie de son contenu après qu'elle a été chauffé à de hautes températures (calciné) allant de 375 à 500°C pour les sols et jusqu'à 600°C pour les tourbes.

Le processus d'estimation des teneurs réelles en matières organiques de la tourbe utilisé est le suivant :

- La masse à vide (m_0) de quatre creusets en porcelaine d'environ 100 ml est prise;
- Ensuite, ils sont remplis de 10 à 20 g de tourbe préalablement séchée à l'étuve à 60°C et la masse de l'ensemble (m_1) est mesurée. Placer les creusets contenant la tourbe dans le four à moufle;
- Porter le four à 600°C pour la calcination des échantillons pendant 2 heures afin de garantir la calcination de toute la matière organique contenue dans la tourbe;

- Après la calcination, laisser les échantillons refroidir à l'air libre, puis peser à nouveau le creuset et les cendres et notez les masses (m_2).

La perte au feu (teneur en matière organique) en % des échantillons est calculée en utilisant l'expression suivante :

$$\%MO = \frac{\text{masse tourbe sèche (g)} - \text{masse tourbe calcinée (g)}}{\text{masse tourbe sèche (g)}} \quad (3.8)$$

ou,

$$\%MO = \frac{[(m_1 - m_0) - (m_2 - m_0)]}{(m_1 - m_0)} \quad (3.9)$$

La teneur en matière organique est d'environ 90 % dans la tourbe utilisée.

3.2.6 Caractérisation chimique et minéralogique des matériaux de base

Les caractérisations chimiques et minéralogiques des matériaux à l'étude permettent d'estimer quantitativement et qualitativement leur contenance en substances minérales et en élément chimique. Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué des analyses par IPC-AES et DRX.

3.2.6.1 Caractérisation chimique par IPC-AES

L'analyse de la teneur en éléments chimiques, de la teneur en métaux (comme le mercure) et métalloïdes (comme l'arsenic) et d'autres éléments a été réalisée par la spectroscopie d'émission atomique à plasma à couplage inductif ou "Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer" (ICP-AES). Ceci permet une caractérisation chimique détaillée des matériaux de base. L'analyse est faite sur des échantillons de silt et de sable, finement broyés. Les résultats des analyses chimiques du sable et du silt sont présentés dans le Tableau 3.9. D'après ce tableau, il est évident que les éléments suivants : Aluminium, Calcium, Fer, Magnésium sont présents dans tous les matériaux avec une concentration supérieure à 10 000 $\mu\text{g/g}$. Cependant, l'Arsenic, le Béryllium, le Bismuth, le Cadmium et le Molybdène sont présents sous forme de trace à des concentrations inférieures à 5 $\mu\text{g/g}$.

Tableau 3.9 Résultats des analyses chimiques du silt et sable par ICP-AES

Éléments ($\mu\text{g/g}$)	Silt	Sable
Al	50000	67000
As	1,1	4
Ba	440	330
Be	0,98	0,81
Bi	< 0,09	< 0,09
Ca	17000	29000
Cd	0,05	0,06
Co	8,1	18
Cr	150	88
Cu	16	32
Fe	19000	42000
K	13000	9400
Li	9,6	14
Mg	6800	17000
Mn	350	700
Mo	3,1	0,8
Ni	110	62
Pb	9	4
Ti	2000	3200
Zn	28	54

Les résultats de la caractérisation chimique du silt et du sable au XRF sont présentés dans le Tableau 3.10. Ce dernier met en évidence la présence abondante d'oxydes de silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), l'oxyde ferrique (Fe_2O_3) et la chaux vive (CaO) dans les matériaux.

Tableau 3.10 Résultats des analyses chimiques du silt et du sable par XRF.

Éléments (%)	Silt	Sable
SiO_2	74,2	64,1
Al_2O_3	12,3	14,7
Fe_2O_3	2,92	6,22
MgO	1,18	2,78
CaO	2,57	4,37
Na_2O	3,33	3,66
K_2O	1,67	1,14

Tableau 3.10 Résultats des analyses chimiques du silt et du sable par XRF.(suite)

Éléments (%)	Silt	Sable
TiO ₂	0,38	0,60
P ₂ O ₅	0,09	0,10
MnO	0,04	0,07
Cr ₂ O ₃	0,04	0,02
Total	98,7	97,9

3.2.6.2 Caractérisation minéralogique par DRX

Cette analyse a été réalisée par la diffractométrie de rayons X (DRX) et permet d'étudier les différentes phases de la matière et des matériaux cristallins d'une part, et d'autre part d'identifier le ou les composés cristallisés présents dans un matériau, ainsi que leurs formes cristallographiques. Ceci permet la caractérisation minéralogique détaillée des matériaux. L'analyse est faite sur des échantillons de silt et de sable sec et broyé à $\leq 10 \mu\text{m}$. Les phases minérales du silt et du sable sont présentées sur la Figure 3.11.

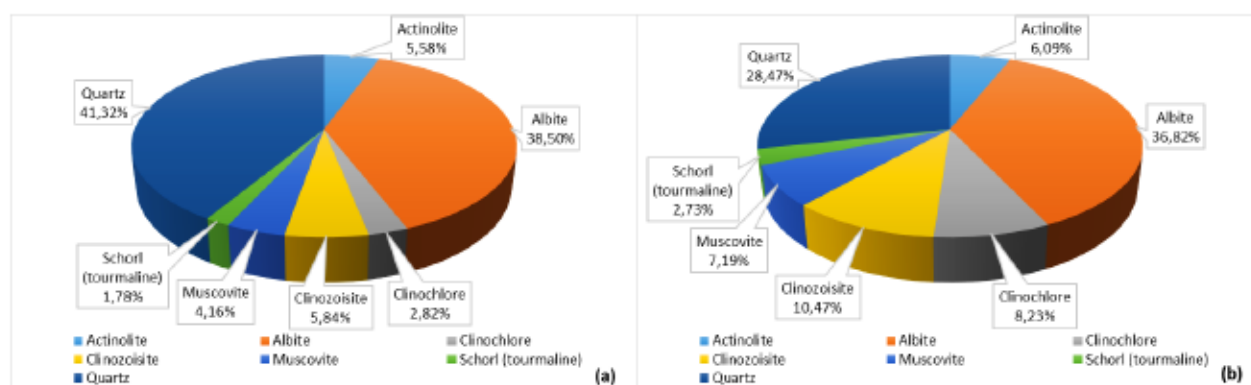


Figure 3.11 Résultats des analyses minéralogiques sur le Silt (a) et le sable (b).

Cette figure montre que le quartz (SiO_2 à 41,32 %) et l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ à 38,50 %) constituent les phases minérales majeures du silt, suivies des phases minérales : Clinozoisite ($(\text{Ca}_2(\text{Al}_{2,98}\text{Fe}_{0,02})\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}))$ à 5,84 %), Actinolite ($(\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ à 5,58 %), Muscovite-2M1 ($(\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ à 4,16 %), Clinochlore ($(\text{Mg}_{2,5}\text{AlSi}_{1,5}\text{O}_5(\text{OH})_4$ à 2,82 %) et Schorl (tourmaline) ($(\text{Na}_{0,66}\text{Ca}_{0,08})(\text{Al}_{0,43}\text{Fe}_{1,50}\text{Mn}_{0,01}\text{Ti}_{0,08}\text{Mg}_{0,86})(\text{Al}_{5,82}\text{Fe}_{0,18})(\text{Si}_{5,901}\text{Al}_{0,099})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ à 1,78 %). En ce qui concerne le sable, on note que le quartz (SiO_2 avec 28,47 %) et l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ à 36,82 %) sont également les phases minérales principales et que les phases

minérales les moins abondantes sont : Clinozoïsite ($\text{Ca}_2(\text{Al}_{2,98}\text{Fe}_{0,02})\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$) à 10,47 %), Clinocllore ($\text{Mg}_{2,5}\text{AlSi}_{1,5}\text{O}_5(\text{OH})_4$ à 8,23 %), Muscovite-2M1 ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ à 7,19 %), Actinolite ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ à 6,09 %) et Schorl (tourmaline) ($(\text{Na}_{0,66}\text{Ca}_{0,08})(\text{Al}_{0,43}\text{Fe}_{1,50}\text{Mn}_{0,01}\text{Ti}_{0,08}\text{Mg}_{0,86})(\text{Al}_{5,82}\text{Fe}_{0,18})(\text{Si}_{5,901}\text{Al}_{0,099})\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ à 2,73 %). Les deux matériaux contiennent les mêmes phases minérales, mais à différentes proportions. Les rapports quantitatifs des minéraux détectés par DRX dans les matériaux de base ainsi que leur modèle de diffraction correspondant seront présentés à annexe A.

3.3 Caractérisations hydrogéotechniques

Dans le cadre de ce travail, la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) et la courbe de rétention d'eau (CRE) sont les principales caractéristiques hydrogéotechniques qui ont été déterminées, afin d'étudier le comportement hydrique des matériaux de base et des mélanges.

3.3.1 Détermination de la conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique (k_{sat}) saturée permet de déterminer l'aptitude d'un milieu poreux saturé à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle peut être mesurée à l'aide de perméamètres et de colonnes. Le type de perméamètre à utiliser dépend de la nature du matériau :

- Pour les matériaux granulaires ($k_{\text{sat}} > 10^{-4}$ m/s), des essais à charge constante et variable dans des perméamètres à parois rigides sont recommandés;
- Pour les matériaux à grains fins ($k_{\text{sat}} < 10^{-4}$ m/s), des essais à charge variable dans des perméamètres à parois flexibles (cellules triaxiales) sont recommandés.

La valeur de la k_{sat} dépend de l'indice de vide (e) et de la taille des grains (Chapuis & Aubertin, 2003).

3.3.1.1 Principe d'essais avec les perméamètres

Les étapes de réalisation de l'essai de la conductivité hydraulique saturée avec les différents perméamètres sont résumées comme suit :

3.3.1.1.1 Perméamètres à parois rigides

Les essais peuvent être réalisés avec une charge constante pour les matériaux grossiers (ASTM D2434-68) ou avec une charge variable pour les matériaux fins (ASTM D5856-95). Ce perméamètre est composé d'un cylindre de plexiglas (1), d'une embase inférieure (2), d'une embase supérieure munie de valves de drainage (3), de deux plaques perforées (4), de géotextiles (5), d'un petit compacteur (6), de quatre vis (7), d'un ressort et de deux joints d'étanchéités emboîtés dans chacune des embases. Pour le montage, un Pied à coulisse électronique (8) et d'un pot de graisse vacuum (9) ont été utilisés (Figure 3.12). Le protocole consiste à :

- Monter le perméamètre en plaçant en dessous une plaque en plastique perforée et un géotextile ;
- Insérer l'échantillon de sol dans le cylindre en plexiglas préalablement hydraté à environ 5 % de la masse du matériau sec en eau (afin de faciliter la compaction) ;
- Placer un second géotextile et une seconde plaque en plastique perforée au-dessus de l'échantillon, serrer tous les écrous ;
- Commencer l'essai en saturant l'échantillon avec de l'eau désionisée et désaérée à débit très faible pendant trois jours (Figure 3.13).

Le perméamètre utilisé à une hauteur de 21 cm et un diamètre intérieur de 11,4 cm et il a été utilisé pour les essais sur le du sable et les différents mélanges de sable amendé avec la tourbe.

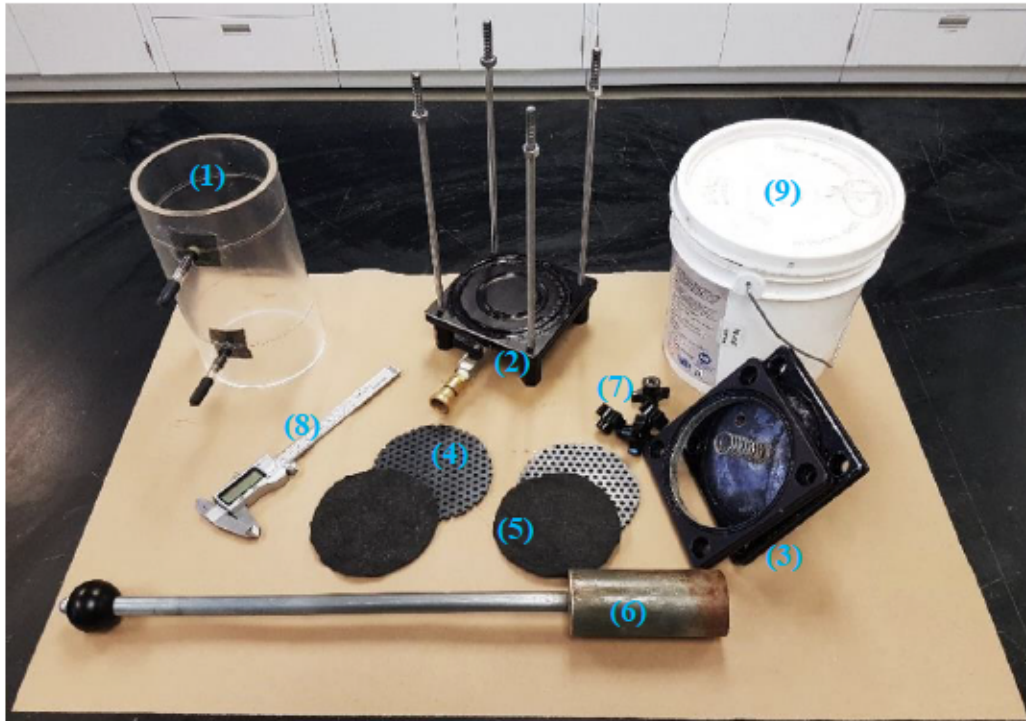


Figure 3.12 Équipements nécessaires pour la réalisation de l'essai.

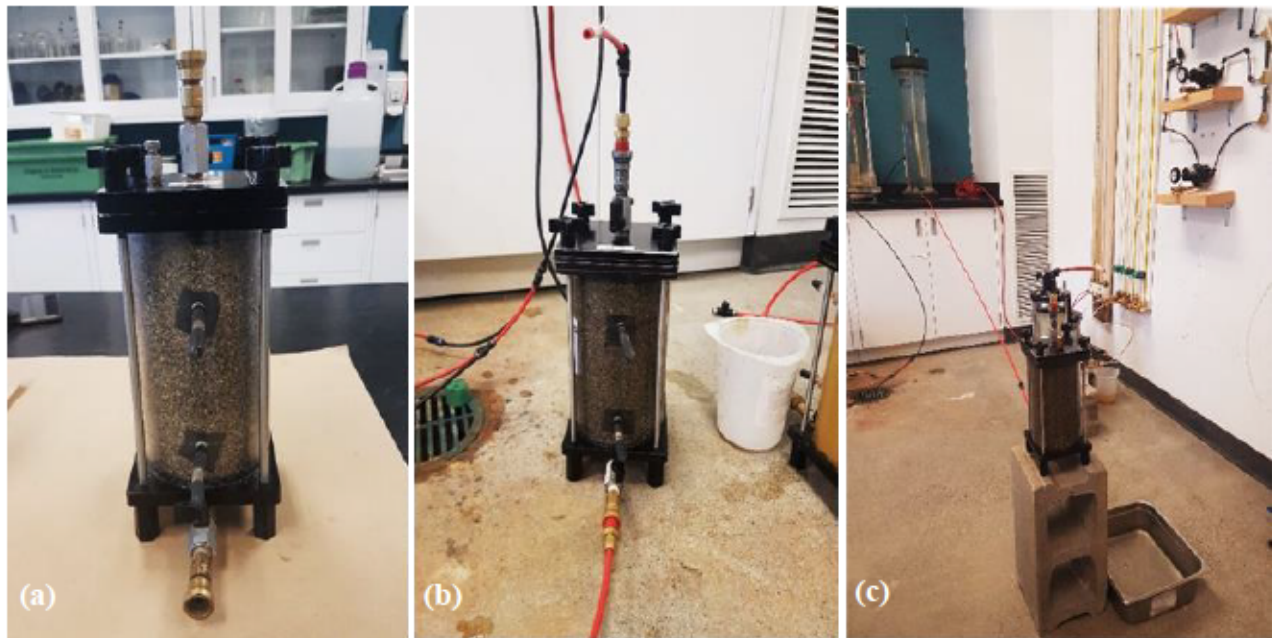


Figure 3.13 Mise en place (a) et saturation (b) de l'échantillon dans le perméamètre et la prise des mesures (c).

3.3.1.1.2 Perméamètres à parois flexibles

Ce perméamètre est utilisé spécifiquement pour les matériaux fins. L'essai est effectué conformément à la norme ASTM D 5084-03. Il est constitué d'un socle (1), d'un cylindre en plexiglas (2), de quatre barres (3), de quatre joints toriques (4), d'un couvercle (5), d'une membrane flexible (6), de deux pierres poreuses saturées (7) et des filtres (8). Un pot de graisse vacuum et le pied à coulisse son nécessaire pour le montage (Figure 3.14). Les différentes étapes permettant la réalisation des mesures consistent à :

- Introduire et compacter l'échantillon préalablement saturé à environ 85% dans le cylindre en acier ou le moule à échantillon (9), maintenu par deux Orings (10);
- Démouler délicatement l'échantillon du moule cylindrique en acier;
- Vider tout l'air entre le cylindre PVC (11) et la membrane flexible à l'aide de la poire en caoutchouc (10);
- Installer la membrane flexible à l'intérieur du cylindre intermédiaire;
- Enfiler l'échantillon dans la membrane plastique;
- Retirer le cylindre en plastique et la poire;
- Placer des pierres poreuses préalablement saturées (pendant 24h minimum) et des filtres papier saturés au-dessus et en dessous de l'échantillon;
- Maintenir l'ensemble à l'aide des joints toriques;
- Puis serrer tous les écrous et remplir la cellule avec de l'eau désionisée et désaérée, procéder à la saturation de l'échantillon et procéder à l'essai.

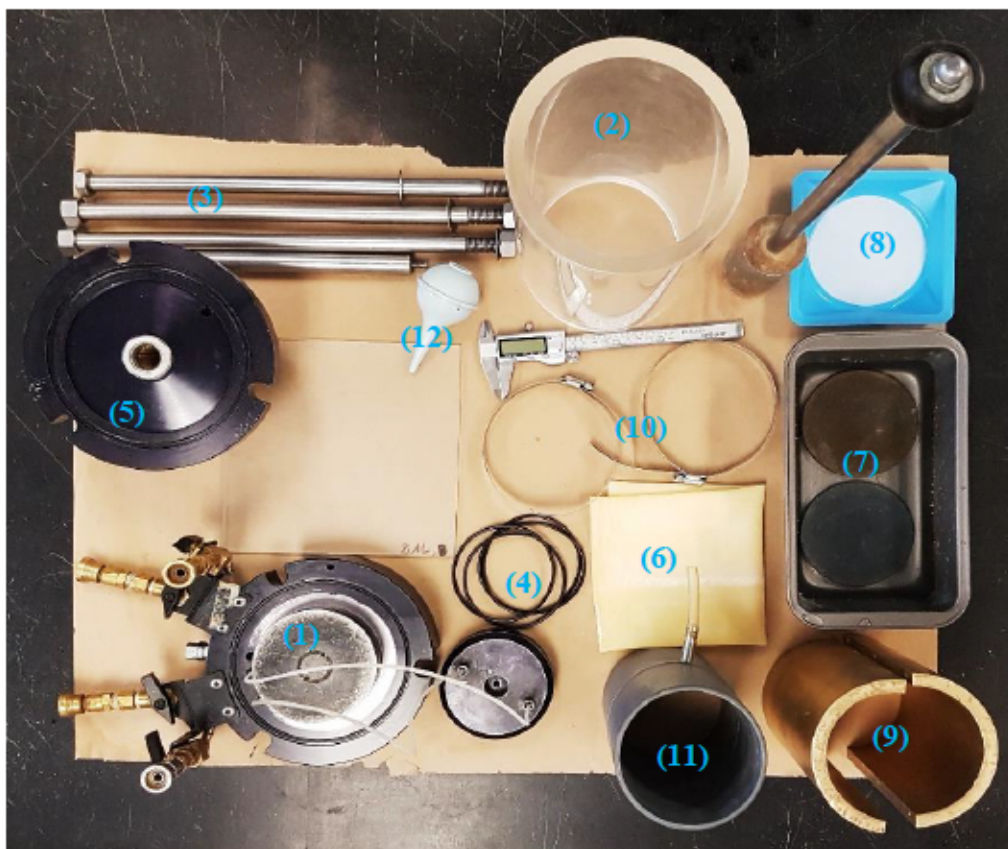


Figure 3.14 Équipements nécessaires pour la réalisation de l'essai.

L'échantillon a une hauteur comprise entre 15 et 20 cm et un diamètre de 10 cm. Les échantillons ont été saturés pendant dix jours environ à une pression de confinement 1,5 fois supérieure à la pression de saturation (Figure 3.15). Ce perméamètre est utilisé pour le silt et ses différents mélanges.



Figure 3.15 Mise en place (a et b) de l'échantillon dans le perméamètre et saturation de l'échantillon et prise des mesures (c).

Pour les essais à charge constante, le perméamètre est connecté à un réservoir d'eau (cylindre) ou bouteille de Mariotte dans lequel est introduit un tube et dont la base par rapport au fond du réservoir représente la hauteur d'eau (pression) qui sera exercée sur l'échantillon (Figure 3.16). On ouvre la valve pour permettre à l'eau de circuler (faible débit) à travers l'échantillon de longueur L et de section A , en s'assurant que la hauteur (H) ou la différence de charge reste constante dans le réservoir. Puis le volume d'eau qui s'est écoulé (recueilli à la sortie du perméamètre) pendant un temps (t) est noté. La k_{sat} sera déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$k_{sat} = \frac{V_w}{t} \times \frac{L}{A.H} = \frac{Q.L}{A.H} = \frac{Q.L}{A.\Delta h} \quad (3.10)$$

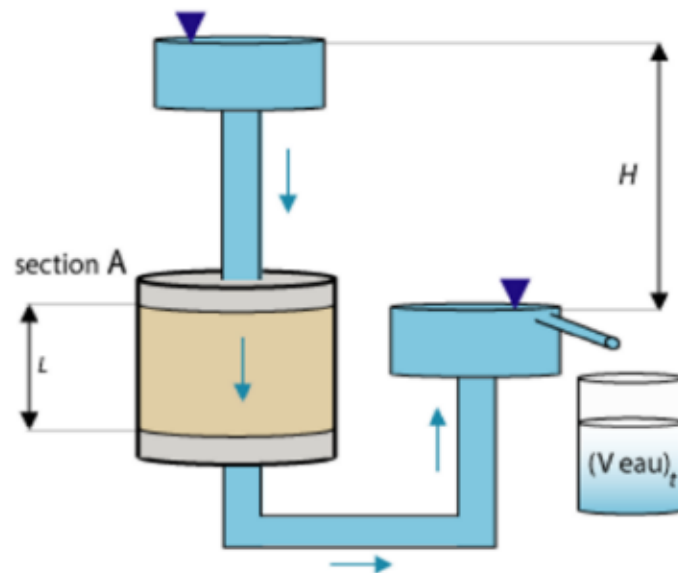


Figure 3.16 Schéma du principe de mesure de la conductivité hydraulique saturée (Fouché, 2013).

Pour les essais à charge variable, le perméamètre est connecté à un tube capillaire de section a , dans lequel on remplit l'eau jusqu'à une hauteur h_1 (Figure 3.17). On ouvre la valve pour permettre la circulation de l'eau à travers l'échantillon de longueur L et de section A , pendant un temps (t_2) et on note le niveau d'eau dans le tube (h_2). On considère le temps initial $t_1 = 0$ s. La k_{sat} sera déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$k_{sat} = \frac{a.L}{A(t_2 - t_1)} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.11)$$

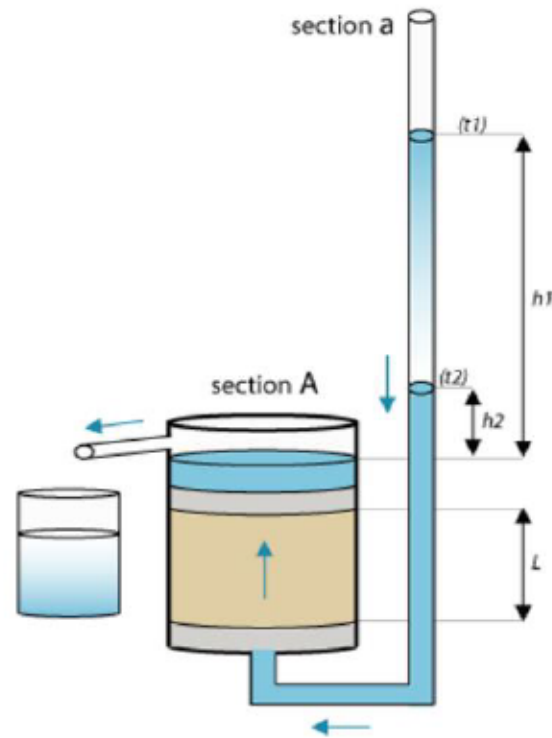


Figure 3.17 Schéma du principe de mesure de la conductivité hydraulique saturée (Fouché, 2013).

3.3.2 Détermination de la courbe de rétention d'eau

Les propriétés hydrogéologiques des matériaux non saturés, plus précisément leur courbe de rétention d'eau (CRE), sont nécessaires pour comprendre le comportement de ces matériaux lors du séchage ou du mouillage. D'après Fredlund and Xing (1994) et Aubertin *et al* (1998), elle est la propriété hydrogéologique la plus largement utilisée pour caractériser les propriétés hydrauliques des matériaux. La CRE en fonction de l'objectif visé peut représenter la relation entre la teneur en eau volumique (θ_w) ou le degré de saturation (S_r) du matériau étudié et la succion (ψ) qui lui est appliquée. Dans le cas des matériaux déformables non saturés, l'expression de la courbe de rétention d'eau la plus appropriée est celle entre le degré de saturation et la succion ($S_r(\psi)$) (Mbonimpa *et al.*, 2006). En outre, elle peut être décrite selon la granulométrie, la surface spécifique des grains, la porosité, etc. (Aubertin *et al.*, 2003).

Il existe plusieurs équipements permettant de réaliser les essais de CRE, parmi lesquels on trouve la cellule de pression ou « *tempe cell* » (confectionnée par Soilmoisture Equipment Corporation) avec des pierres poreuses ayant une pression d'entrée d'air maximale de 300 kPa et la table à

tension « *sandbox* » (fabriquée par Eijkelkamp Soil & Water). Dans le cas de notre étude, la table à tension sera utilisée pour le sable et ses mélanges et les cellules de pression pour le silt et ses mélanges.

3.3.2.1 La table à tension (sandbox)

L'essai sur la table à tension a été utilisé pour appliquer une gamme de pressions allant de pF 0 (saturation, 0,1 kPa) à pF 2,0 (10 kPa). Cette table permet de déterminer la teneur en eau volumique des sols à faible pression d'entrée de l'air (Air entry value – AEV). Le dispositif expérimental est présenté à la Figure 3.18 où on peut distinguer : un bac rempli de sable synthétique (1), une bouteille d'eau (2) et un tuyau d'alimentation d'eau (3), tuyau d'écoulement ou sortie (4), support de mesure coulissant (5), régulateur d'aspiration (6), réservoir d'évaporation (7), robinet de commande de la circulation d'eau (8). Lorsque le robinet B est ouvert et que le robinet A est sur « supply » la saturation du sable est en cours. Cependant, lorsque le robinet B est fermé et que le robinet A est sur « discharge » la désaturation est enclenchée.

Le principe consiste d'abord à apprêter et à saturer les échantillons. Les échantillons sont introduits dans des anneaux de 75 mm de diamètre et de 5 cm de hauteur et saturés pendant 48h dans des dessiccateurs. Ceci en procédant comme suit :

- Fixer un petit morceau de tissu à l'une des bases des anneaux à l'aide d'un Oring;
- Peser les anneaux avec le tissu et le Oring à vide;
- Mettre les échantillons dans les anneaux;
- Remplir le dessiccateur d'eau jusqu'à la plaque et y placer les échantillons;
- Disposer les échantillons, tissu vers le bas, dans les dessiccateurs (4 par dessiccateur);
- Ajouter doucement de l'eau dans le dessiccateur jusqu'à atteindre 1 cm sous le bord supérieur du cylindre;
- Mettre le couvercle du dessiccateur;
- Faire le vide en branchant la pompe sur le dessiccateur;
- Arrêter la pompe (vacuum) après que le cadran de la pompe a indiqué une pression égale à 0,5 bar ou 50 kPa pendant 10 minutes;
- Laisser les anneaux dans le dessiccateur pendant 48h et après, les peser saturés en eau.

Une fois les échantillons saturés, le sable dans le bac est également saturé de sorte qu'il n'y ait plus de bulles d'air dans le sable ou dans la tuyauterie du système. Par la suite :

- Recouvrir le sable avec un tissu de protection saturé d'eau au préalable;
- Disperser les éventuelles bulles d'air entre le tissu et la surface du sable en lissant délicatement du centre du box vers l'extérieur (extrémité) en utilisant une éponge;
- La moitié de l'échantillon est utilisée comme le point de référence zéro;
- Se rassurer d'avoir 0,5 cm d'eau au-dessus du sable;
- Placer les échantillons dans la table à tension;
- Augmenter le niveau de l'eau sous l'échantillon jusqu'à 1 cm de la surface (sommet) de celui-ci;
- Les laisser s'équilibrer pendant 1 heure;
- Choisir la pression désirée sur le régulateur pour les différentes valeurs de succion entre pF 0 et pF 2,0;
- Placer le couvercle et faire partir le test sous cette pression pendant 2 jours (48h);
- Retirer les échantillons, les peser et les remettre pour la succion suivante.

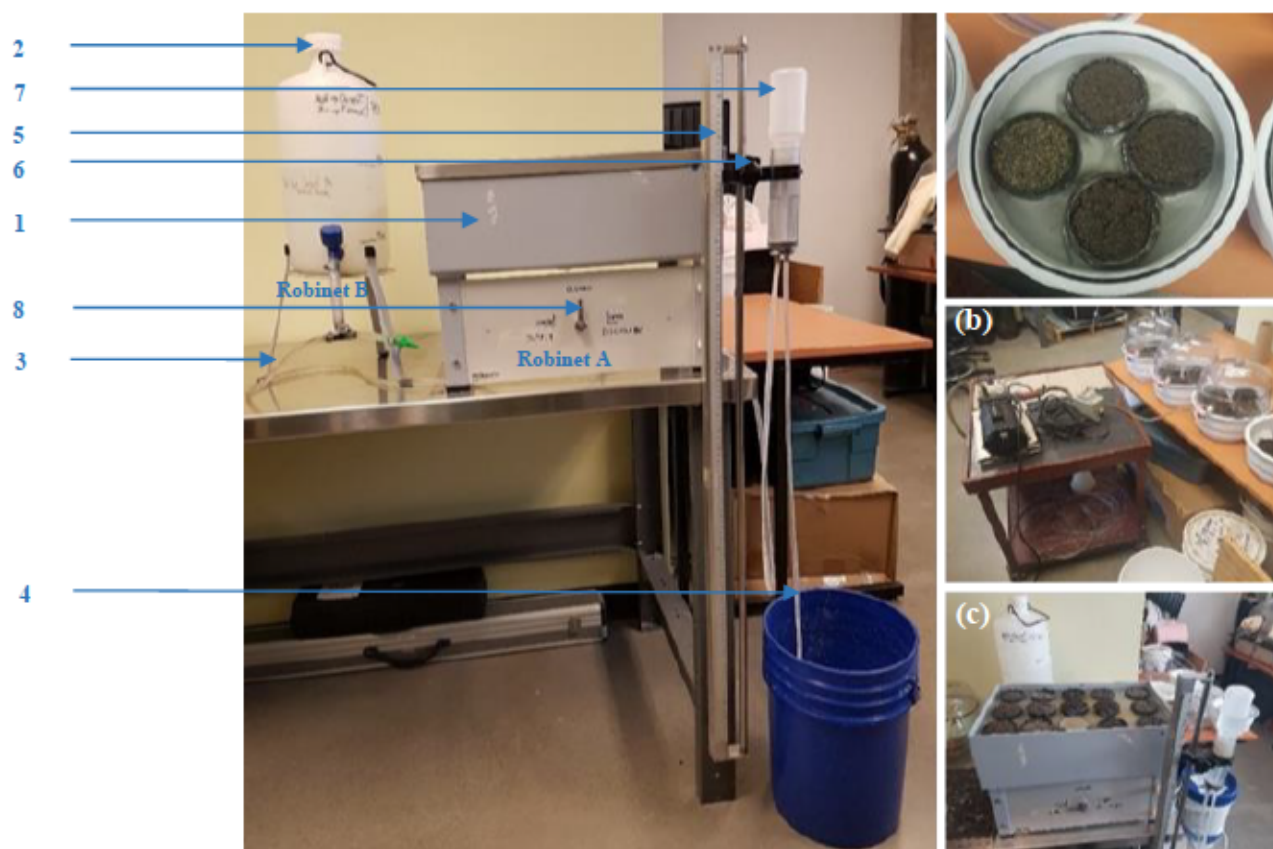


Figure 3.18 a) Table de tension et ses composantes, b) Échantillons placés dans les dessiccateurs, c) création du vide dans les dessiccateurs à l'aide d'un vacuum, d) Échantillons placés dans la table à tension et prêt pour le test.

La pesée des échantillons après chaque réglage et la pesée à la fin après séchage permettent d'obtenir la teneur en eau volumique de chaque échantillon par calcul. Avec ces deux informations (teneur en eau volumique et succion), la CRE des échantillons est obtenue.

3.3.2.2 Tempe cell

L'essai en cellule de pression dans ce mémoire a consisté à mesurer la teneur en eau volumique à différents paliers de succions variant de 7 à 300 kPa (pression d'azote) appliquée sur des échantillons saturés préalablement. Les succions ont été augmentées de façon progressive une fois que l'équilibre est atteint pour une succion donnée (après 48), tandis que l'évolution de la teneur en eau volumique est contrôlée et peut être mesurée ou calculée.

La Figure 3.19 met en exergue le dispositif expérimental, à savoir : l'échantillon placé dans un cylindre métallique avec une base et un sommet (couvercle) en plexiglas, la voie d'alimentation du

circuit d'azote, auquel on peut insérer un manomètre pour les lectures des différentes pressions. Les venues d'azote alimentant les cellules proviennent des bonbonnes. Les composantes telles que : le socle du bas (1) et du haut (2), trois joints d'étanchéité (un petit et deux gros) (3), le cylindre de laiton (4), une pierre poreuse (5) et six vis et six rondelles (6). La graisse vacuum (7), le support pour montage (8), la poire (9), le compacteur (10) et le pied à coulisse électronique (11) sont indispensables pour le montage.

La préparation et le montage de l'essai se font comme suit :

- Tremper les pierres poreuses dans l'eau désionisée au moins 24h avant le montage de l'essai;
- Prendre la masse de la cellule à vide avec toutes ses composantes (socles du haut et bas, cylindre de laiton, joints d'étanchéités (trois), pierre poreuse, vis et rondelles);
- Placer le socle du bas sur le support de montage et boucher la sortie du socle à l'aide d'un des bouchons de plastique;
- Graisser les joints d'étanchéité (un de faible épaisseur et deux épais) et les placer dans le sillon prévu à cet effet;
- Remplir les canaux du socle avec une fine couche d'eau et apposer la pierre poreuse de manière à ne pas emprisonner l'air sous celle-ci;
- Retirer l'excédent d'eau au-dessus de la pierre poreuse, à l'aide de la poire;
- Insérer délicatement le cylindre en métal dans la cellule et y introduire l'échantillon (à l'état saturé) en trois fines couches;
- Mesurer et noter l'espace restant dans le cylindre, en utilisant le pied à coulisse;
- Insérer le socle du haut sur le montage et prendre la masse totale de la cellule avec l'échantillon saturé;
- Placer les deux cellules sur les supports de suivi et appliquer le premier palier de pression, compris entre 0 et 7 kPa.

Après chaque palier de pression qui dure 48h il faut d'abord, noter la pression, déconnecter la cellule, la peser et noter sa masse, ensuite replacer la cellule et passer au prochain palier de pression et enfin s'assurer que l'augmentation de pression n'a pas provoqué de fuite dans la cellule.

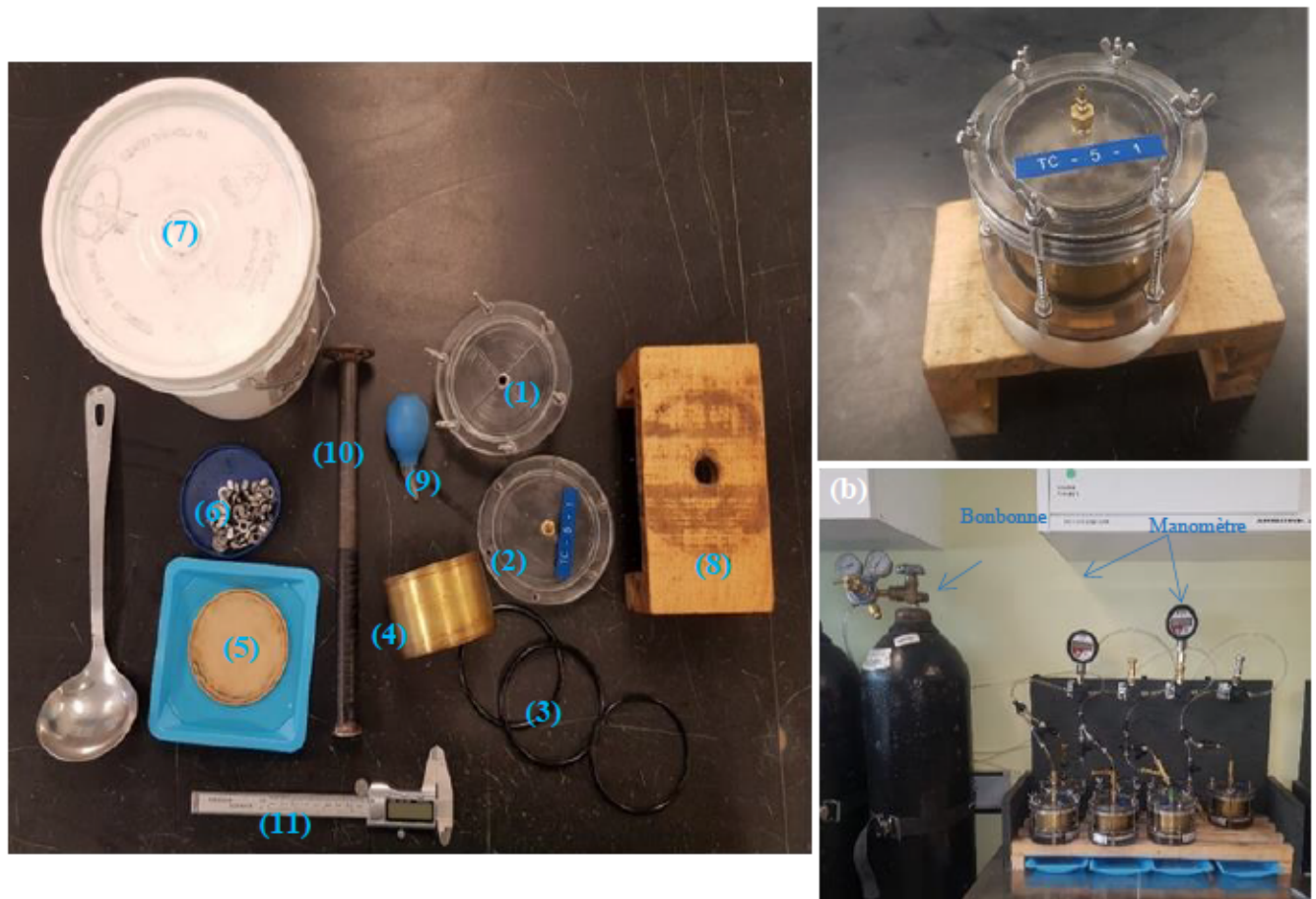


Figure 3.19 a) Équipement nécessaire à la réalisation de l'essai, b) Échantillons placés dans les dessiccateurs, c) circuit de l'essai en cellule de pression (300 kPa).

Lors du démontage, la hauteur finale et le diamètre de l'échantillon sont pris et permettent de déterminer la variation de volume final de l'échantillon durant l'essai ($\theta = S_r \times n$). Pour cela, on calcule la teneur en eau massique et aussi le degré de saturation pour chaque palier de pression. La courbe exprimant la teneur en eau volumique en fonction de la succion (θ, ψ) est donc obtenue à partir des points expérimentaux. Cette courbe peut être lissée avec l'équation de van Genuchten en se servant du logiciel RETC et nous donner la courbe de rétention (CRE) lissée.

3.4 Modèle prédictif de CRE

Il existe plusieurs modèles qui permettent de prédire les CRE des sols non saturés. Ces différentes méthodes de prédiction reposent pour la plupart sur les caractéristiques géotechniques fondamentales des sols, telles que la granulométrie, la porosité et l'indice des vides, ainsi que sur

des éléments supplémentaires comme la teneur en matière organique et la minéralogie des argiles. Parmi les modèles de prédictions nous pouvons citer :

- Le modèle d'Arya and Paris (1981) : modèle de prédiction des caractéristiques de la CRE à partir de la distribution granulométrique, de la densité apparente et des paramètres de densité des particules;
- Le modèle de Kovács (1981) : ce modèle prend en compte les forces capillaires et d'adhésion, ainsi que les propriétés géotechniques pour prédire la CRE;
- Le modèle de Haverkamp and Parlange (1986) : modèle de prédiction de la CRE des sols sableux à partir des propriétés structurales et texturales disponibles. Ceci en utilisant le concept de similitude entre la forme de la CRE et la distribution granulométrique de la taille des particules;
- Le modèle de Kovács modifié (MK) (Aubertin *et al.*, 1998; Aubertin *et al.*, 2003) : tout comme le modèle original Kovács, ce modèle prend en compte les forces capillaires et d'adhésion, ainsi que les propriétés géotechniques pour prédire la CRE.

On peut constater que tous les modèles de prédictions proposés plus haut, nous présentent des équations de la CRE formulées pour les matériaux minéraux. Il existe des modèles, souvent désignés sous le nom de fonctions de pédotransfert (PTFs), qui ont été largement élaborés et adoptés dans le domaine des sciences du sol. Plusieurs PTFs sous forme de régression et basées sur la texture et la structure des sols, ont également été proposé par Gupta and Larson (1979); Vereecken *et al.* (1989); Tomasella and Hodnett (1998); Weynants *et al.* (2009).

L'application de ces modèles est tout au moins subordonnée à la disponibilité des paramètres facilement mesurables tels que : la granulométrie, la texture, le poids volumique sec et la teneur en matière organique du sol. Les données ont été traitées selon l'approche proposée dans la Figure 3.20. Tout d'abord, les CRE ont été estimées pour chaque matériau et mélange à l'aide des essais de laboratoire. Les courbes mesurées ont ensuite été ajustées par calcul avec le modèle Fredlund and Xing (1994).

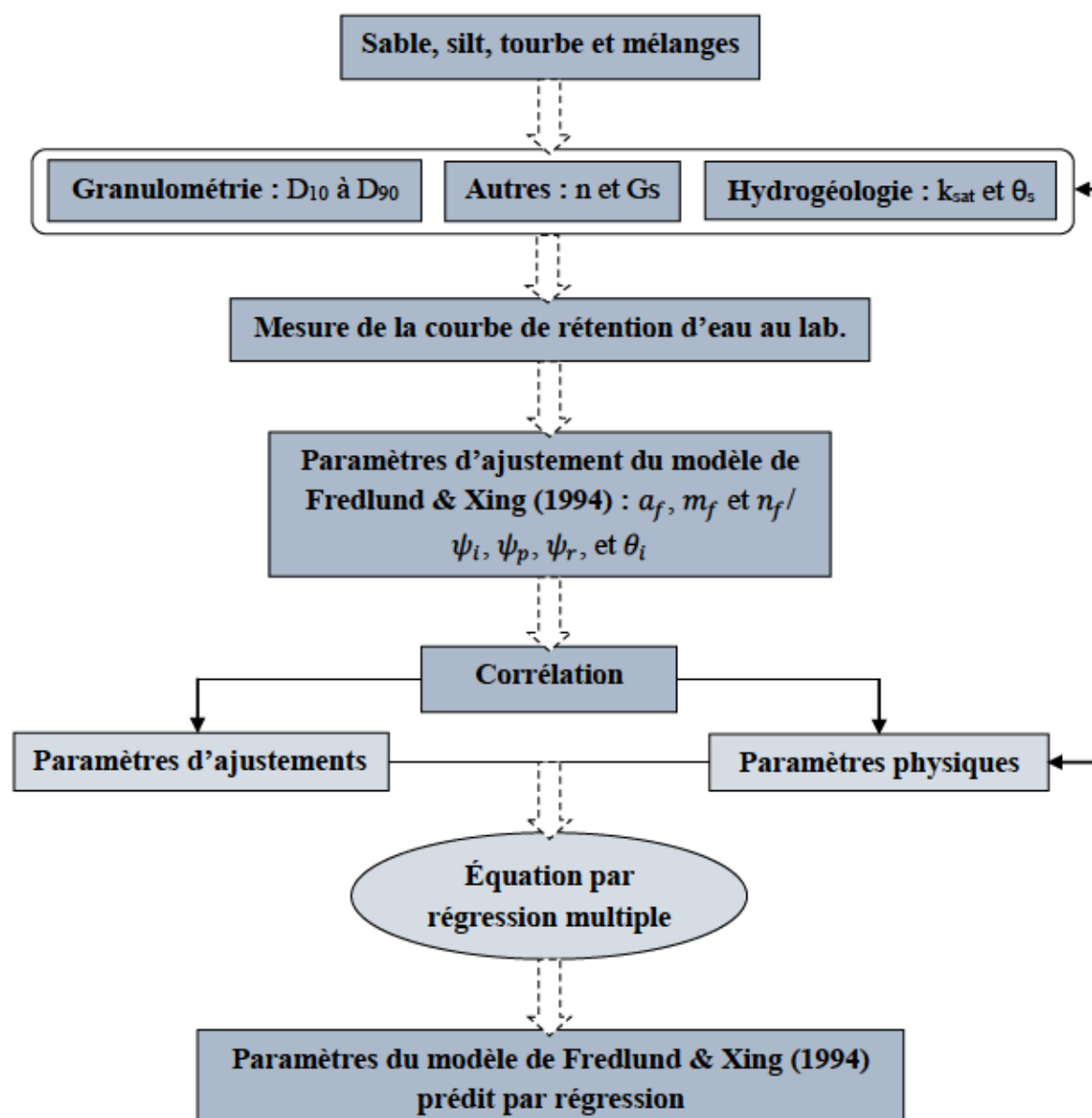


Figure 3.20 Étapes de la détermination des paramètres prédits.

3.4.1 Modèle adopté et spécifications

Les modèles permettant d'ajuster les propriétés hydriques à des données expérimentales des sols sont nombreux et variés. Cependant, le modèle de van Genuchten est le plus connu et utilisé. Ce modèle a été sollicité par plusieurs auteurs pour ajuster les propriétés hydrauliques des sols en milieux non saturés (Vereecken *et al.*, 1989; Scheinost *et al.*, 1997; Weynants *et al.*, 2009). Pour atteindre l'un des objectifs de ce travail qui est de proposer un modèle prédictif de la CRE et qui prend en considération la matière organique, le modèle descriptif de Fredlund and Xing (1994) sera

utilisé et couplé à l'analyse de régression linéaire multiple ou régression polynomiale. Ce modèle propose l'expression suivante :

$$\theta(\psi, a_f, m_f, n_f) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}} \quad (3.12)$$

où,

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{\ln[1 + (\psi_0/\psi_r)]} \quad (3.13)$$

avec la teneur en eau saturée, θ_s , le nombre d'Euler ou constante de Néper, $e \approx 2,71828$, les paramètres de forme ou d'ajustement (a_f , m_f et n_f), la succion correspondant à la teneur en eau résiduelle, ψ_r , la succion à l'état sec, ψ_0 et la succion matricielle, ψ (nous la considérons positive).

Ils proposent une détermination des paramètres (a_f , m_f et n_f) à partir de certains paramètres graphiques (Figure 3.21) :

$$a_f = \psi_i \quad (3.14)$$

$$m_f = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad (3.15)$$

$$n_f = \frac{1,31^{m+1}}{m C(\psi_i)} 3,71 s^* \quad (3.16)$$

$$s = \frac{\theta_i}{\ln(\psi_p/\psi_i)} \quad (3.17)$$

$$s^* = \frac{s}{\theta_s} \quad (3.18)$$

où s est la pente de la tangente à la courbe semi-logarithmique, ψ_p , est l'interception de la tangente sur le tracé semi-logarithmique et l'axe de succion matricielle, ψ_i et θ_i représentent le point d'inflexion sur le tracé semi-logarithmique respectivement sur l'axe des abscisses et des ordonnées.

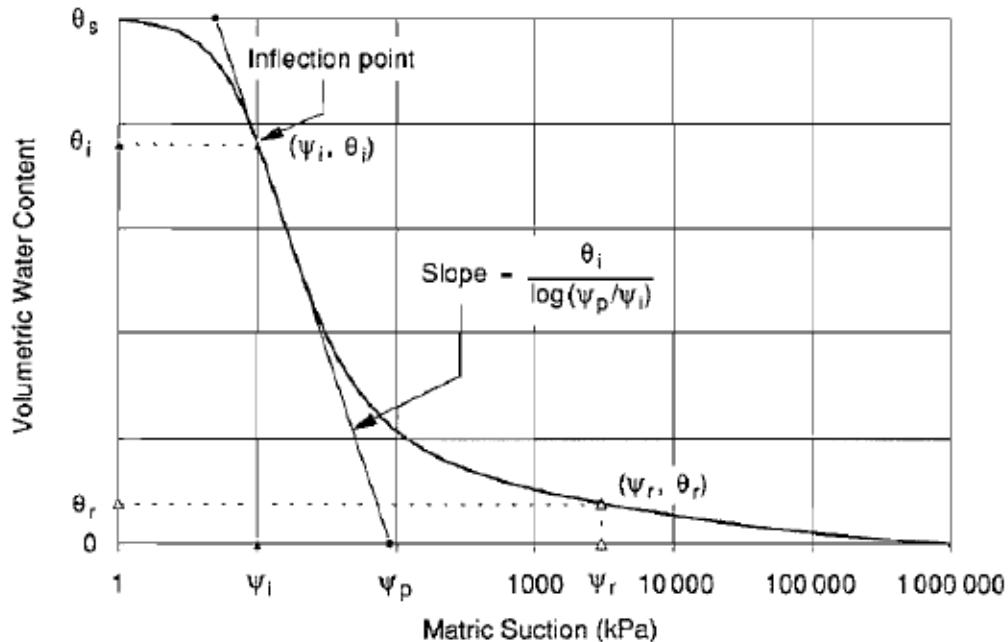


Figure 3.21 Un exemple de tracé pour la solution graphique des quatre paramètres (a_f , m_f , n_f , et ψ_r) (tiré de Fredlund and Xing (1994)).

3.4.2 L'analyse de régression

L'analyse de régression est un modèle statistique qui permet d'examiner la relation entre les variables dépendantes (expliquée) et indépendantes (explicative). Cette analyse génère une équation pour décrire la relation statistique entre un ou plusieurs prédicteurs (variable dépendante) et la variable indépendante ou de réponse. L'analyse de régression a été largement utilisée pour la prédiction des propriétés hydrauliques du sol à partir des caractéristiques du sol (Puckett *et al.*, 1985; Vereecken *et al.*, 1989; Vereecken *et al.*, 1990; Scheinost *et al.*, 1997; Wösten *et al.*, 2001; Vereecken, 2004) et plus récemment associé à l'intelligence artificielle (Lamorski *et al.*, 2017; Nguyen *et al.*, 2017; D'Emilio *et al.*, 2018). L'application de l'analyse de régression, dans le but d'estimer les propriétés hydrauliques du sol, nécessite une bonne spécification du modèle, une précision accrue dans la prédiction et que les données permettent une bonne estimation (Vereecken *et al.*, 1989).

Les modèles de régressions sont variés et l'utilisation de l'un ou de l'autre dépend des objectifs et des critères fixés. Parmi les principaux modèles de régression linéaires disponibles, celui qui sera présenté dans le cadre de ce travail est la régression linéaire. On en distingue deux types :

- La régression linéaire simple, qui examine la relation linéaire entre deux variables continues, une réponse (Y) et un prédicteur (X). Lorsqu'il existe une relation entre les deux variables, il est possible de prévoir une valeur de réponse à partir de la valeur du prédicteur avec une bonne précision ;
- La régression linéaire multiple examine les relations linéaires entre une réponse continue et deux ou plusieurs prédicteurs (celle retenue dans le cadre de ce travail).

Il existe également la régression polynomiale qui est un cas particulier de régression linéaire multiple, où les équations sont construites à partir des puissances d'une seule variable indépendante. Il s'agit d'une analyse statistique qui décrit la variation d'une variable aléatoire expliquée à partir d'une fonction polynomiale d'une variable aléatoire explicative.

3.4.3 L'analyse en composantes principales (ACP) avec XLSTAT 2024

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'une des méthodes de data mining les plus populaires. Elle permet d'étudier des ensembles de données multidimensionnelles avec des variables quantitatives. Il s'agit d'une méthode de projection car elle projette les observations d'un espace à p dimensions avec p variables vers un espace à k dimensions (où $k < p$) de manière à conserver le maximum d'information. Si l'information associée aux 2 ou 3 premiers axes représente un pourcentage suffisant de la variabilité totale du nuage de points, les observations peuvent être représentées sur un graphique à 2 ou 3 dimensions, ce qui facilite grandement l'interprétation.

L'ACP peut donc être considérée comme une méthode d'exploration de données car elle permet d'extraire facilement des informations de grands ensembles de données. Elle peut être utilisée à plusieurs fins, notamment :

- L'étude et la visualisation des corrélations entre les variables, afin d'éventuellement limiter le nombre de variables à mesurer par la suite ;
- L'obtention de facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ, afin d'utiliser ces facteurs dans des méthodes de modélisation telles que la

régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante. Pour n'en citer que celles-ci.

L'ACP est disponible dans Excel avec le logiciel XLSTAT, qui propose plusieurs traitements de données qui peuvent être utilisés sur les données d'entrée avant les calculs d'ACP. Dans le cadre de ce travail nous avons utilisé, le coefficient de corrélation de Pearson, l'ACP classique, qui standardise ou normalise automatiquement les données avant les calculs pour éviter de gonfler l'impact des variables à forte variance sur le résultat. Il sert à quantifier les relations linéaires afin d'indiquer la force et la direction de la connexion entre deux variables, il prend une valeur comprise entre -1 et 1.

3.4.4 Précision des prédictions

La précision prédictive des modèles est le degré de proximité entre la valeur mesurée et celle prédite. Cette précision définie ainsi, la qualité des prédictions qui en résultent. L'évaluation de la précision de ces modèles prédictifs est fondamentale, car les modèles prédictifs sont de plus en plus utilisés dans l'étude des propriétés hydrauliques des sols. De plus, l'évaluation de la performance du modèle ou encore la confrontation entre les estimations produites par le modèle et les valeurs mesurées/fiables sont une étape essentielle pour le développement, la validation et l'utilisation du modèle.

De nombreuses études ayant pour objectif de développer une PTFs, ont cherché à quantifier la précision des estimations à l'aide d'une grande variété de critères. Plusieurs critères sont utilisés pour discuter la précision des prédictions effectuées dans ces cas. Parmi ces critères, nous pouvons mentionner, MRE (Mean Relative Error), MAE (Mean Absolute Error), R^2 (Coefficient of determination) et RMSE (Root Mean Square Error) qui sont ceux fréquemment utilisés. RMSE et R^2 seront utilisés dans ce travail.

3.4.4.1 L'erreur quadratique moyenne

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est une mesure de la différence entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs mesurées sur le terrain ou au laboratoire. Ces différences individuelles sont aussi appelées résidus. L'erreur quadratique moyenne mesure le degré d'erreur entre deux ensembles de données. Autrement dit, l'erreur compare une valeur prédite et une valeur mesurée ou connue.

RMSE est mesurée en faisant la racine carrée de la moyenne de la différence entre la valeur prédite et la valeur observée au carré (erreur). Elle représente l'écart-type de l'échantillon des différences entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées ; c'est-à-dire l'écart-type des résidus ou valeurs résiduelles (erreur de prédiction). Les résidus mesurent la distance qui sépare les points de données de la ligne de régression, RMSE indique à quel point les données sont concentrées autour de la ligne d'ajustement optimale et elle est couramment utilisée en analyse de régression pour vérifier les résultats expérimentaux. Plus une valeur RMSE est petite, plus les valeurs prédites et mesurées sont proches. Elle est calculée comme indiqué dans l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{mes_i} - X_{pré_i})^2}{N}} \quad (3.19)$$

où,

X_{mes_i} : valeurs mesurées au laboratoire,

$X_{pré_i}$: valeurs prédites par le modèle ,

N : nombre d'échantillon allant de 1 à n .

3.4.4.2 Le coefficient de détermination

La régression linéaire a pour objectif de mettre en exergue une relation linéaire entre les valeurs mesurées et celles prédites. Lorsque dans une régression linéaire, on cherche la force d'adéquation ou alors la qualité d'ajustement entre le modèle de cette régression et les valeurs mesurées, on fait appel au coefficient de détermination (R^2). Tout comme la RMSE, le R^2 est un indice de la qualité de la prédiction de la régression linéaire.

Le coefficient de détermination se situe entre 0 et 1 et plus il est proche de 1, plus la corrélation entre les variables est proche de la totale. Mais, si elle est proche de 0, il signale une quasi-absence de corrélation entre les variables. Le coefficient de détermination est obtenu à l'aide de trois paramètres :

- TSS (Total sum of squares) qui mesure le degré de variation des données observées et peut être calculée par $TSS = ESS + RSS$;
- ESS (Explained sum of squares) qui mesure le degré de variation des valeurs modélisées ;

- RSS (Residual sum of squares) qui mesure la variation de l'erreur entre les valeurs mesurées et celles modélisées.

Le coefficient de détermination est donné par le rapport entre la variance totale ou des valeurs mesurées (TSS) et la somme de la variance résiduelle ou inexpliquée (RSS). L'équation suivante permet donc d'obtenir un coefficient de détermination le plus adapté et précis :

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = \frac{TSS - RSS}{TSS} = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.20)$$

ou,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.21)$$

où,

n est le nombre de mesures,

y_i est la valeur de la mesure n° i ,

\hat{y}_i est la valeur prédite correspondante à y_i

\bar{y} est la moyenne des mesures.

3.5 Méthode de simulation numérique

3.5.1 Description du modèle

La simulation de l'écoulement d'eau dans le milieu poreux non saturé à l'aide d'un modèle numérique peut s'avérer très complexe. En outre, ce milieu poreux généralement de nature variable, avec des conditions frontières changeantes souvent avec le temps ne peuvent pas être définies avec certitude au début d'une analyse.

L'équation de Richard a été développée pour décrire l'écoulement de l'eau dans le milieu non saturé. Cette équation est utilisée dans le logiciel SEEP/W pour la modélisation de l'écoulement de l'eau. La modélisation numérique a pour avantages le fait qu'elle permet de faire des prédictions quantitatives et la simulation de l'écoulement au niveau des modèles à géométrie variable et proche

de la réalité, de comparer des alternatives, d'identifier les paramètres contrôlant l'écoulement, et de présenter les résultats sous forme de graphes.

Dans ce cadre de ce travail, le logiciel utilisé pour les simulations numériques est SEEP/W version 2024.1.0 de la compagnie GEOSLOPE International. Ce logiciel permet d'évaluer le comportement hydrogéologique non saturé en régime permanent et transitoire d'un système dont les propriétés des matériaux et les conditions frontières sont connues. Cette étude vise donc à évaluer l'influence de la tourbe sur l'effet d'une couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC). À cet effet, une analyse paramétrique sera réalisée sur les principaux paramètres affectant les propriétés hydriques des matériaux amendés avec la tourbe (configuration de la couverture, conditions frontières). Le niveau de la nappe et l'épaisseur des couches seront fixés.

Le logiciel SEEP/W a été fréquemment utilisé au cours des dernières années pour simuler le comportement hydrogéologique des CEBC (Bussière *et al.*, 2003; Dagenais, 2005; Aubertin *et al.*, 2009; Pabst, 2011; Kalonji Kabambi *et al.*, 2017; Lavoie-Deraspe, 2019). Il offre la possibilité d'aborder de façon concrète les problèmes unidimensionnels et bidimensionnels liés aux écoulements en régimes permanents et transitoires, pour des états de saturations variables (Chapuis *et al.* 1993).

3.5.2 Propriété des matériaux

Dans le cadre de cette modélisation, différentes simulations ont été réalisées en utilisant les courbes de rétention d'eau (CRE) obtenue en laboratoire pour le sable, le silt et leurs mélanges respectifs. Les matériaux employés se divisent en deux catégories distinctes : d'une part, les matériaux fins, amendés ou non avec différentes proportions de tourbe, désignés sous les noms de silt à 15 % de tourbe (Si-15To), silt à 5 % de tourbe (Si-5To) et silt à 0 % de tourbe (Si-0To), qui servira de couche de rétention d'humidité (CRH) dans les CEBC; d'autre part, les matériaux grossiers, également amendés ou non, avec diverses teneurs en tourbe, appelés sable à 15 % de tourbe (Sa-15To), sable à 10 % de tourbe (Sa-10To), sable à 3 % de tourbe (Sa-3To) et sable à 0 % de tourbe (Sa-0To), qui vont jouer le rôle de couche de bris capillaire. Les résidus manitou oxydés (RMO) ont été utilisés pour cette simulation.

Les courbes de rétention d'eau et de conductivité hydraulique pour ces sept matériaux sont illustrées respectivement dans les Figure 3.22Figure 3.23. Le Tableau 3.11 présente les principales

caractéristiques des simulations réalisées. Pour ces simulations, nous avons considéré deux origines probables de la matière organique : (i) les matériaux utilisés pour la CEBC contenaient déjà la matière organique et (ii) la végétation au-dessus de la CEBC peut, au fil du temps, produire de la matière organique qui sera transportée jusqu'aux couches inférieures.

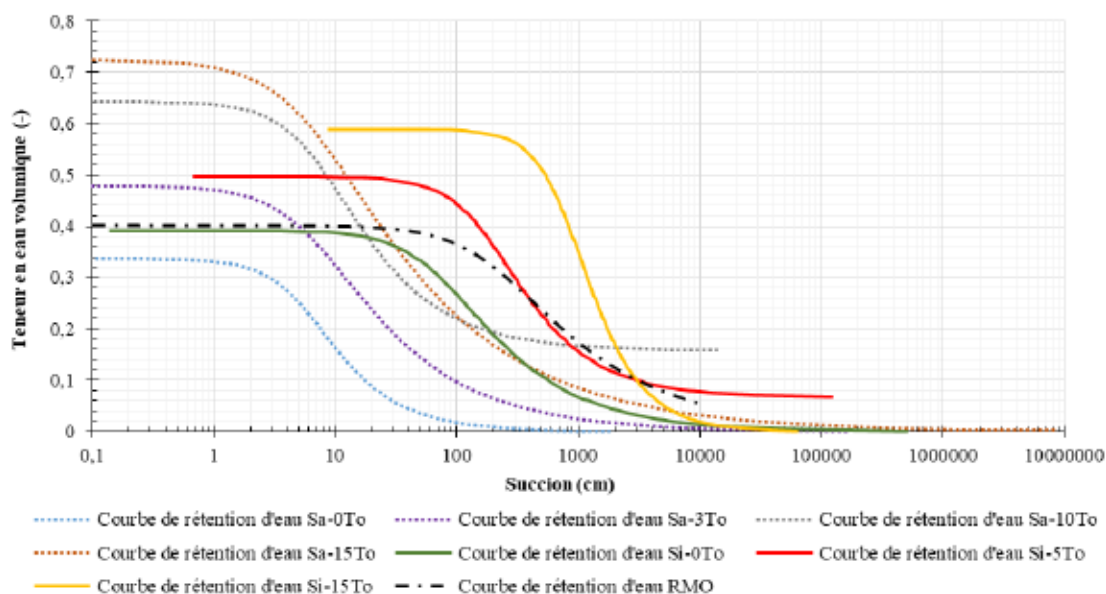


Figure 3.22 CRE des matériaux estimée par le logiciel SEEP/W avec la fonction de van Genuchten (1980).

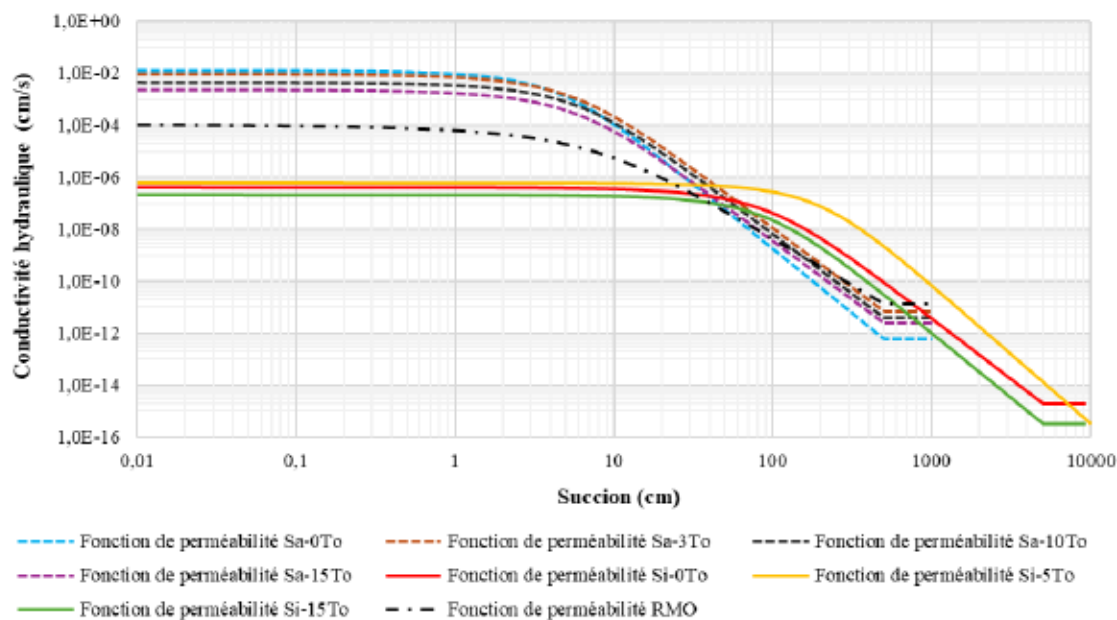


Figure 3.23 Fonctions de conductivité hydraulique des matériaux entrées dans le logiciel SEEP/W.

Tableau 3.11 Principaux paramètres hydrauliques des matériaux utilisés pour les simulations dans SEEP/W.

Matériau	AEV (cm)	θ_r (-)	θ_s (-)	k_{sat} (m/s)	α_{vG} (cm ⁻¹)	n_{vG} (-)
Sa-0To	2,6	0,0009	0,336	$1,34 \times 10^{-4}$	0,1756	2,034
Sa-3To	2,7	0,0012	0,479	$9,34 \times 10^{-5}$	0,149	1,591
Sa-10To	2,9	0,158	0,642	$4,69 \times 10^{-5}$	0,131	1,794
Sa-15To	2,7	0,0018	0,724	$2,26 \times 10^{-5}$	0,154	1,424
Si-0To	29	0,001	0,392	$4,20 \times 10^{-7}$	0,013	1,678
Si-5To	71	0,068	0,496	$6,11 \times 10^{-7}$	0,0055	1,914
Si-15To	398	0,0015	0,589	$2,10 \times 10^{-7}$	0,0012	2,382
RMO	209,6	0,000	0,401	$1,10 \times 10^{-6}$	0,0048	1,52

3.5.3 Géométrie du modèle et procédures de simulation

Les couvertures avec un effet de barrière capillaire simulée seront conçues en systèmes à trois couches, offrant des caractéristiques et des épaisseurs variées. À cet effet, différents choix concernant la géométrie des CEBC (épaisseur et largeur) et les types de matériaux utilisés ont été faits. Ensuite, pour permettre une bonne convergence des paramètres (Annexe E), le maillage a été soigneusement choisi (0,02 m). Enfin, les conditions frontières ont été mises en place et les calculs numériques amorcés.

Toutes les simulations présentées dans cette section ont été effectuées sur la base d'un modèle d'une largeur 1 m, afin d'optimiser les temps de calcul (Figure 3.24). Selon ces simulations, l'épaisseur des matériaux variant de 0,3 à 0,5 m et la profondeur de la nappe phréatique ont été fixées dans le but d'examiner uniquement l'influence de la tourbe sur le comportement hydrique de la CEBC simulée.

À l'origine, la nappe phréatique est localisée au sommet des modèles, ce qui permet une saturation complète des matériaux dès le début (régime permanent). Ensuite, elle est abaissée jusqu'à 5 m sous les modèles (régime transitoire) afin de permettre un drainage libre. Cependant, il convient de préciser que les effets potentiels de l'évaporation n'ont pas été intégrés dans ces simulations.

Concernant la géométrie des scénarios simulés, toutes les configurations commencent avec des couches saturées, la nappe étant élevée au sommet du modèle comme condition initiale, et les parois étant étanches. Par la suite, il est permis à la base du modèle un drainage libre, résultant de l'abaissement du niveau de la nappe à son extrémité inférieure. Dans un contexte d'écoulement transitoire, un laps de temps s'échelonnant de trois (3) heures à soixante (60) jours est établi pour observer l'évolution des états de saturation dans les couches au fil du temps. Les scénarios étudiés ici sont faits d'une couche de silt amendée ou non, comprise entre deux couches de sable amendées ou non, avec des épaisseurs constantes de 0,3 m. La couche de silt amendée ou non a une épaisseur fixée à 0,5 m et celle de la couche des résidus reste fixée à 1 m comme il est montré sur la Figure 3.24.

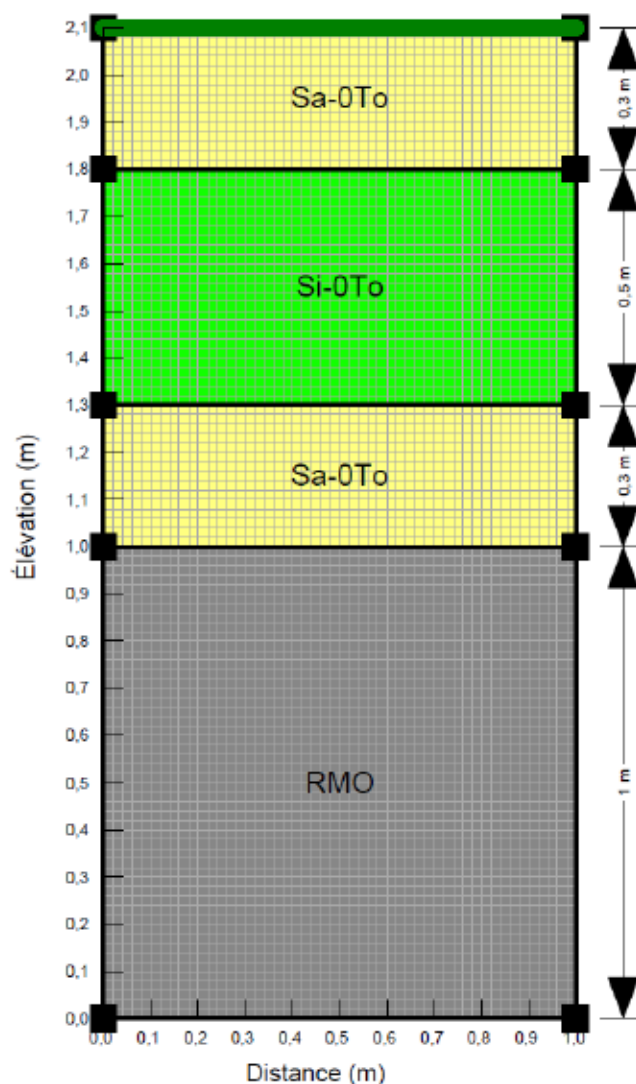


Figure 3.24 Exemple de géométrie du modèle simulé avec SEEP/W.

**CHAPITRE 4 ARTICLE : ORGANIC MATTER CONTENT
INFLUENCE ON THE HYDRAULIC PROPERTIES OF SANDY
MATERIAL**

Adrien Cabrel Djomo Bouyem, Abdelkabir Maqsooud and Tikou Belem. Organic matter content influence on the hydraulic properties of sandy material (submission date: jan 13, 2025). *Agrosystems, Geosciences & Environment*.

Abstract

The cover performance is mainly evaluated using hydraulic properties such as volumetric water content (VWC), suction and saturated hydraulic conductivity. However, these properties can be affected by factors such as soil mineralization, temperature, and organic matter content (OMC) making it challenging to accurately assess cover performance.

To better understand the impact of OMC on hydraulic properties, this study was initiated with two objectives: (i) evaluating the effect of OMC on the water retention curve (WRC) and saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) of a sandy material, and (ii) proposing equations to predict the WRC of sand amended with organic matter using the Fredlund & Xing model.

This was accomplished through laboratory tests that determined the WRC and k_{sat} of sand and mixture with varying concentrations of peat (OM).

The investigation results indicate the air entry value (AEV - the suction at which the material begins to desaturate) evaluated using the sand mixture WRC did not show any notable variation. The k_{sat} of the sand- mixtures decreases with increasing peat concentration.

In terms of prediction, the results obtained for the six mixtures tested in the laboratory showed an excellent agreement between predicted and experimental values, demonstrating the high accuracy with which the water retention curves were predicted.

Keywords: Water retention curve, saturated hydraulic conductivity, volumetric water content, Fredlund & Xing model, peat, suction, prediction.

Introduction

The description of water flow in unsaturated materials depends on prior knowledge of their unsaturated properties. Studies examining the factors that control soil water retention capacity have identified bulk density (Gupta & Larson, 1979), particle size distribution (Gupta & Larson, 1979; Arya *et al.*, 1999), structure (Jamison, 1953) and organic matter content (Gupta & Larson, 1979) as being of primary importance.

Organic matter (OM) is known for its high water retention capacity functioning like a sponge in the soil (Husein Malkawi *et al.*, 1999; José Ricardo da Rocha *et al.*, 2011; Adugna, 2016), by retaining and storing water, which leads to a high water adsorption capacity. This can reduce soil saturated hydraulic conductivity (k_{sat}), particularly when large amounts of OM are added. However, it is important to note that the reduction in k_{sat} is not always observed and may depend on various factors, such as the type of OM added, environmental conditions, and the initial material (without OM). Nevertheless, other studies have found that OM is not a prerequisite for accurately estimating soil water retention properties (Arya & Paris, 1981; Kern, 1995; Kozak & Ahuja, 2005; Nemes & Rawls, 2006). This suggests that OM has a minimal and potentially insignificant influence on the regulation of soil water retention capacities.

Several studies have been conducted to determine the impact of incorporating OM into soils on their physical properties. Some authors have found that the presence of OM increases the k_{sat} in both fine and coarse materials (Mathers & Stewart, 1984; Zebarth *et al.*, 1999; Nayak *et al.*, 2017). Conversely, Demir and Dogan Demir (2019) suggest that increasing of OM reduces the k_{sat} of sandy soils. Eusufzai and Fujii (2012) reported that the application of compost, rice straw, and sawdust to clay loams increases the soil's k_{sat} due to the enhanced soil aggregation and macroporosity. Similarly, El Halim and El Baroudy (2014) concluded that the addition of fine and fresh sawdust increases the k_{sat} of clay loam. This occurs because OM associated with soil particles, forms aggregates, which can increase soil porosity (Proteau, 2021).

Soil OM C has been shown to significantly influence soil water retention (Rawls *et al.*, 2003; Olness & Archer, 2005; Saxton & Rawls, 2006). According to Fernandez-Rueda Ma and Paz-Gonzalez (1998), the soil's water retention capacity increases with the OM content (OMC), at low suction particularly near saturation. Rawls *et al.* (2003) and Nong *et al.* (2019) went further and suggest that an increase in OMC indicates an increase in water retention in sandy soils (clean sand),

while a decrease in water retention in fine-textured soils (clayey)/clayey sand. Reina-Leal *et al.* (2019) found that an increase in OMC leads to an increase in water content and a decrease in air entry value (AEV) in kaolinite material. Similarly, Ankenbauer and Loheide (2017) observed that soils with lower OMC tend to retain less moisture than those with higher OMC. However, in studies of large datasets with a wide range of sand, silt, and clay fractions and modest amounts of organic matter (< 8%), the effects of OMC on soil retention capacity are highly dependent on the texture and initial organic carbon content of the material (Rawls *et al.*, 2003; Olness & Archer, 2005; Saxton & Rawls, 2006). OM can hold up to 20 times its weight in water. Peat with a high fiber content and large active porosity can release up to 80% of its water content through drainage. In contrast, more decomposed peat samples release less than 10% of their water to drainage (Boelter, 1968).

Predicting the water retention properties of materials has been a key focus of the geotechnical and hydrogeological communities for several decades. Numerous predictive models have been proposed (Brooks & Corey, 1964; Haverkamp & Parlange, 1986; Aubertin *et al.*, 1998; Mbonimpa *et al.*, 2000; Aubertin *et al.*, 2003), but none account for the presence of OM. To this date, this factor has only been considered by the soil physics community (Vereecken *et al.*, 1989; Aubertin *et al.*, 1996c; Wösten *et al.*, 2001; Bruand *et al.*, 2003; Weynants *et al.*, 2009). Understanding these properties is essential for evaluating soil's potential to support a specific crop. However, regardless of the field, two principal WRC predictive models have been developed using geotechnical properties (Haverkamp *et al.*, 1999). These models can be classified into two distinct categories: (i) functional regression models and (ii) physically based models.

The objective of this paper is to evaluate the effect of OMC on the WRC and k_{sat} of sandy material and to establish predictive tool for the WRC. To achieve this, laboratory tests were conducted to determine the WRC and k_{sat} of sandy material amended with peat and at varying concentrations.

Materials and methods

The base material employed in this study was sand, from which mixtures were prepared by adding varying amounts of peat. The sandy material was sampled in pit located in Abitibi region and the peat was bought on the market. The various analyses and tests on the materials were carried out at a temperature of 22 ± 0.5 °C.

Materials characterization

Physical properties such as bulk density and particle size distribution were evaluated under laboratory conditions for sandy material and peat. The Quantachrome Ultrapyc 1200e Helium Pycnometer was employed to determine the bulk density. The particle size distribution of the sand and mixtures were assessed using a laser diffraction instrument (MASTERSIZER 3000) with dry material dispersion from Malvern Panalytical, as well as a series of seven sieves, with diameters ranging from 5 mm (No. 4) to 80 mm (No. 200) (ASTM D422-63).

Figure 4.1 shows the particle size distribution curve of these different materials.

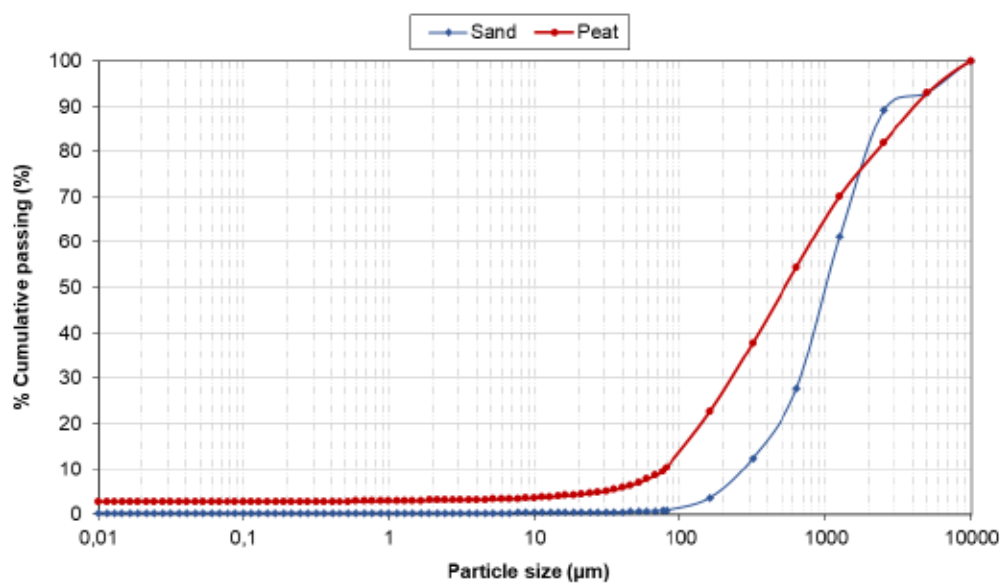


Figure 4.1 Particle size distribution curve for sand, and peat.

Key parameters were extracted from the GSD curves and listed in Table 1. D_{10} , D_{60} and D_{90} represent the diameters corresponding to 10%, 60% and 90% passing on the cumulative GSD curve, respectively (see Table 1). The coefficient of uniformity was calculated as $C_U = D_{60}/D_{10}$. This Table shows that D_{10} is ranging from 78.80 to 261.17 µm, D_{60} from 802.77 to 1217.37 µm, C_U is included between 4.66 and 10.19, and G_s from 1.60 to 2.79, respectively for peat and sand (see Table 4.1).

Based on the Unified Soil Classification System (USCS), results indicate that the sand is classified as poorly graded sand (SP) or gravelly sand. Sand-peat mixtures have a particle size distribution corresponding to poorly graded sand (SP) or gravelly sand, except for the 12.5% peat mixture, which is classified as well graded sand (SW).

Tableau 4.1 Materials and the different mixtures geotechnical properties.

	D ₁₀ (µm)	D ₆₀ (µm)	D ₉₀ (µm)	C _u (-)	C _c (-)	USCS	G _s (-)	n (-)
<i>Peat content (%)</i>	<i>Sand and peat mixtures</i>							
0 % Pt	261.17	1217.37	2903.06	4.66	1.37	SP	2.79	0.40
1 % Pt	202.73	1032.52	2260.70	5.09	1.20	SP	2.77	0.36
3 % Pt	222.09	1087.44	2229.82	4.90	1.33	SP	2.73	0.36
5 % Pt	233.98	1162.78	2308.21	4.97	1.48	SP	2.69	0.38
7.5 % Pt	232.32	1164.28	2407.20	5.01	1.45	SP	2.64	0.41
10% Pt	213.13	1192.86	2462.93	5.60	1.48	SP	2.60	0.47
12.5 % Pt	194.27	1094.68	2241.92	5.63	1.37	SP	2.55	0.50
15 % Pt	180.83	1111.83	2368.38	6.15	1.32	SW	2.51	0.51
100 % Pt	78.80	802.77	4157.54	10.19	0.78	-	1.60	0.89

Permeability measurement

The saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) of both amended and unamended materials was determined using the constant load rigid-wall permeability test for sand and its mixtures in accordance with ASTM D5084-16a.

The rigid wall permeameter has an internal diameter of 11.4 cm, and a maximum height of 21 cm. The material prepared with a slight moisture content (about 5% of the mass of the dry material in water), was placed in thin layers and carefully densified to avoid the build-up of pore pressure. The permeability test was performed with Mariotte bottle under constant head, which allowed for the evaluation of the hydraulic gradient (i of 1 to 3) on the measurements. The saturated hydraulic conductivity (k_{sat} in cm/s) was calculated using the following formula:

$$k_{sat} = \frac{V_w \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (4.1)$$

with,

V_w volume of water (cm³)

L sample length (cm)

A sample section (cm²)

T time (s)

Δh difference in height or load (cm)

Water retention curve measurement

The water retention curves (WRC) were obtained through drying processes. Suction (ψ) were measured by the sandbox for sand and its mixtures (see Figure 4.2).

The assembled sandbox consists of a box filled with fine synthetic sand, which is covered with a nylon filter cloth. At the bottom of the box there is a PVC-pipe drainage system. This sandbox can be used to apply a range of pressures from pF 0 (saturation) to pF 2.0 (10 kPa). The sample core rings, which are initially saturated are placed on top of the filter cloth to take measurements. During these tests, the various water contents obtained as a function of imposed suction were used to build the water retention curve.



Figure 4.2 Sandbox device used for WRC measurement.

Water retention curve prediction

To develop a model for predicting the water retention curve, the Fredlund and Xing (1994) model was used. The model is described by the following equations:

$$\theta(\psi, a_f, m_f, n_f) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \quad (4.2)$$

where,

$$\theta C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{\ln[1 + (\psi_0/\psi_r)]} \quad (4.3)$$

with the saturated water content (θ_s), the Euler number or Neper constant ($e \approx 2.71828$), the shape or fit parameters (a_f , m_f and n_f), the suction corresponding to the residual water content ψ_r , the dry suction ψ_0 and the matrix suction ψ .

$$a_f = \psi_i \quad (4.4)$$

$$m_f = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad (4.5)$$

$$n_f = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3,71s^* \quad (4.6)$$

$$s = \frac{\theta_i}{\ln(\psi_p/\psi_i)} \quad (4.7)$$

$$s^* = \frac{s}{\theta_s} \quad (4.8)$$

where ψ_p , is the intercept of the tangent line on the semilog plot and the matrix-suction axis, s denote the slope of the tangent line on the semilog plot, ψ_i and θ_i represent the inflection point on the semilog plot (see Figure 4.3 for parameters determination).

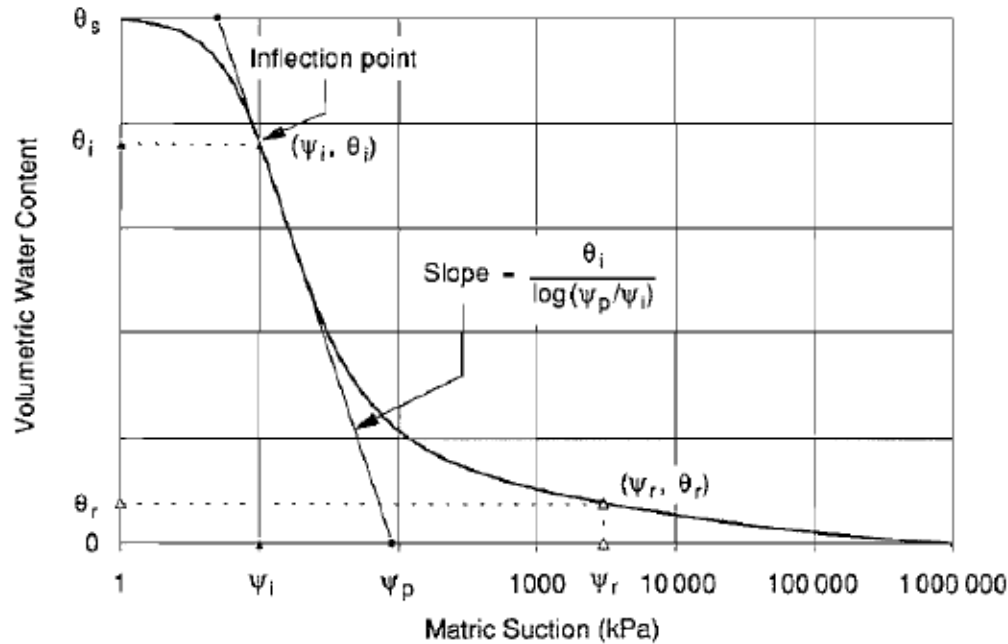


Figure 4.3 Graphical determination of Fredlund and Xing (1994) parameters.

The Fredlund and Xing (1994) was in first used to fit the measured water retention curves of peat mixture then fitted model parameters were coupled with multiple linear regression analysis to develop the predictive equations.

Results and discussion

Results of saturated hydraulic conductivity

The saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) measurement results of sand and its various mixtures with peat are presented in Table 4.2. The representative k_{sat} value are determined by taking the arithmetic mean of the values obtained during the measurements at a different hydraulic load.

Tableau 4.2 Measured hydraulic conductivity of sand and its mixtures with peat.

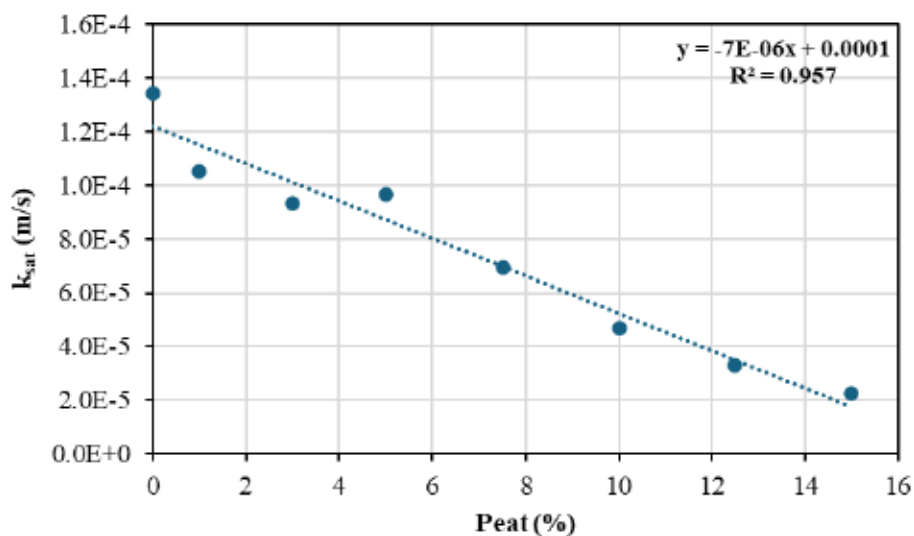
Materials	Porosity n (-)	Voids index e (-)	k_{sat} measured (m/s)	Standardised k_{sat} to n = 0.40 (m/s)
0 % Pt	0.41	0.70	1.34×10^{-4}	1.08×10^{-4}
1 % Pt	0.36	0.56	1.05×10^{-4}	2.50×10^{-4}
3 % Pt	0.36	0.55	9.34×10^{-5}	2.42×10^{-4}
5 % Pt	0.38	0.60	9.66×10^{-5}	1.60×10^{-4}

Tableau 4.2 Measured hydraulic conductivity of sand and its mixtures with peat. (suite)

Materials	Porosity n (-)	Voids index e (-)	k_{sat} measured (m/s)	Standardised k_{sat} to n = 0.40 (m/s)
7.5 % Pt	0.41	0.71	6.93×10^{-5}	5.36×10^{-5}
10% Pt	0.47	0.89	4.69×10^{-5}	1.45×10^{-5}
12.5 % Pt	0.50	0.99	3.30×10^{-5}	7.28×10^{-6}
15 % Pt	0.51	1.06	2.26×10^{-5}	4.09×10^{-6}
100 % Pt	0.89	8.39	2.47×10^{-4}	3.56×10^{-6}

The measured k_{sat} values for both sand and its mixtures are between 1.34×10^{-4} m/s and 2.26×10^{-5} m/s (medium permeability materials), with porosities ranging from 0.36 to 0.51. Furthermore, it can be observed that the addition of peat leads to a slight reduction in k_{sat} compared to that of sand alone. This suggests that the presence of peat enhances the material's retention capacity, which can be attributed to peat's naturally high retention capacity. Similarly, Khlosi *et al.* (2013) found that incorporating high organic matter content into mineral soil improves the soil's ability to retain water.

The results of the measurements were used to determine the correlation between organic matter (OM) content and k_{sat} (see Figure 4.4). The analysis shows that the R^2 value is 0.96, indicating a strong correlation between the parameters.

Figure 4.4 Correlation between peat content and k_{sat} .

A comparative approach to these k_{sat} is challenging due to different used porosities of the samples. For this reason, the normalised k_{sat} to a porosity of 0.40, was calculated using the equation proposed by Taylor (1948) :

$$\log k_{sat} = \log k_{sat_0} - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (4.9)$$

With $C_k = 0.5e_0$, the normalization index of saturated hydraulic conductivity.

The standardised k_{sat} have the same behaviours as the measure one.

Measured water retention curve

The measured water retention curves are presented in Figure 4.5. Theses WRC were fitted using Fredlund and Xing (1994) model and used to evaluate the air entry value (AEV). These AEV were evaluated using tangent method (Aubertin *et al.*, 2003) (see Table 4.3).

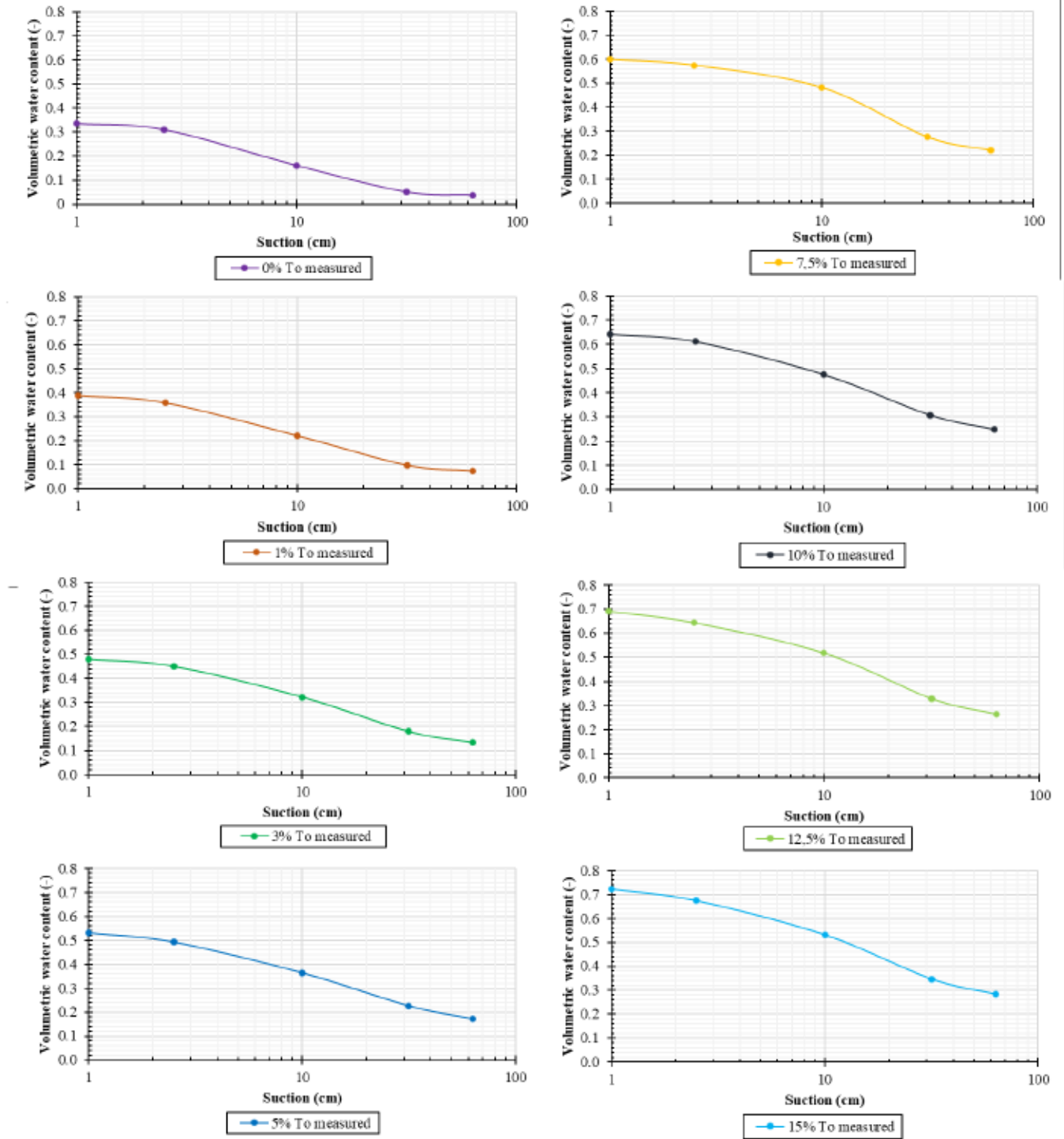


Figure 4.5 Water retention curves for sand and sand mixtures.

Tableau 4.3 Summary of the AEV, θ_s and ψ_r values for sand and its mixtures.

Peat (%)	AEV (cm)	ψ_i (cm)	ψ_p (cm)	ψ_r (cm)	θ_i (-)
0	2.7	3.9	42	42	0.26
1	2.6	3.8	80	40	0.30
3	3	10	300	76	0.32
5	2.5	6	600	86	0.48
7.5	5.3	16	130	80	0.42
10	3.3	11	230	75	0.46
12.5	3	15	200	80	0.46
15	2.6	14	230	80	0.50
100	4.8	16.5	900	250	0.80

Table 4.3 shows that, except for the peat content of 7.5%, and considering potential errors in assessment, the AEV did not exhibit significant variation. For ψ_i , an upward trend in values was observed, increasing from 3.9 cm to 16.5 cm for 0% and 100% peat content, respectively. A similar trend was observed for θ_i , where the value increased from 0.26 to 0.8 for 0% and 100% peat content, respectively.

Fredlund and Xing WRC parameters, along with geotechnical parameters, were used to develop equations for predicting the Fredlund and Xing parameters.

Integration of OMC in the WRC prediction

The first step to establish the equations for the integration of the OMC to the Fredlund and Xing model, was to evaluate the correlation between the different basic geotechnical parameters of used sandy mixture and WRC fitted parameters. An identical approach, with correlation analyses, was used by Maqsood *et al.* (2013) and Maqsood (2022) to establish links between sandy mixture, OMC and WRC parameters. The matrix of the correlation between the different parameters was evaluated using the XLSTAT (2024). Results of the correlation analyses are presented in Table 4.4. In this table, the strongest correlations between the different parameters are shown in bold. Also, one can observe that ψ_i is correlated positively to θ_s and G_s , ψ_p is correlated to D_{10} , D_{90} , C_u and G_s , ψ_r is correlated to θ_s and C_u and θ_i is correlated to θ_s and OMC.

Tableau 4.4 Correlation matrix between different parameters.

Variables	θ_1 (-)	To (%)	$P_{<80\mu m}$ (%)	$P_{<40\mu m}$ (%)	D_{10} (μm)	D_{20} (μm)	D_{30} (μm)	D_{40} (μm)	D_{50} (μm)	D_{60} (μm)	D_{70} (μm)	D_{80} (μm)	D_{90} (μm)	$C_{U(-)}$	$C_{C(-)}$	G_s (-)	ψ_1 (cm)	ψ_r (cm)	ψ_p (cm)	θ_1 (-)
θ_1 (-)	1	0.839	0.838	-0.838	-0.867	-0.814	-0.750	-0.752	-0.726	-0.664	-0.422	0.587	0.606	-0.308	-0.324	-0.890	0.841	0.860	0.700	0.953
To (%)	0.839	1	0.997	-0.997	-0.930	-0.937	-0.918	-0.958	-0.937	-0.876	-0.572	0.806	0.913	-0.742	-0.636	-0.995	0.542	0.980	0.814	0.904
$P_{<80\mu m}$ (%)	0.838	0.997	1	-1.000	-0.946	-0.953	-0.936	-0.967	-0.947	-0.891	-0.600	0.782	0.904	-0.717	-0.673	-0.993	0.528	0.969	0.803	0.899
$P_{<40\mu m}$ (%)	-0.838	-0.997	-1.000	1	0.946	0.953	0.936	0.967	0.947	0.891	0.600	-0.782	-0.904	0.717	0.673	0.993	-0.528	-0.969	-0.803	-0.899
D_{10} (μm)	-0.867	-0.930	-0.946	0.946	1	0.993	0.976	0.960	0.954	0.929	0.746	-0.572	-0.737	0.523	0.734	0.943	-0.578	-0.893	-0.724	-0.877
D_{20} (μm)	-0.814	-0.937	-0.953	0.946	0.993	1	0.994	0.983	0.981	0.962	0.783	-0.580	-0.767	0.595	0.791	0.938	-0.519	-0.895	-0.725	-0.841
D_{30} (μm)	-0.750	-0.918	-0.936	-0.936	0.994	0.994	1	0.987	0.989	0.980	0.823	-0.551	-0.766	0.625	0.852	0.910	-0.455	-0.865	-0.691	-0.783
D_{40} (μm)	-0.752	-0.958	-0.967	0.946	0.987	0.987	0.987	1	0.997	0.975	0.772	-0.645	-0.837	0.730	0.806	0.943	-0.446	-0.920	-0.759	-0.814
D_{50} (μm)	-0.726	-0.937	-0.947	0.947	0.989	0.989	0.989	0.997	1	0.989	0.815	-0.593	-0.805	0.722	0.830	0.920	-0.428	-0.899	-0.745	-0.786
D_{60} (μm)	-0.664	-0.876	-0.891	0.891	0.980	0.980	0.980	0.975	0.989	1	0.892	-0.469	-0.719	0.684	0.868	0.857	-0.387	-0.838	-0.699	-0.717
D_{70} (μm)	-0.422	-0.572	-0.600	0.600	0.746	0.783	0.823	0.772	0.815	0.892	1	-0.022	-0.340	0.426	0.840	0.556	-0.235	-0.543	-0.474	-0.439
D_{80} (μm)	0.587	0.806	0.782	-0.782	-0.572	-0.580	-0.551	-0.645	-0.593	-0.469	-0.022	1	0.937	-0.726	-0.293	-0.787	0.327	0.777	0.609	0.690
D_{90} (μm)	0.606	0.913	0.904	-0.904	-0.737	-0.767	-0.766	-0.837	-0.805	-0.719	-0.340	0.937	1	-0.849	-0.589	-0.881	0.299	0.863	0.681	0.717
$C_{U(-)}$	-0.308	-0.742	-0.717	0.717	0.523	0.595	0.625	0.730	0.722	0.684	0.426	-0.726	-0.849	1	0.545	0.675	-0.061	-0.739	-0.666	-0.481
$C_{C(-)}$	-0.324	-0.636	-0.673	0.673	0.734	0.791	0.852	0.806	0.830	0.868	0.840	-0.293	-0.589	0.545	1	0.599	-0.085	-0.527	-0.340	-0.357
G_s (-)	-0.890	-0.995	-0.993	0.993	0.943	0.938	0.910	0.943	0.920	0.857	0.556	-0.787	-0.881	0.675	0.599	1	-0.609	-0.979	-0.807	-0.934
ψ_1 (cm)	0.841	0.542	0.528	-0.528	-0.578	-0.519	-0.455	-0.446	-0.428	-0.387	-0.235	0.327	0.299	-0.061	-0.085	-0.609	1	0.588	0.333	0.673
ψ_r (cm)	0.860	0.980	0.969	-0.969	-0.893	-0.865	-0.865	-0.920	-0.899	-0.838	-0.543	0.777	0.863	-0.739	-0.527	-0.979	0.588	1	0.887	0.931
ψ_p (cm)	0.700	0.814	0.803	-0.803	-0.724	-0.725	-0.691	-0.759	-0.745	-0.699	-0.474	0.609	0.681	-0.666	-0.340	-0.807	0.333	0.887	1	0.854
θ_1 (-)	0.953	0.904	0.899	-0.899	-0.877	-0.841	-0.783	-0.814	-0.786	-0.717	-0.439	0.690	0.717	-0.481	-0.357	-0.934	0.673	0.931	0.854	1

After graphical determination of Fredlund and Xing parameter, regression equations were developed from the independent parameters to determine the parameters (ψ_i , ψ_p , ψ_r and θ_i).

The obtained equations can be expressed as follow:

$$\psi_i = a_{\psi_i} + b_{\psi_i}\theta_s + c_{\psi_i}Gs \quad (4.10)$$

$$\psi_p = a_{\psi_p} + b_{\psi_p}Gs + c_{\psi_p}Cu + d_{\psi_p}\theta_s + e_{\psi_p}D_{90} + f_{\psi_p}To + g_{\psi_p}D_{10} \quad (4.11)$$

$$\psi_r = a_{\psi_r} + b_{\psi_r}\theta_s + c_{\psi_r}Cu \quad (4.12)$$

$$\theta_i = a_{\theta_i} + b_{\theta_i}\theta_s + c_{\theta_i}To \quad (4.13)$$

The equation parameters are presented in Table 4.5.

Tableau 4.5 Predicted coefficients for the Fredlund and Xing model parameters.

	Coefficient	Value	R ²
Equation 4.10	a_{ψ_i}	-35.4216	0.800
	b_{ψ_i}	37.7564	
	c_{ψ_i}	9.2763	
Equation 4.11	a_{ψ_p}	-20406.4926	0.999
	b_{ψ_p}	5065.2570	
	c_{ψ_p}	1534.5671	
	d_{ψ_p}	-7455.0315	
	e_{ψ_p}	-3.1140	
	f_{ψ_p}	253.8051	
	g_{ψ_p}	41.1196	
Equation 4.12	a_{ψ_r}	150.8012	0.994
	b_{ψ_r}	225.3533	
	c_{ψ_r}	-38.9393	
Equation 4.13	a_{θ_i}	0.0914	0.972
	b_{θ_i}	0.5408	
	c_{θ_i}	1.7718×10^{-3}	

The obtained coefficient of correlation R^2 are included between 0.800 to 0.999. To compare the fitting and calculated parameters, statistical analyses were performed to evaluate the root mean square and the coefficient of determination (see Table 4.6 for equations).

Tableau 4.6 Statistics to evaluate the accuracy of the equations.

Statistic	Formula	Optimal value
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{mes_i} - X_{pré_i})^2}{N}} \quad (4.14)$	0
Coefficient of determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.15)$	1

The calculated parameters were used to predict the WRC by using Fredlund and Xing model. Comparisons between measured values and those predicted by regression of the various parameters are presented in Figure 4.6.

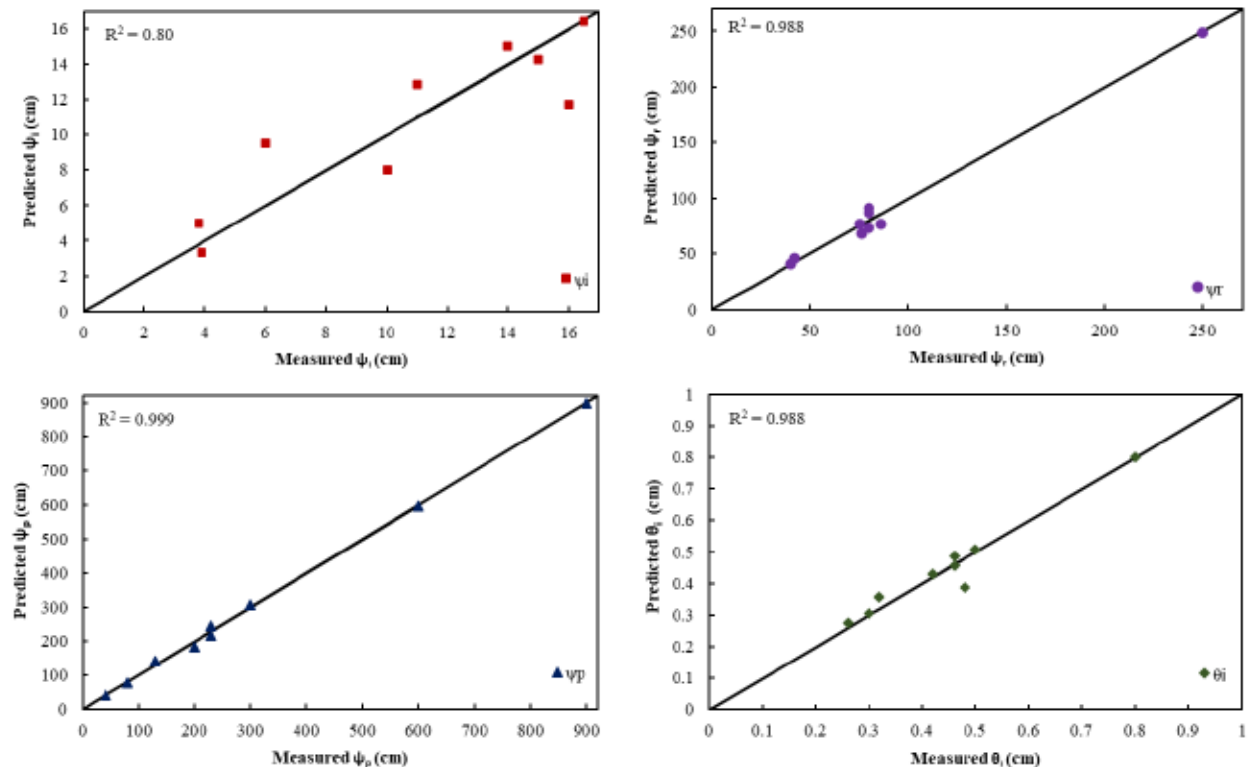


Figure 4.6 Predicted parameter plotted against observed.

The performance of the proposed equations in predicting the Fredlund and Xing WRC of sandy mixture with OMC are presented in Table 4.7. The obtains RMSE and R^2 range respectively from 3.13×10^{-2} to 1.18×10^{-2} and from 0.979 to 0.998. These indicators show a good correlation between the measured and the calculated volumetric water content values (using the Fredlund and Xing equation). All measured and calculated volumetric water content are compared in the Figure 4.7. This last figure shows a slight overestimation and underestimation testifying, in a way, to the relevance of the proposed regressions for predicting the water retention characteristics of mixtures. Unfortunately, no test was performed with order peat content (higher than 15 %) to validate the proposed equations.

Tableau 4.7 Adjusted performance indicators of predicting equation for WRC.

	SSD	MSE	RMSE	R^2
100% Sa + 0% To	2.94×10^{-3}	5.88×10^{-4}	2.42×10^{-2}	9.85×10^{-1}
99% Sa + 1% To	6.91×10^{-4}	1.38×10^{-4}	1.18×10^{-2}	9.98×10^{-1}
97% Sa + 3% To	1.66×10^{-3}	3.33×10^{-4}	1.82×10^{-2}	9.98×10^{-1}
95% Sa + 5% To	2.72×10^{-3}	5.44×10^{-4}	2.33×10^{-2}	9.96×10^{-1}
92.5% Sa + 7.5% To	5.54×10^{-3}	1.11×10^{-3}	3.33×10^{-2}	9.97×10^{-1}
90% Sa + 10% To	2.92×10^{-3}	5.84×10^{-4}	2.42×10^{-2}	9.89×10^{-1}
87.5% Sa + 12.5% To	4.89×10^{-3}	9.77×10^{-4}	3.13×10^{-2}	9.85×10^{-1}
85% Sa + 15% To	4.70×10^{-3}	9.40×10^{-4}	3.07×10^{-2}	9.79×10^{-1}

SSD (Sum of squared deviations); MSE (Mean squared error); RMSE (Root mean square error); R^2 (Coefficient of determination) and r (Pearson correlation coefficient).

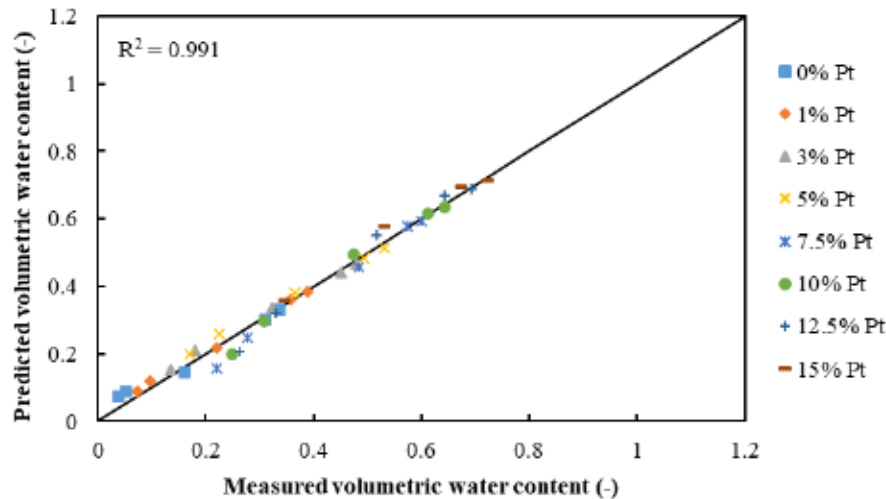


Figure 4.7 Predictions of volumetric water content plotted against measurements.

Conclusion

Experimental tests were performed to evaluate the influence of OM on the WRC and the k_{sat} of sand amended with varying amounts of OM.

The results demonstrate that an increase in OMC leads to a reduction in k_{sat} for sandy mixture materials, which is attributed to an enhancement in the retention capacity of the mixture material. Conversely, the results indicate that as the OMC increases, the WRC shifts upward and to the right, resulting higher water contents for a given suction value. The AEVs of the mixtures were almost the same, except for the 7.5% peat mixture, where an increase was observed compared to the other mixtures.

The predicted results using the procedure proposed in this paper show a good correlation with the measured volumetric water content data for sandy mixtures, with $R^2 \geq 0.977$. The water retention curve equation proposed for the different Fredlund and Xing (1994) parameters has been shown to be effective in predicting the WRC of sandy mixtures with OM. In situation where experimental data on the measured WRC of the mixtures are not available, the proposed equations can be used to estimate their hydrogeological properties.

The findings from this research will be valuable for understanding and predicting the WRC of material amended with peat. Additionally, they can assist in evaluating the impact of peat on the performance of cover system used in mine site reclamation, such as covers with capillary barrier effects (CCBEs).

CHAPITRE 5 COMPLÉMENT DE RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, on présente le complément des résultats de ces travaux et qui n'ont pas été présentés dans l'article soumis pour publication. Ainsi on présente les résultats des mesures de k_{sat} , les CRE et le modèle proposé pour la prédiction des CRE du silt et de ses mélanges. Par la suite, des résultats des simulations numériques relatif à un recouvrement de type CEBC conçu à base de matériaux naturels et amendés.

5.1 Résultats des caractérisations hydrogéotechniques du silt et ses mélanges

5.1.1 Conductivité hydraulique saturée du silt et ses mélanges

Les résultats des mesures de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) du silt et de ses différents mélanges avec la tourbe, sont présentés dans le

Tableau 5.1. Ces mesures ont été faites à l'aide du perméamètre à parois flexible. La valeur de k_{sat} considérée comme représentative est déterminée en faisant la moyenne arithmétique des valeurs obtenues lors des mesures en fonction des différentes charges hydrauliques. Une approche comparative de ces k_{sat} est difficile en raison des différentes porosités utilisées pour les échantillons. C'est pourquoi la k_{sat} normalisée pour une porosité de 0,40 a été calculé à l'aide de l'équation proposée par Taylor (1948) :

$$\log k_{sat} = \log k_{sat_0} - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (5.1)$$

avec $C_k = 0,5e_0$, l'indice de normalisation de la conductivité hydraulique saturée.

Tableau 5.1 Conductivité hydraulique mesurée du silt et ses mélanges avec la tourbe.

Échantillon	Porosité n (-)	k_{sat} mesurée (m/s)	k_{sat} normalisée n = 0,40 (m/s)	Différence entre les k_{sat} (m/s)
Silt (Si)	0,36	$4,20 \times 10^{-7}$	$9,56 \times 10^{-7}$	$1,44 \times 10^{-7}$
1% To	0,43	$5,31 \times 10^{-7}$	$3,37 \times 10^{-7}$	$-9,47 \times 10^{-6}$
3% To	0,35	$5,40 \times 10^{-7}$	$1,71 \times 10^{-6}$	$-1,26 \times 10^{-6}$
5% To	0,48	$6,11 \times 10^{-7}$	$1,79 \times 10^{-7}$	$-1,09 \times 10^{-5}$
7,5% To	0,57	$4,05 \times 10^{-7}$	$4,20 \times 10^{-8}$	$-2,00 \times 10^{-5}$

Tableau 5.1 Conductivité hydraulique mesurée du silt et ses mélanges avec la tourbe. (suite)

Échantillon	Porosité n (-)	k_{sat} mesurée (m/s)	k_{sat} normalisée n = 0,40 (m/s)	Différence entre les k_{sat} (m/s)
10% To	0,60	$3,47 \times 10^{-7}$	$2,75 \times 10^{-8}$	$-3,64 \times 10^{-4}$
12,5% To	0,64	$3,66 \times 10^{-7}$	$2,10 \times 10^{-8}$	$-4,47 \times 10^{-5}$
15% To	0,66	$2,10 \times 10^{-7}$	$1,01 \times 10^{-8}$	$-1,04 \times 10^{-4}$
Tourbe	0,89	$2,47 \times 10^{-4}$	$3,56 \times 10^{-6}$	$-5,86 \times 10^{-4}$

Une approche comparative de ces conductivités hydrauliques saturée (k_{sat}) est difficile à envisager, du fait des porosités différentes des échantillons. Toutefois, nous constatons que le silt et ses mélanges, malgré une diminution de la conductivité hydraulique saturée suivant l'augmentation de la teneur en tourbe, les valeurs de k_{sat} restent dans l'ordre de 10^{-7} m/s. Les porosités des mélanges variaient de 0,36 à 0,66 et les k_{sat} normalisées à $n = 0,40$ ont les mêmes comportements que celles mesurées. Ainsi pour les mélanges silt-tourbe, on observe que les k_{sat} décroissent avec l'ajout de teneurs en tourbe. De façon générale, on constate une augmentation de la porosité et une réduction de la k_{sat} dans ces mélanges, or c'est la porosité qui contrôle la perméabilité. De ce fait, une hausse de la porosité devrait provoquer une augmentation de la valeur de la k_{sat} . Cette contradiction dans les résultats pourrait suggérer une cause due à la capacité de rétention élevée de la tourbe.

5.1.2 Courbe de rétention d'eau du silt et ses mélanges

Les résultats des essais de rétention d'eau ont permis d'établir et d'évaluer les courbes de rétention d'eau des différents matériaux (le silt et la tourbe) (Figure 5.1) et les mélanges (Figure 5.2). Pour la tourbe, les courbes de rétention d'eau ont été obtenues à l'aide des essais sur la table à tension. En revanche, pour le silt et ses différents mélanges, les cellules de pressions avec des pierres poreuses de 300 kPa ont été utilisées. La valeur d'entrée d'air (AEV), la teneur en eau saturée (θ_s) et la teneur en eau résiduelle (θ_r) peuvent être déterminées en utilisant ces courbes de rétention d'eau ajustées avec le modèle de van Genuchten (vG) en utilisant le code RETC (pour $m = 1 - 1/n$) (van Genuchten et al., 1991). Ces valeurs sont très utiles pour l'analyse du comportement des matériaux en conditions non saturées.

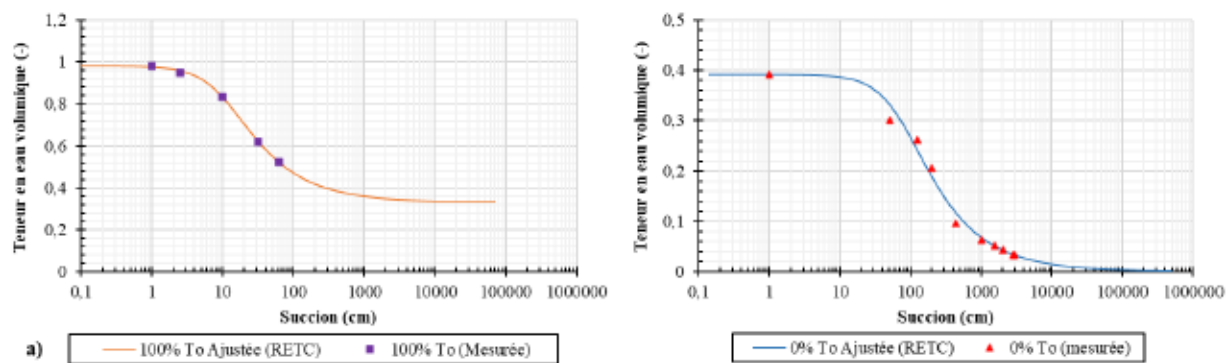


Figure 5.1 Courbes de rétention d'eau de la tourbe (a) et du silt (b).

Cette figure montre que la tourbe à une θ_s et une θ_r très élevées par rapport à celles du silt, mais une AEV plus faible que celle du silt. Le silt et la tourbe, présentent des pentes douces, ce qui indiquerait une distribution de la taille des pores avec une prédominance des pores de taille fine.

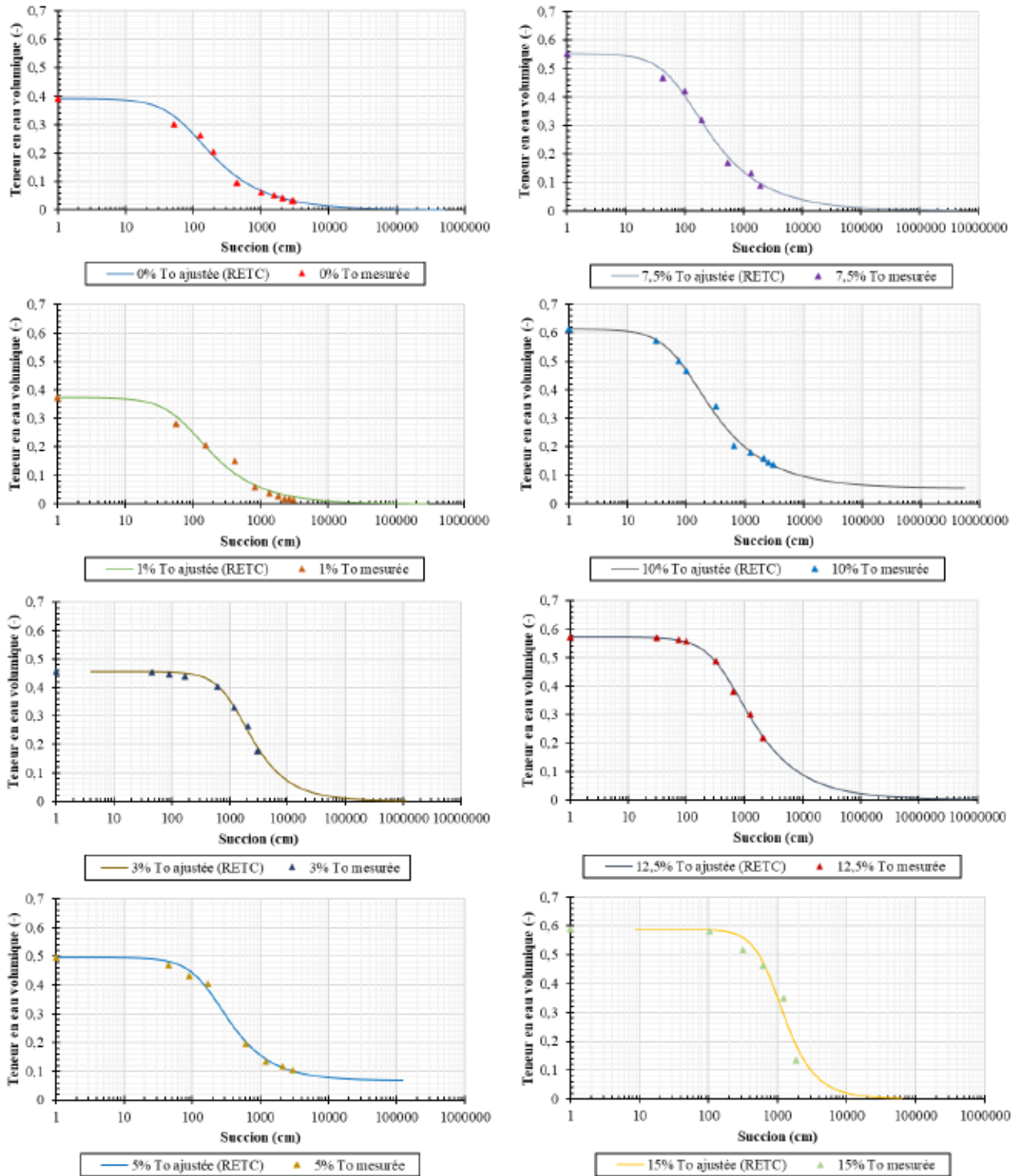


Figure 5.2 Courbes de rétention d'eau du silt et ses mélanges.

Il est important de mentionner que les pressions d'entrée d'air (AEV) ont été obtenues par les quatre méthodes suivantes : celle des tangentes, celles à 95 et à 90 % de saturation (Aubertin *et al.*,

2003) et celle par calcul en faisant $1/\alpha_{vG}$ (van Genuchten *et al.*, 1991). Les résultats obtenus avec la méthode de van Genuchten (ψ_{vG}) sont toujours les plus élevés, et les plus petits sont obtenus par la méthode de tangentes (ψ_t) suivie de celle à 95 % de saturation (ψ_{95}). La méthode à 90 % de saturation (ψ_{90}) donne des valeurs intermédiaires généralement plus proches de celles proposées par l'approche des tangentes. Pour ce qui est de la succion résiduelle (ψ_r), obtenue par méthode des tangentes (Figure 5.3). Le Tableau 5.2 présente les valeurs des paramètres clés obtenus à partir des CRE.

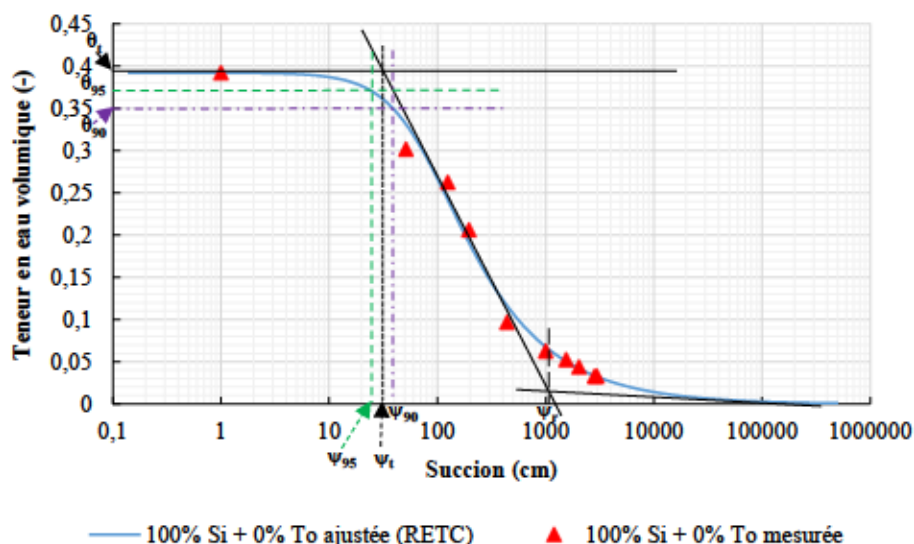


Figure 5.3 Courbe de rétention mesurée et ajustée à l'aide du modèle RETC de van Genuchten.

Tableau 5.2 Récapitulatif des valeurs de l'AEV, de la θ_s et de la ψ_r du silt et ses mélanges.

Tourbe (%)	ψ_t (cm)	ψ_{95} (cm)	ψ_{90} (cm)	ψ_{vG} (cm)	θ_s (-)	n (-)	ψ_r (cm)
0	30	26	40	75,6	0,39	0,40	1200
1	32	26	40	76,3	0,37	0,39	1100
3	530	300	600	1219,5	0,46	0,46	20000
5	80	53	90	182,1	0,50	0,50	1600
7,5	33	26	40	80,3	0,55	0,60	2100
10	33	27	47	82,2	0,61	0,62	1800
12,5	198	150	240	458,7	0,57	0,65	8500

Tableau 5.2 Récapitulatif des valeurs de l'AEV, de la θ_s et de la ψ_r du silt et ses mélanges. (suite)

Tourbe (%)	ψ_t (cm)	ψ_{95} (cm)	ψ_{90} (cm)	ψ_{r-c} (cm)	θ_s (-)	n (-)	ψ_r (cm)
15	400	300	430	854,7	0,59	0,68	3700
100	4,8	4,1	7	10,6	0,98	0,88	140

Le Tableau 5.2 montre que tous les matériaux amendés ont une AEV supérieure à celle de la tourbe. On observe également qu'en dehors des échantillons amendés avec 3, 12,5 et 15% de tourbe, les AEV se sont maintenues stables. Ensuite pour les mélanges après 7,5% de tourbe on observe une augmentation des AEV.

5.2 Impact de la tourbe sur les propriétés hydrauliques

5.2.1 Impact de la tourbe sur la conductivité hydraulique du sable et du silt

L'interprétation des résultats présentés dans le Tableau 4.2 montre que l'augmentation de la teneur en tourbe, entraîne une diminution de la conductivité hydraulique (k_{sat}) du sable (Zhang *et al.*, 2016; Demir & Dogan Demir, 2019) (Figure 5.4). Ceci peut s'expliquer par la granulométrie semi-étalée de la tourbe ($5 < C_U (= 10,18) \leq 20$), qui comble les vides interparticulaires du sable et réduit ainsi la perméabilité du sable. Mais la double porosité observée dans la tourbe par Rezanezhad *et al.* (2012) pourrait aussi expliquer ce comportement. En fait, la porosité totale de la tourbe est faite de grands pores interparticulaires transmettant activement l'eau (porosité active) et de pores fermés et/ou en cul-de-sac relativement petits (porosité inactive) (Kremer *et al.*, 2004). L'eau absorbée par la tourbe n'est pas totalement relâchée, car, une partie serait restée emprisonnée dans les pores inactifs, conduisant à la diminution de la k_{sat} du sable.

En revanche, les résultats observés dans le

Tableau 5.1 traduisent une augmentation suivie d'une réduction de la k_{sat} du silt avec l'ajout de la tourbe (Figure 5.5). Ce comportement peut être attribué à la présence de la tourbe qui aurait favorisé l'interaction cohésive avec le silt, conduisant à l'augmentation des agrégats et donc à l'augmentation du rapport des vides et par conséquent de la k_{sat} pour les mélanges de 0 à 5 % de tourbe. Dans les loam argileux, l'ajout de compost, de paille et de sciure de bois a pour effet de réduire la phase solide et d'accroître la phase des vides, aboutissant à un accroissement de la k_{sat}

(Eusufzai & Fujii, 2012). Cependant, des ajouts de la tourbe ont augmenté la proportion de la tourbe dans le silt, ce qui aurait permis à la double porosité de la tourbe de s'exprimer en entraînant la diminution de la k_{sat} (7,5 – 15 % de tourbe).

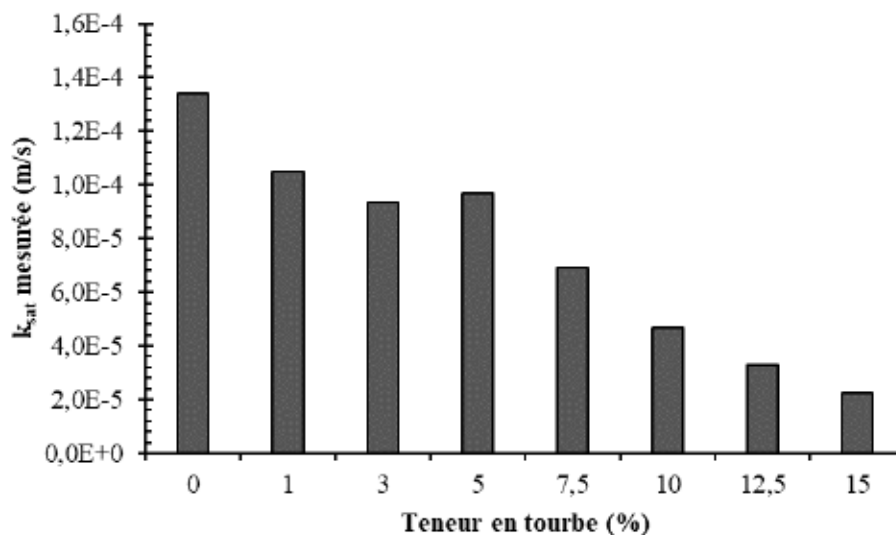


Figure 5.4 Variation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) du sable en fonction des teneurs en tourbe.

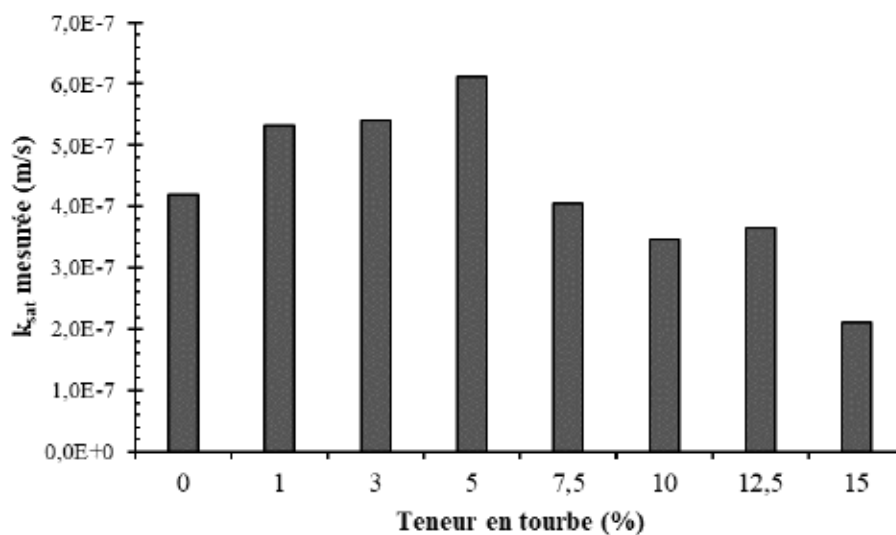


Figure 5.5 Variation de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) du silt en fonction des teneurs en tourbe.

5.2.2 Impact de la tourbe sur la courbe de rétention d'eau du sable et du silt

La tourbe reconnue pour ses grandes capacités de rétention d'eau, mélangée à de teneurs variant de 1% à 15% à du sable et du silt, pourrait conduire aux comportements illustrés par les Figure 5.6 et Figure 5.7.

Les résultats de CRE du sable et de ses mélanges avec la tourbe, montrent une augmentation de la porosité avec la teneur en tourbe. On peut également observer une augmentation considérable de la capacité de rétention du mélange à 7,5 % de tourbe, se traduisant par une AEV élevée (la plus grande). Cependant, il n'y a pas une assez grande variation des AEV des autres mélanges par rapport à celle du sable (Figure 5.6). Ceci pourrait traduire que le mélange à 7,5 % est celui optimum permettant d'améliorer la capacité de rétention du sable. Toutefois, lorsque la teneur en tourbe devient supérieure à 7,5 % la tourbe se draine plus rapidement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la tourbe non décomposée à forte teneur en fibres et à porosité active importante restitue jusqu'à 80 % de sa teneur en eau saturée au drainage; en revanche, les tourbes les plus décomposées restituent moins de 10 % de leur eau au drainage (Radforth & Brawner, 1977; Letts *et al.*, 2000).

Pour le silt et ses mélanges, on observe des CRE présentant une augmentation de la capacité de rétention d'eau des mélanges à 3 % (plus grande AEV), à 12,5 % et à 15 % de tourbe. Ce constat peut révéler une absence de cohésion entre les particules de silt et de tourbe, entraînant ainsi des changements de textures et de structures et par conséquent une perturbation de leur capacité de rétention. De la disposition des différentes AEV des mélanges du silt sur la Figure 5.7, on observe difficilement une progression croissante ou décroissante, mais plutôt trois pics isolés.

Tout comme dans le cas du sable et de ses mélanges, nous observons une augmentation de teneur en eau saturée (donc de la porosité) avec la teneur en tourbe pour le silt et ses mélanges.

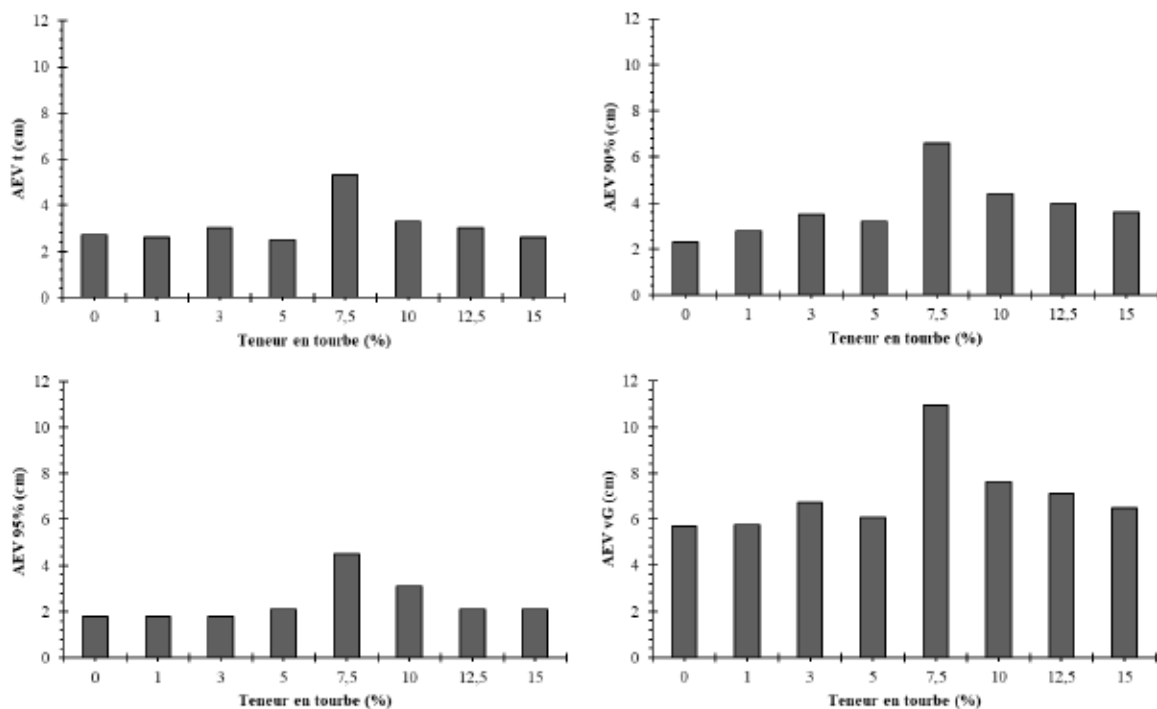


Figure 5.6 Variation de la pression d'entrée d'air (AEV) du sable en fonction des teneurs en tourbe.

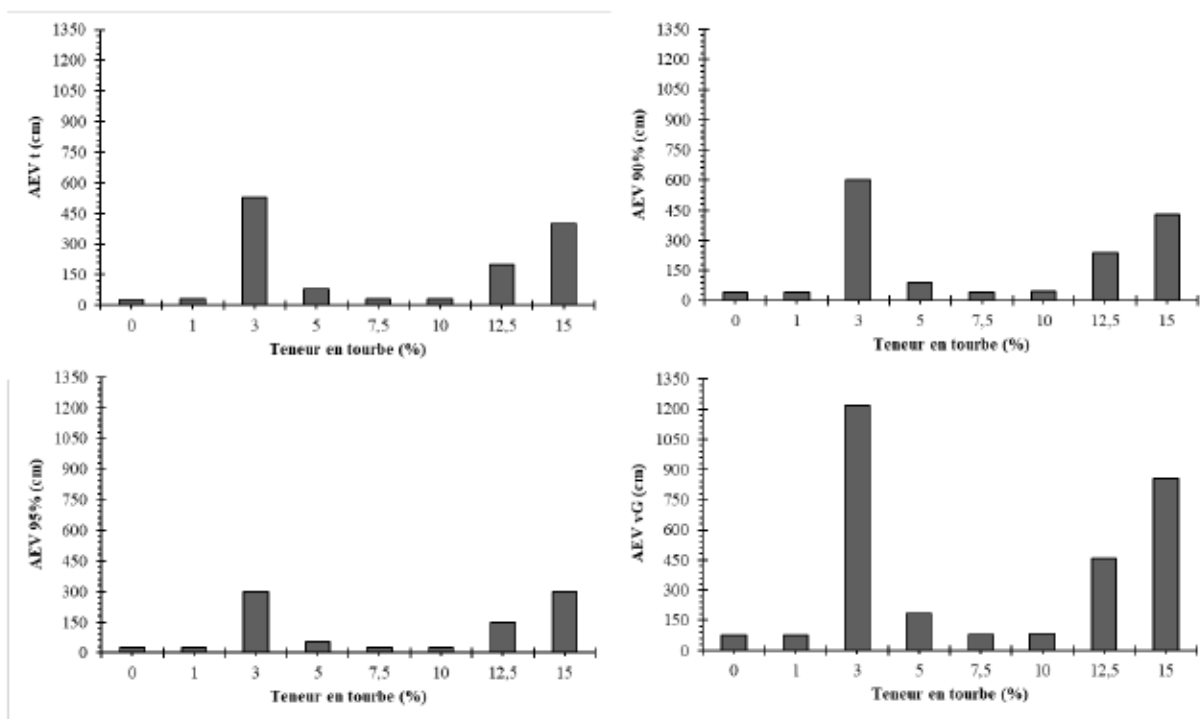


Figure 5.7 Variation de la pression d'entrée d'air (AEV) du silt en fonction des teneurs en tourbe.

5.3 Résultats de la prédiction des CRE

5.3.1 Résultats de la prédiction des CRE du Silt et ses mélanges

La méthode de prédiction proposée pour la CRE consiste à (i) ajuster les modèles prédictifs aux mesures faites au laboratoire, pour dériver les paramètres des modèles afin de voir celui qui sied le mieux, et (ii) construire des équations de régression à partir des paramètres ajustés, en utilisant par exemple une méthode par étapes pour choisir les variables pertinentes entrant dans la prédiction (Weynants *et al.*, 2009). Pour le choix de ces variables, nous avons utilisé la matrice de corrélation de Pearson (en annexe B). Le modèle d'ajustement retenu a été celui de Fredlund & Xing (1994) et les équations obtenues sont les suivantes :

$$\log_{10} a_f = a_{a_f} + b_{a_f} D_{10} + c_{a_f} m_f + d_{a_f} (D_{10}/m_f)^{1/2} + e_{a_f} D_{10}^{1/2} + f_{a_f} m_f^2 \quad (5.2)$$

$$m_f = a_{m_f} + b_{m_f} w_p + c_{m_f} D_{80} + d_{m_f} T_o + e_{m_f} w_L + f_{m_f} D_{90} + g_{m_f} (T_o \times w_L) + h_{m_f} (T_o \times w_p) \quad (5.3)$$

$$n_f = a_{n_f} + b_{n_f} G_s + c_{n_f} D_{90} + d_{n_f} \theta_s + e_{n_f} C_u + f_{n_f} w_L \quad (5.4)$$

avec a, b, c, d, e, f et h , comme les coefficients de la régression et D_{10} , D_{80} et D_{90} sont exprimés en μm .

Le Tableau 5.3, proposent une vue d'ensemble des valeurs mesurées et celles prédites par régression des différents paramètres de Fredlund (a_f , m_f et n_f). Il faut noter que les paramètres d'ajustement (ψ_i , ψ_p , ψ_r et θ_i) qui sont déduits directement de la courbe de rétention d'eau ont présenté de faibles corrélations avec les propriétés physiques des mélanges, raison pour laquelle les paramètres d'ajustement (a_f , m_f et n_f) ont été utilisés.

Une fois que le choix des paramètres physiques devant servir à la réalisation des équations de régressions a été fait, la régression multiple ont été réalisées sur tous nos mélanges grâce à Excel.

Tableau 5.3 Récapitulatif des paramètres mesurés et prédits pour le silt et ses mélanges.

	a_f		m_f		n_f	
	Mesuré	Prédit	Mesuré	Prédit	Mesuré	Prédit
100% Si + 0% To	151,30	181,27	2,03	2,03	1,10	1,12
99% Si + 1% To	9524,30	9358,37	24,28	24,28	0,68	0,68
97% Si + 3% To	83395,26	83635,80	138,45	138,45	1,25	1,28
95% Si + 5% To	178,70	188,11	0,97	0,97	1,72	1,67
92,5% Si + 7,5% To	121,79	94,61	1,34	1,34	1,21	1,15
90% Si + 10% To	99,10	111,08	0,95	0,95	1,29	1,34
87,5% Si + 12,5% To	406,25	375,47	0,74	0,74	1,76	1,80
85% Si + 15% To	31843,69	31836,59	450,32	450,32	1,74	1,72

Ces valeurs prédites ont été obtenues par les équations de régression multiple présentées plus haut. La Figure 5.8 montre les comparaisons entre les valeurs mesurées et celles prédites par la régression des différents paramètres.

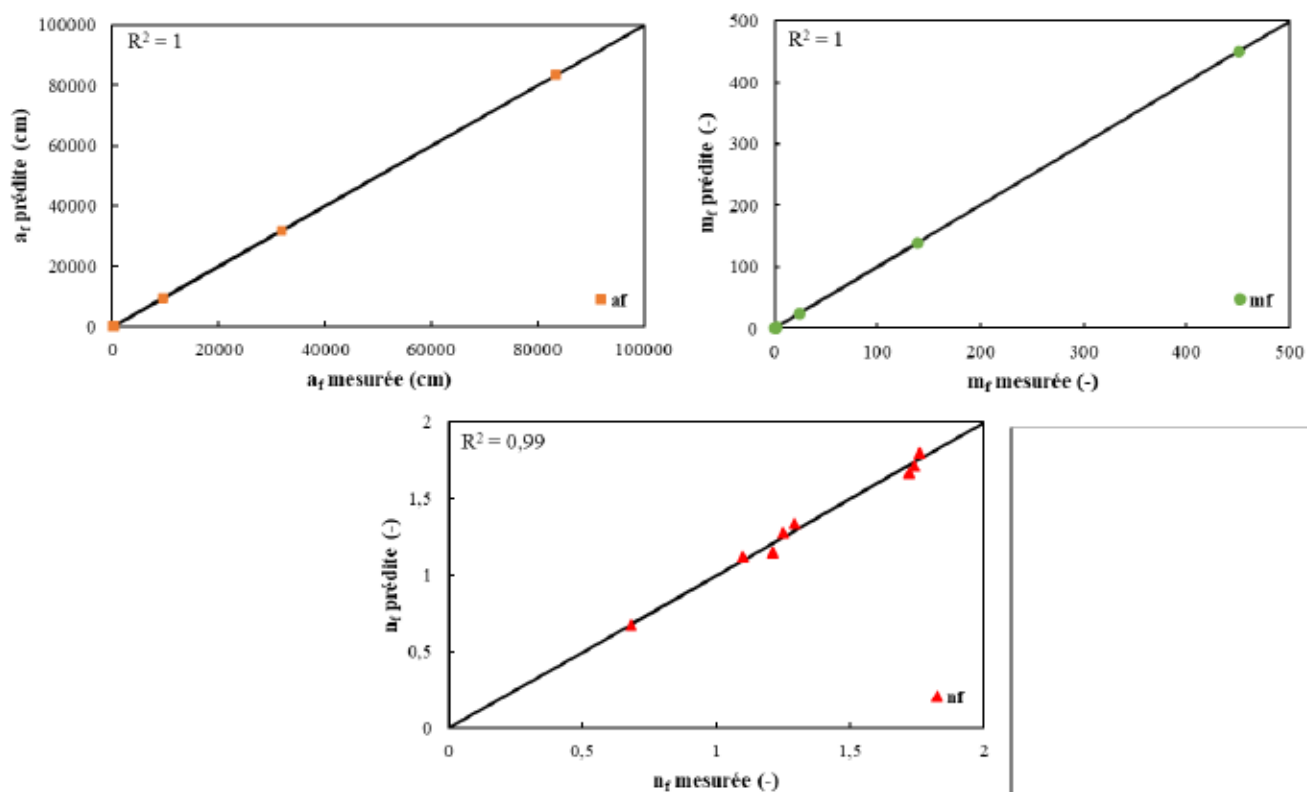


Figure 5.8 comparaison des paramètres prédits à ceux observés.

La Figure 5.9 illustre les CRE mesurées et prédites du silt avec ses mélanges à 1, 3, 5, 7,5, 10, 12,5 et 15% de tourbe. La précision des résultats ou les indicateurs de performance ajustés des CRE (le coefficient de détermination, R^2 et l'erreur quadratique moyenne, RMSE), de même qu'un aperçu des teneurs en eau mesurées et celles prédites seront présentés à l'annexe B respectivement pour le sable et le silt amendé avec la tourbe. Dans le même ordre d'idée, le Tableau 5.4 présente les prédicteurs et les coefficients de régression retenus pour chaque paramètre du modèle de Fredlund & Xing (1994) utilisé dans le modèle prédictif proposé.

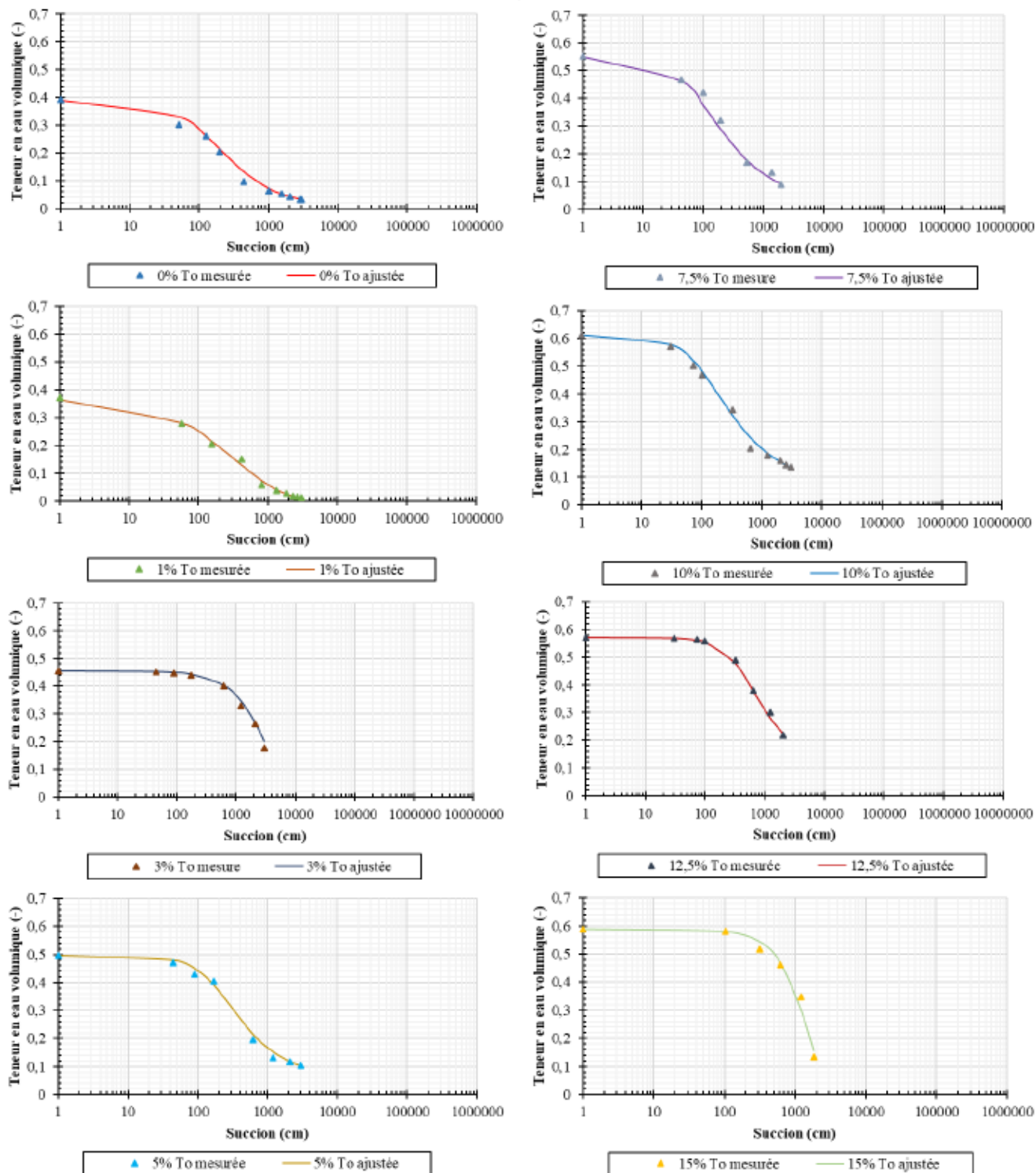


Figure 5.9 Courbes de rétention d'eau mesurée et prédite du silt et de ses mélanges.

Les coefficients de détermination des courbes de rétention d'eau présentées ci-dessus, varient de 0,979 à 0,998 pour le sable et ses mélanges et de 0,977 à 0,997 pour ceux du silt.

Tableau 5.4 Les variables et coefficients du modèle prédictif de la CRE et leur valeur, la valeur critique de F et les coefficients de détermination pour le silt et ses mélanges.

	Coefficient	Valeur	R ²
Équation 5.5	a_{af}	11,4880	0,998
	b_{af}	1,0480	
	c_{af}	0,0208	
	d_{af}	0,2457	
	e_{af}	-6,5992	
	f_{af}	- 3,1534 x 10 ⁻⁵	
Équation 5.6	a_{mf}	9584,8584	1
	b_{mf}	244,6031	
	c_{mf}	-29,3212	
	d_{mf}	296,2059	
	e_{mf}	-677,2834	
	f_{mf}	23,7328	
	g_{mf}	58,8333	
	h_{mf}	-79,4774	
Équation 5.7	a_{nf}	35,6615	0,994
	b_{nf}	-12,9664	
	c_{nf}	-0,0156	
	d_{nf}	-3,2047	
	e_{nf}	-0,1073	
	f_{nf}	0,2599	

Dans ce tableau, le paramètre θ_r n'apparaît pas ; il n'est généralement pas significativement différent de 0 et a donc été exclu des variables.

5.3.2 Précision des prédictions

La Figure 5.10, compare les valeurs mesurées de la teneur en eau volumique du silt et ses mélanges, aux suctions matricielles allant de 0 à 300 kPa (3 000 cm) avec celles prédites à l'aide de l'équation de Fredlund et Xing (1994), qui est indiquée dans la section 3.4.1. Pour les mélanges, la teneur en eau volumique est légèrement surestimée et sous-estimée, ce qui témoigne à certaines mesures de

la pertinence des régressions proposées pour la prédiction des caractéristiques de rétention d'eau des mélanges. Avec des coefficients de détermination (R^2) sensiblement égale à 1. On peut affirmer avoir une corrélation positive presque parfaite entre les teneurs en eau mesurées et celles prédites.

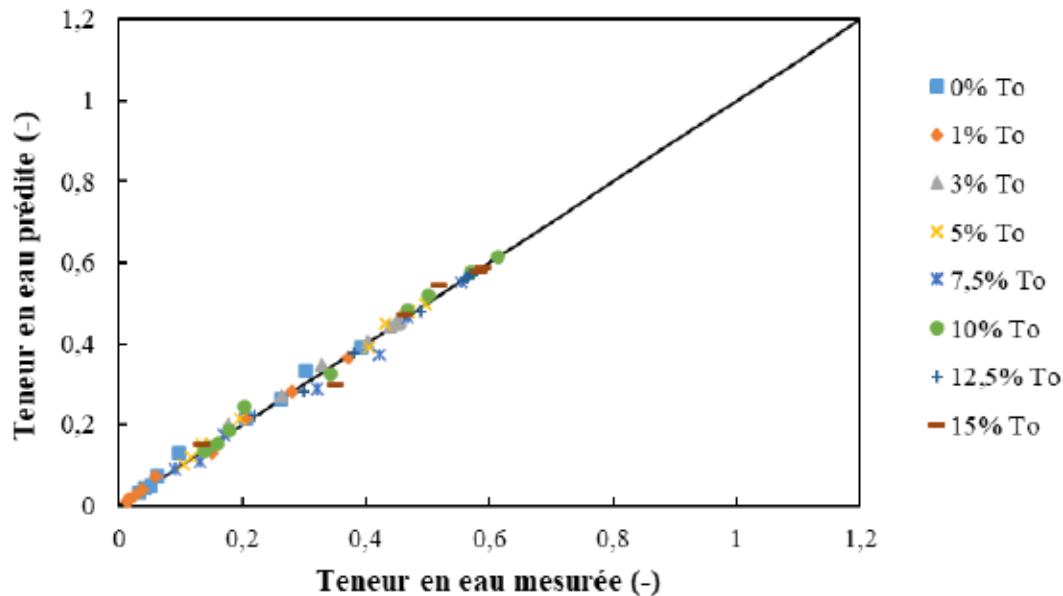


Figure 5.10 Comparaison entre les valeurs mesurées de la teneur en eau volumique du silt et ses mélanges et celles estimées par régression.

5.4 Résultats de la simulation numérique

5.4.1 Simulations réalisées

Les simulations ont été réalisées en imposant la nappe phréatique à -5 m de la base du modèle sur une période totale de soixante jours (dans les conditions climatiques de la région, on n'observe jamais une période aussi longue sans précipitation). Du point de vue géométrique, les simulations des scénarios C1, C2 et C3 sont similaires, la seule différence résidant dans la nature des couches : sable et silt non amendé pour le scénario C1; silt à 5 % de tourbe, sable à 10 % et à 3 % de tourbe pour le scénario C2 et silt à 15 % de tourbe, sable à 15 % et à 10 % de tourbe pour le scénario C3. Le Tableau 5.5 récapitule les principales caractéristiques des simulations réalisées.

Tableau 5.5 Principales caractéristiques des simulations effectuées

Scénario simulé	Condition initiale (régime permanent)	Temps	Condition frontière à la base du modèle	Nombre de nœuds
C1	Saturée (85 – 100 %)	60 jours	Nappe à -5 m	5406
C2	Saturée (85 – 100 %)	60 jours	Nappe à -5 m	5406
C3	Saturée (85 – 100 %)	60 jours	Nappe à -5 m	5406

5.4.2 Résultats des simulations

Les résultats des modélisations C1 à C3 sont présentés sous format graphique, à travers des profils des teneurs en eau volumiques et de succions (figures 5.11 à 5.16). Pour une analyse rapide, différents intervalles de temps sont également affichés : 3 heures, 6 heures, 2 jours, 8 jours, 15 jours, 30 jours et 60 jours. L'élévation de 0 m correspond à la base du modèle numérique, c'est-à-dire à la base de la couche de sable inférieure.

5.4.2.1 Scénario C1 : matériaux sans amendement

Ce modèle est constitué de quatre couches : deux couches de sable, Sa-0To placées en haut et en bas, et une couche de silt Si-0To située entre les deux couches de sable. Ces trois couches reposent sur celle des résidus miniers manitou oxydés. Il s'agit de la simulation sans amendement et les résultats sont présentés à la figure 5.11 et 5.12.

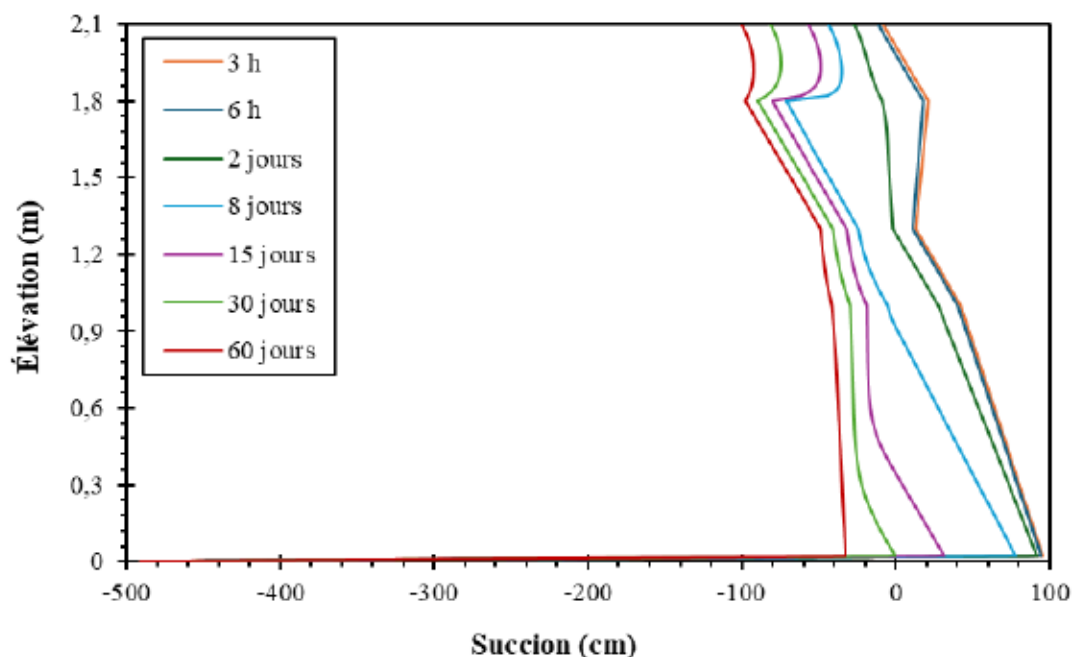


Figure 5.11 Évolution des pressions en fonction de l'élévation et du temps pour C1.

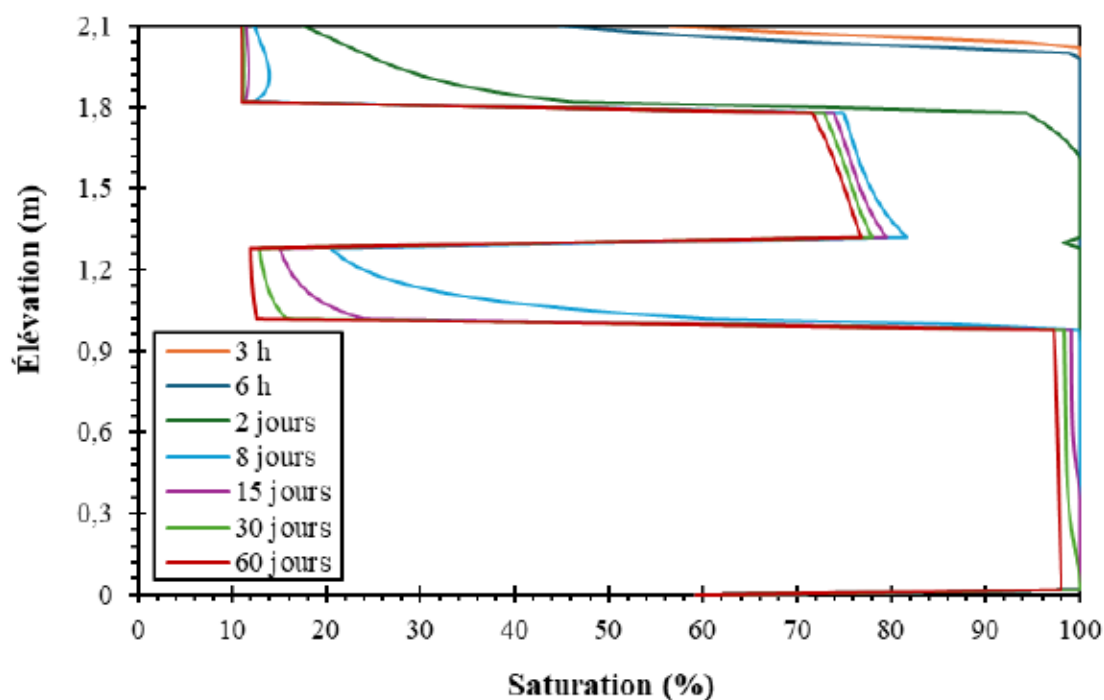


Figure 5.12 Évolution du degré de saturation en fonction de l'élévation et le temps pour C1.

Le profil de suction dans ce scénario C1 (Figure 5.11) montre une diminution constante de la suction, suivie d'une augmentation linéaire à l'exception de celle du sable (supérieure) au fil du temps. En raison de la faible AEV (2,7 cm) de la couche de sable, celui-ci perd rapidement de l'eau

par drainage, ce qui entraîne une diminution de la conductivité hydraulique et par conséquent, un degré élevé de saturation dans la couche des RMO et une S_r en bas de 85% après la période de drainage dans la CRH. De ce fait, la CEBC peut être considérée comme inefficace après 8 jours de drainage.

Pour évaluer l'impact de la matière organique sur la performance de la CEBC on a remplacé le sable Sa-0To par le sable Sa-15To, Sa-10To et Sa-3To. De même le silt Si-0To a été remplacé par le silt Si-5To et Si-15To. Les épaisseurs des couches ont été maintenues à celles du scénario précédent, ainsi que les conditions initiales et aux limites.

5.4.2.2 Scénario C2 : matériaux avec amendement (figures 5.13 et 5.14)

Ce modèle est constitué de quatre couches : deux couches de sable, Sa-10To et Sa-3To, placées respectivement en haut et en bas de la couche de silt Si-5To. Et les résidus sont maintenus en dessous comme dans le scénario C1.

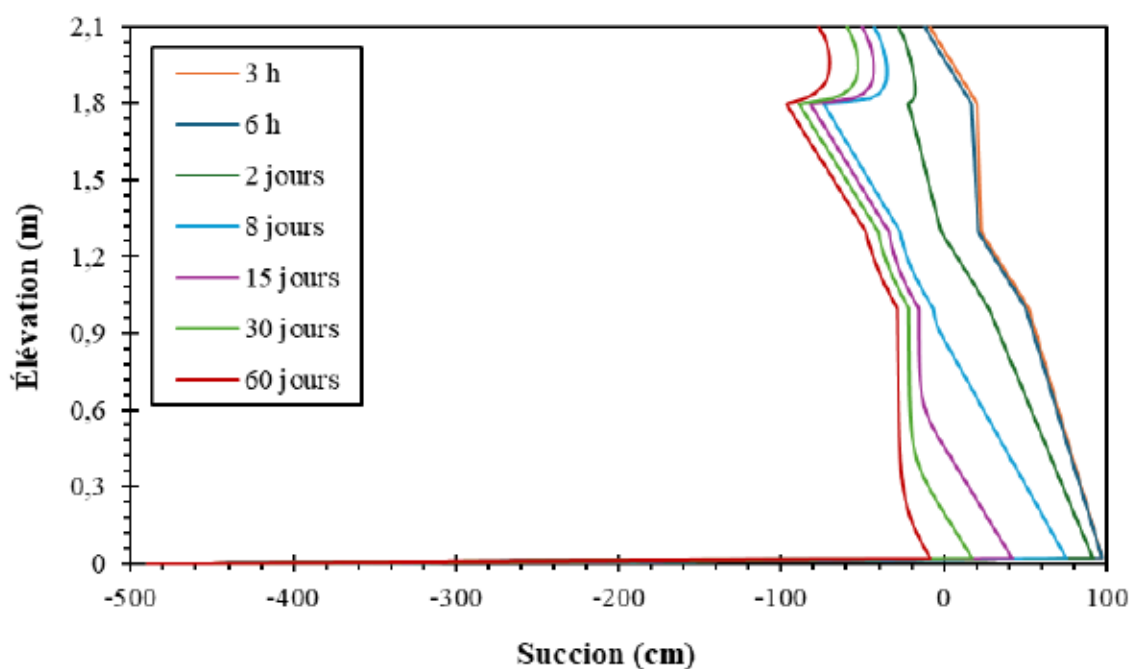


Figure 5.13 Évolution des pressions en fonction de l'élévation et du temps pour C2.

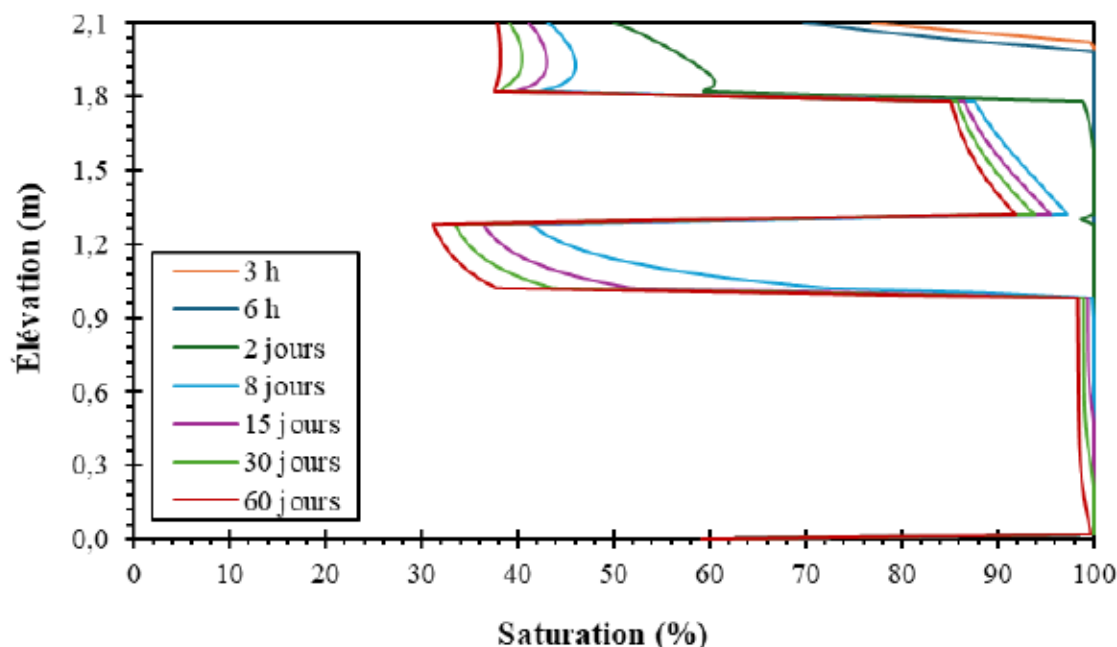


Figure 5.14 Évolution du degré de saturation en fonction de l'élevation et du temps pour C2.

Le profil de succion pour ce scénario C2 (Figure 5.13) montre un changement rapide dès les premières heures jusqu'à la fin des simulations, à 60 jours. Ceci se traduit par une diminution constante suivie d'une brusque augmentation des succions. Tous les pas de temps semblent s'éloigner d'un état qu'équilibre statique. On peut voir sur le profil de saturation que la couche de Si-5To est saturée à plus de 85 % même après 60 jours. Les couches de Sa-10To et Sa-3To se désaturent jusqu'à atteindre leur teneur en eau résiduelle.

5.4.2.3 Scénario C3 : matériaux avec amendement (figures 5.15 et 5.16)

Comme dans le scénario C2, celui-ci est fait de trois couches : deux couches de sable, Sa-15To et Sa-10To, placées respectivement en haut et en bas, avec des épaisseurs identiques, et une couche de silt Si-15To située entre les deux couches de sable et les résidus placés en dessous.

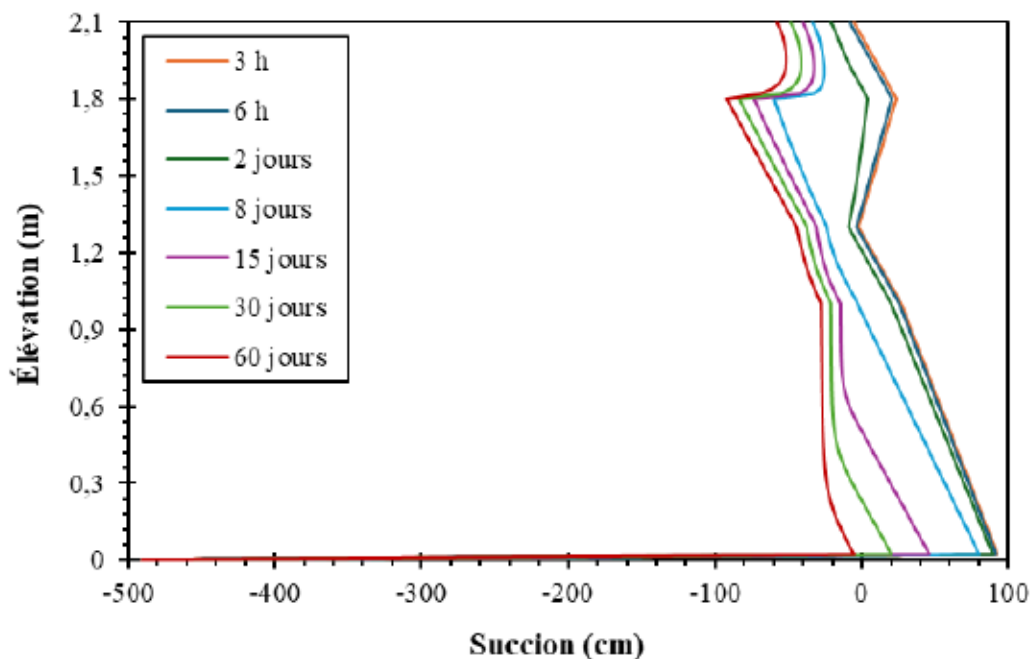


Figure 5.15 Évolution des pressions en fonction de l'élevation et du temps pour C3.

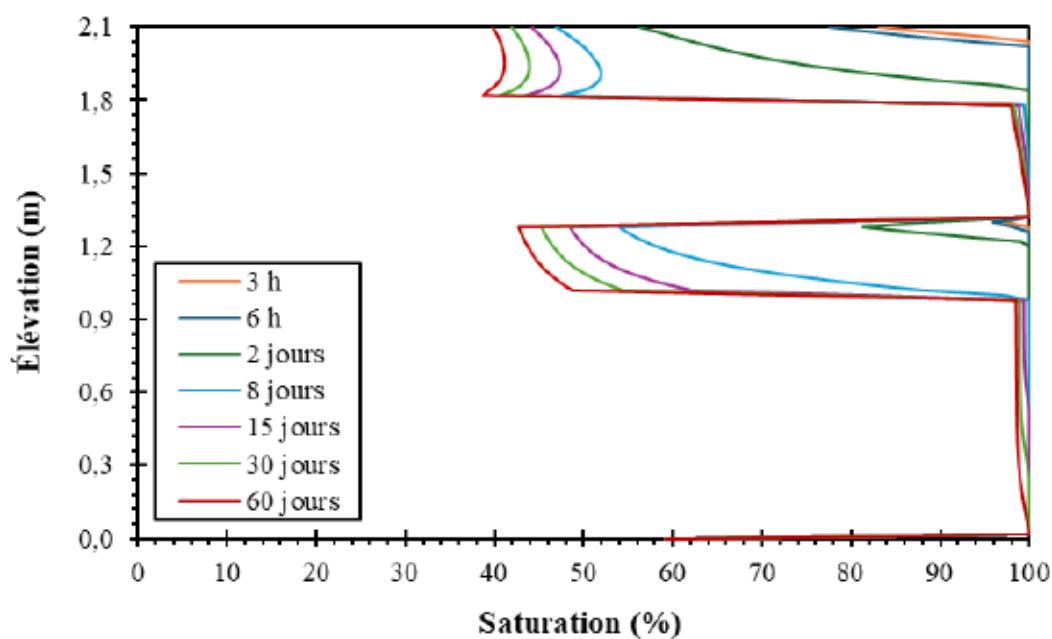


Figure 5.16 Évolution du degré de saturation en fonction de l'élevation et du temps pour C3.

Le profil de saturation fait état de ce que la couche de Si-15To est maintenue saturée ainsi que les résidus pour tous les pas de temps sans aucun apport d'eau. Le drainage rapide de Sa-15To et de Sa-10To favorise l'état saturé des couches de Si-15To. Pour ce qui est du profil de suction, les

mêmes remarques sont faites comme dans les scénarios précédents. L'équilibre hydrostatique est également perceptible au début des simulations comme pour les scénarios C1 et C2.

Les profils de succion pour les trois scénarios réalisés ont été changeants pendant la période d'analyse et, dans tous les scénarios, pourtant, ils semblent s'approcher d'un état d'équilibre hydrostatique dès les premières heures. Le bris capillaire qui est une caractéristique des CEBC est bien visible pour toutes nos simulations, comme nous le montrent nos profils de saturation.

5.4.3 Impact de la tourbe sur la performance des CEBC

Pour évaluer l'effet de barrière capillaire caractéristique des systèmes de type CEBC, les couches les constituant ont été amendées avec de la tourbe à des teneurs de 3 %, 5 %, 10 % et 15 % pour les deux scénarios proposés. Les résultats de calcul sont présentés dans le Tableau 5.6 pour permettre la comparaison entre les matériaux amendés et ceux non amendés. On s'intéresse plus particulièrement à la CRH constituée de silt pour le premier scénario et amendé à 5 % et à 15 % pour les scénarios C2 et C3 respectivement.

Tableau 5.6 Résultats de calcul du S_r pour le scénario C1 comparés aux résultats des scénarios C2 et C3.

<i>Temps</i>	Degré de saturation de la couche de rétention d'humidité (CRH)		
	<i>Scénario C1</i>	<i>Scénario C2</i>	<i>Scénario C3</i>
<i>3 heures</i>	100 %	100 %	100 %
<i>6 heures</i>	99 %	100 %	100 %
<i>2 jours</i>	94 %	99 %	100 %
<i>8 jours</i>	75 %	88 %	99 %
<i>15 jours</i>	74 %	86 %	98 %
<i>30 jours</i>	73 %	86 %	98 %
<i>60 jours</i>	72 %	85 %	98 %

D'après le Tableau 5.6, l'ajout d'amendement de tourbe a engendré une augmentation du degré de saturation de la CRH. À 60 jours elle passe de 72 % au scénario C1 à 98 % pour le scénario C3 en passant par 85 % pour le scénario C2. Ce constat met en évidence l'impact positif de la tourbe sur les matériaux de base utilisés, en octroyant une plus grande capacité de rétention à la CRH.

Les profils de saturation des trois scénarios nous montrent également une amélioration de la capacité de rétention des couches drainantes, de 10 % pour le scénario C1, puis à 30 % pour le scénario C2 et ensuite à 40 % pour le scénario C3 marquant une fois de plus l'influence de la tourbe. Ces profils font aussi état des résidus toujours saturés à 98 % pour 60 jours dans tous les scénarios.

Cet état de saturation est conservé et augmenté grâce au bris capillaire qui est toujours maintenu à l'aide de la grande variation granulométrique entre les deux couches, ainsi que la propriété absorbante de la tourbe. L'eau présente dans le matériau fin (CRH) est maintenue par les forces capillaires et ne s'écoule pas vers le matériau plus grossier sous-jacent en raison de la faible conductivité hydraulique de la CRH créant ainsi une barrière capillaire. En outre, les suctions qui augmentent généralement avec la distance par rapport à la nappe ne se transmettent pas dans le matériau grossier; par conséquent, la succion y est presque nulle, proche de 0 cm. En revanche, la succion à l'interface (CRH – couches de sable) se propage dans le matériau fin et y augmente de manière linéaire (Akindunni *et al.*, 1991; Aubertin *et al.*, 1996b).

5.5 Contraintes liées au projet

Comme tout travail scientifique, la réalisation de cette étude a nécessité beaucoup de temps, de travail et surtout de volonté et de patience. Lors de nos travaux, nous avons rencontré de nombreuses difficultés pour la manipulation, la compréhension de la tourbe utilisée et l'adaptation et le choix des équipements à utiliser pour nos essais.

La méthodologie initialement adoptée proposait l'utilisation des cellules de pressions pour la mesure des teneurs en eau, mais du fait de la rapidité du drainage pour les échantillons de sable amendé avec la tourbe, on a convenu d'utiliser la table à tension. Généralement utilisée pour les sols, elle nous a permis d'avoir de plus petites pressions. Lors de l'acquisition des données, il a fallu prendre en compte la variation de hauteur des échantillons, du fait de la déformation du tissu à la base de nos cylindres causés par la masse de l'échantillon saturé en eau.

Les essais de conductivité hydraulique quant à eux devraient être réalisés dans des perméamètres à paroi rigide. Mais au vu des mauvais résultats (affaissement et effondrement) observés sur les mélanges du silt, celui à paroi flexible a été privilégié. En effet, les essais de k_{sat} du sable et ses mélanges et du silt ainsi que ses mélanges ont donc été réalisés dans les perméamètres à paroi rigide

et flexible respectivement. Vu la nature végétale de la matière organique (tourbe), il n'était pas évident de compacter les mélanges lors de leur mise en place dans le perméamètre. De plus, au cours de la saturation, on constatait encore des affaissements. Pour remédier à cette situation, nous avons choisi de prendre 5 % de la masse totale de matériau en eau pour le sable et 15 % pour le silt lors de la préparation de ceux-ci pour leur mise en place.

La tourbe étant constituée de particules très fines et de faible densité (légère), était presque hydrophobe, car il prenait beaucoup de temps et de manipulations pour être hydraté. Et même pendant la saturation et au cours des mesures, on observait une sorte de lessivage (par la coloration brune de l'eau à la sortie) de ces fines particules.

Les essais prévus pour deux sessions au maximum ont pris deux sessions et demie (10 mois). Ce retard constaté nous a contraints à abandonner notre intention d'évaluer également les effets de la tourbe sur les résidus miniers (résidus de la mine Goldex). Il serait nécessaire de préciser que la disponibilité des équipements pour les essais a également été un frein au bon déroulement de nos travaux au laboratoire. La saturation de la tourbe étant très difficile, nous avons saturé les matériaux pendant minimum deux semaines pour des raisons de sécurité.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

La présente recherche s'est engagée à évaluer l'influence de la tourbe sur les propriétés hydrogéologiques des matériaux naturels (sable et silt) au laboratoire, ainsi que proposer un modèle prédictif prenant en compte la présence de la tourbe. La question initiale qui nous a guidé tout au long de ce mémoire était celle de comprendre comment la tourbe peut impacter la performance des techniques de recouvrement (CEBC), à partir de l'évaluation de la teneur en eau de leurs matériaux constitutifs amendés avec la tourbe. Pour apporter des éléments de réponses à cette observation qui est peu ou pas étudiée, nous avons commencé par préparer sept mélanges avec des teneurs de tourbe de 1 %, 3 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % et 15 %. Par la suite les caractérisations physique et hydrogéologique sur les matériaux de base et les différents mélanges ont été réalisées. En fin, des simulations numériques avec des conditions hydrogéologiques bien définies ont été développées afin de mieux comprendre l'effet de la tourbe sur les propriétés hydrogéologiques du système testé. Les résultats de nos analyses ont mis en lumière les effets de la tourbe sur la teneur en eau volumique des matériaux qui peuvent constituer les recouvrements utilisés dans la restauration des sites miniers, et une relation plus ou moins significative entre la tourbe et les matériaux naturels (le sable et le silt). La tourbe utilisée est de type fibreux (avec plus de 67 % de fibres) d'après la classification de Boelter (1969).

Les essais de perméabilité ont montré que la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) du sable a diminué de manière significative, passant de 10^{-4} m/s à seulement 10^{-5} m/s après l'ajout de 1 à 15 % de tourbe dans les mélanges sable-tourbe. Cependant, celle du silt et de ses mélanges, malgré une réduction de la conductivité hydraulique saturée à la suite d'une augmentation de la teneur en tourbe, les valeurs de la k_{sat} restent dans la fourchette de 10^{-7} m/s.

L'analyse des résultats des essais de mesures de la courbe de rétention d'eau des mélanges du sable, a révélé une hausse drastique de la valeur d'entrée d'air (AEV) du mélange amendé avec 7,5 % de tourbe par rapport au sable non amendé. Quant aux courbes de rétention d'eau (CRE) des mélanges du silt, on a constaté une augmentation de l'AEV des mélanges amendés avec 3 % (plus haute), 12,5 % et 15 % de tourbe en comparaison à la CRE du silt non amendé.

Les CRE de tous les mélanges obtenus ont été ajustées avec le logiciel RETC de van Genuchten (1980) avec $m = 1 - 1/n$. La prédiction a été réalisée avec le modèle de Fredlund et Xing (1994) en y intégrant la tourbe et en utilisant la régression multiple. Les résultats prédits au moyen de la procédure suggérée dans ce mémoire démontrent une bonne corrélation avec les données de teneurs en eau volumiques mesurées pour les mélanges non saturés avec des $R^2 \geq 0,977$. L'équation de la courbe de rétention d'eau proposée par Fredlund et Xing (1994) s'est avérée efficace pour la prédiction de la CRE de ces mélanges. Dans le cas où des données expérimentales sur les caractéristiques hydrogéologiques des mélanges ne sont pas disponibles, cette équation peut être utilisée pour estimer leur comportement hydrogéologique.

Les simulations numériques ont révélé qu'au cours des périodes prolongées de drainage, les suctions dans la couche grossière sous-jacente et celles de la couche de rétention tendent à l'équilibre hydrostatique, lequel correspond à la hauteur de succion à laquelle le matériau grossier et le matériau fin atteignent leur saturation résiduelle. En conséquence, ces résultats montrent que la couche de rétention peut se maintenir à plus de 85 % de saturation avec un pourcentage de tourbe ≤ 15 %.

En conclusion, les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette maîtrise ont révélé que la tourbe a un plus important effet sur les k_{sat} (diminution) des mélanges du sable. En plus, le mélange avec 7,5 % de tourbe a obtenu la plus grande capacité de rétention d'eau. Cependant, pour les mélanges du silt, la plus grande capacité de rétention a été acquise à 3 % suivit de celle à 15 et à 12,5 % de tourbe. Ces résultats qui témoignent d'une modification considérable des propriétés hydrogéologiques du sable et du silt démontrent à certaines mesures que la tourbe contrôle le comportement non saturé à certaines teneurs (3 %, 7,5 %, 12,5 % et 15 %) spécifiquement. Dans le cas d'un recouvrement de type CEBC ces modifications ont entraîné une augmentation de la capacité de rétention d'eau de la CRH et donc de la performance de ce dernier. L'importance de cette conclusion réside dans le fait qu'elle permet d'envisager l'utilisation de la tourbe dans l'amendement des matériaux qui peuvent être utilisés dans la construction des CEBC. Afin de mieux appréhender le fonctionnement des CEBC, il est nécessaire d'explorer plusieurs autres variantes du problème des systèmes multicouches.

6.2 Recommandations

La tourbe examinée dans cette étude n'a pas encore été testée dans ces circonstances et en utilisant ces paramètres d'analyse. Cependant, pour leur grande capacité d'absorption, les tourbes ont été souvent utilisées pour augmenter la teneur en matière organique des sols, améliorant ainsi leur fertilité.

Les résultats de cette étude, obtenus lors des travaux de laboratoire où les conditions climatiques sont contrôlables, montrent que la tourbe a inéluctablement un effet sur les propriétés hydrogéologiques du sable et à certains points du silt. Donc, pour une meilleure prise en compte de l'effet de la tourbe dans le domaine minier, il est souhaitable qu'elle puisse être testée dans les conditions climatiques (variation des saisons : précipitation, grosse chaleur et gel-dégel) de terrain, ainsi qu'en fonction de la topographie du site et du couvert végétal sur les parcs à résidus.

Il pourrait aussi être pertinent d'obtenir des équations de prédictions des conductivités hydrauliques des matériaux naturels (sable et silt), prenant en compte la présence de la matière organique.

Nous préconisons également des essais en colonnes afin de simuler les configurations de dépôts du sable et du silt amendé en surface avec la matière organique. Ce qui permettra de réaliser des simulations numériques plus concrètes avant la construction de la CEBC, afin d'optimiser l'épaisseur des couches et ainsi évaluer le comportement hydrogéologique de ces configurations.

D'autre part, une simulation numérique avec variation des épaisseurs des couches amendées de diverses teneurs en tourbe nous permettra d'examiner l'impact de cette variation sur les propriétés hydrogéologiques des recouvrements (CEBC). De ce fait, les critères d'évaluation de la performance de ces recouvrements (tel que la pression d'entrée de l'air, la conductivité hydraulique saturée) subiront peut-être des modifications. Par conséquent il est nécessaire de prendre en considération la tourbe et d'anticiper son impact pour une évaluation adéquate de la performance des recouvrements.

RÉFÉRENCES

- Adugna, G. (2016). A review on impact of compost on soil properties, water use and crop productivity. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, 4(3), 93-104.
- Aggelides, S. M., & Londra, P. A. (2000). Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology*, 71(3), 253-259. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00074-7)
- Akindunni, F. F., Gillham, R., & Nicholson, R. (1991). Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Canadian geotechnical journal*, 28(3), 446-451.
- Ankenbauer, K. J., & Loheide, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891-901. <https://doi.org/10.1002/hyp.11070>
- Arya, L. M., Leij, F. J., Genuchten, M. T., & Shouse, P. J. (1999). Scaling Parameter to Predict the Soil Water Characteristic from Particle-Size Distribution Data. *Soil Science Society of America Journal*, 63(3), 510-519. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300030013x>
- 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060004x>
- ASTM. (1992). Standard classification of peat samples by laboratory testing. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken. In.
- Aubertin, M., Aachib, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (1996a). Recouvrements multicouches avec effets de barrière capillaire pour contrôler le drainage minier acide: études en laboratoire et in situ. In (pp. 181-200). Paris; Presses de l'école nationale des ponts et chaussées; 1996.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., & Chapuis, R. P. (1996b). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*(1), 3-13. <https://publications.polymtl.ca/31554/>
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). Environnement et gestion des rejets miniers (CD-ROM). *Presses Internationales Polytechnique, Montréal, Québec*.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (1996c). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 470-482. <https://doi.org/10.1139/t96-068>
- Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanes, A., Gagnon, D., Barbera, J., Aachib, M., Bédard, C., Chapuis, R., & Bernier, L. (1999). Étude sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers Phase II—Essais en place.[A study of dry covers constructed from mine tailings, Phase II: In situ test.]. *Mine Environment Neutral Drainage Report (NEDEM/MEND)*, 2.

- Aubertin, M., Chapuis, R. P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J. F., & Tremblay, L. (1995). *Évaluation en laboratoire des barrières sèches construites à partir de résidus miniers : rapport final*. École polytechnique de Montréal, NEDEM/MEND Project 2.22.2a, Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canada.
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S. A., Bussière, B., Molson, J., & Chapuis, R. P. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian geotechnical journal*, 46(10), 1146-1164.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R., Chouteau, M., & Wilson, G. (2005). Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. *Montréal, QC, Canada*, 40.
- 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., 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. <https://doi.org/10.1139/t97-080>
- Bauer, A., & Black, A. L. (1981). Soil Carbon, Nitrogen, and Bulk Density Comparisons in Two Cropland Tillage Systems after 25 Years and in Virgin Grassland. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1166-1170. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060032x>
- Beckwith, C. W., Baird, A. J., & Heathwaite, A. L. (2003). Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. I: laboratory measurements. *Hydrological Processes*, 17(1), 89-101. <https://doi.org/10.1002/hyp.1116>
- Beke, G. J., & MacCormick, M. I. (1985). Predicting volumetric water retention for subsoil materials from Colchester County, Nova Scotia. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 65(1), 233-236. <https://doi.org/10.4141/cjss85-026>
- Belem, T. (2022). Rhéologie et transport des remblais miniers hydraulique et en pâte. [notes de cours]. IRME, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- Bell, M. A., & Keulen, H. (1995). Soil Pedotransfer Functions for Four Mexican Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 59(3), 865-871. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900030034x>
- Ben Khouya, T. (2020). Évaluation de l'impact de la végétation sur le bilan hydrique d'un recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée WorldCat.org. <http://depositum.uqat.ca/id/eprint/1248/>
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., & Marion, P. (2000). Environmental desulfurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 60(1), 57-74. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00006-5)
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S. p., Newman, P., & Verburg, R. (1999). Cementitious backfill with high sulfur content Physical, chemical, and mineralogical characterization.

- Cement and Concrete Research*, 29(5), 719-725. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00023-X)
- Blight, G. (2010). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC Press. <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb423748884>
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C. G., Paktunc, D., Gould, W. D., & Johnson, D. B. (2014). The geochemistry of acid mine drainage. In *Treatise on geochemistry*, 2nd ed., ed. K. Turekian and H. Holland, 131–190. Oxford: Elsevier.,
- Boelter, D. (1968). Important physical properties of peat materials. PROCEEDINGS THIRD INTERNATIONAL PEAT CONGRESS, QUEBEC, CANADA, P 150-154.,
- Boelter, D. H. (1969). Physical Properties of Peats as Related to Degree of Decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 33(4), 606-609. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300040033x>
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production*. Food & Agriculture Org.
- Bradley, C. (1996). Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire. *Journal of Hydrology*, 185(1), 87-114. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03005-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03005-0)
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. *Hydrology Papers. Colorado State University ; no. 3*. Colorado State University. Fort Collins.
- Bruand, A., Cousin, I., & Richard, G. (2003). Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols: outils disponibles et perspectives. 6èmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de Terre-GEMAS-COMIFER,
- Bussièrre, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques* [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/8726/>
- Bussièrre, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian geotechnical journal*, 44(9), 1019-1052. <https://doi.org/10.1139/t07-040>
- Bussièrre, B. (1993). *Evaluation des propriétés hydrogéologiques de résidus miniers utilisés comme barrières de recouvrement* [Mémoire (M. Sc. A.), École polytechnique de Montréal]. 171 pages. Montréal.
- Bussièrre, B., Aubertin, M., & Chapuis, R. P. (2003). The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian geotechnical journal*, 40(3), 512-535.
- Bussièrre, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2004). A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology : International Journal of Geosciences*, 45(5), 609-622. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0919-6>
- Bussièrre, B., & Guittoumy, M. (2021). *Hard rock mine reclamation : from prediction to management of acid mine drainage* (1st. ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315166698>

- Bussiere, B., Lelievre, J., Ouellet, J., & Bois, D. (1995). Utilisation de residus miniers desulfures comme recouvrement pour prevenir le DMA: analyse technico-economique sur deux cas reels. In *Sudbury '95: mining and the environment* (pp. 59-68). CANMET; 1995.
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian geotechnical journal*, 41(5), 787-795. <https://doi.org/10.1139/t04-022>
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment : The official journal of the LAEG*, 71(3), 401-434. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0418-7>
- Chapuis, R. P., & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian geotechnical journal*, 40(3), 616-628. <https://doi.org/10.1139/t03-013>
- Chapuis, R. P., & Légaré, P. P. (1992). A Simple Method for Determining the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures. In *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance* (pp. 177-186). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959 : ASTM International : 1992. <https://doi.org/10.1520/STP24217S>
- Clymo, R. S. (2004). Hydraulic conductivity of peat at Ellergower Moss, Scotland. *Hydrological Processes*, 18(2), 261-274. <https://doi.org/10.1002/hyp.1374>
- D'Emilio, A., Aiello, R., Consoli, S., Vanella, D., & Iovino, M. (2018). Artificial Neural Networks for Predicting the Water Retention Curve of Sicilian Agricultural Soils. *Water*. <https://doi.org/doi:10.3390/w10101431>.
- Dagenais, A.-M. (2005). *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires* (Publication Number phd) École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/7758/>
- Danalatos, N. G., Kosmas, C. S., Driessen, P. M., & Yassoglou, N. (1994). Estimation of the draining soil moisture characteristic from standard data as recorded in routine soil surveys. *Geoderma*, 64(1), 155-165. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90095-7)
- de Jong, R. (1983). Soil water desorption curves estimated from limited data. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 63(4), 697-703. <https://doi.org/10.4141/cjss83-071>
- de Jong, R., Campbell, C., & Nicholaichuk, W. (1982). Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 63(2), 291-302.
- de Rouw, A., & Rajot, J.-L. (2004). Soil organic matter, surface crusting and erosion in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(2), 263-276. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.020>
- Delage, P., & Cui, Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Mécanique des sols et géotechnique*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-c301>
- Delleur, J. W. (1999). *The handbook of groundwater engineering*. CRC Press. <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb375332979>

- 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.
- Demir, Y., & Dogan Demir, A. (2019). The effect of organic matter applications on the saturated hydraulic conductivity and available water-holding capacity of sandy soils. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 3137-3146. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_31373146
- Dettmann, U., & Bechtold, M. (2016). Deriving Effective Soil Water Retention Characteristics from Shallow Water Table Fluctuations in Peatlands. *Vadose Zone Journal*, 15(10). <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0029>
- Dettmann, U., Bechtold, M., Frahm, E., & Tiemeyer, B. (2014). On the applicability of unimodal and bimodal van Genuchten-Mualem based models to peat and other organic soils under evaporation conditions. *Journal of Hydrology*, 515, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.047>
- Dinkl, H., & Levesque, M. (1976). UNE TECHNIQUE SIMPLE POUR L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE LE TOURBE EN MILIEU AQUEUX. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 56(2), 119-120. <https://doi.org/10.4141/cjss76-018>
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211-223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- Ebrahimi, E., Bayat, H., Neyshaburi, M. R., & Zare Abyaneh, H. (2014). Prediction capability of different soil water retention curve models using artificial neural networks. *Archives of agronomy and soil science*, 60(6), 859-879. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.837219>
- El Halim, A. A., & El Baroudy, A. A. (2014). Influence addition of Fine Sawdust on the Physical Properties of Expansive Soil in the Middle Nile Delta, Egypt. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(2), 483-490. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162014005000038>
- Ethier, M.-P., Bussière, B., Broda, S., & Aubertin, M. (2018). Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal : Official Journal of the International Association of Hydrogeologists*, 26(4), 1201-1219. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1713-y>
- Eusufzai, M., & Fujii, K. (2012). Effect of Organic Matter Amendment on Hydraulic and Pore Characteristics of a Clay Loam Soil. *Open Journal of Soil Science*, 02, 372-381. <https://doi.org/10.4236/ojss.2012.24044>
- Fernandez-Rueda Ma, J., & Paz-Gonzalez, A. (1998). Influence of organic matter content on soil physical properties. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, 23, 101-120.
- Fouché, O. (2013). Aquifères, nappes et essais d'eau. Chapitre 16. *Théorie et pratique de la géotechnique*, 723-846.
- Fredlund, D., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31, 521-532.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.

- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), 533-546. <https://doi.org/10.1139/t94-062>
- Gardner, W. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), 228-232.
- Genty, T. (2012). *Comportement hydro-bio-géo-chimique de systèmes passifs de traitement du drainage minier acide fortement contaminé en fer*. WorldCat.org. <http://depositum.uqat.ca/id/eprint/269/1/thomasgenty.pdf>
- Gillham, R. W. (1984). The capillary fringe and its effect on water-table response. *Journal of Hydrology*, 67(1), 307-324. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90248-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90248-8)
- Gnatowski, T., Szatyłowicz, J., Brandyk, T., & Kechavarzi, C. (2010). Hydraulic properties of fen peat soils in Poland. *Geoderma*, 154(3-4), 188-195. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.021>
- Gobat, J.-M., Grosvernier, P., Matthey, Y., & Buttler, A. (1991). Un triangle granulométrique pour les tourbes : analyse semi-automatique et représentation graphique.
- Gupta, S., & Larson, W. (1979). Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research*, 15(6), 1633-1635.
- Haverkamp, R., Bouradui, F., Zammit, C., & Angulo-Jaramillo, R. (1999). Movement of moisture in the unsaturated zone. *Groundwater engineering handbook*. CRC, Boca Raton, Fla, 5.1-5.50.
- Haverkamp, R., & Parlange, J.-Y. (1986). Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter1. *Soil Science*, 142(6), 325-339. <https://doi.org/10.1097/00010694-198612000-00001>
- Hazen, A. (1911). Discussion of dams on sand foundation, transactions: American Science of civil Engineering. 73, 199-203.
- Hereter, A. s., Josa, R., & Candela, X. (2002). Changes in particle-size distribution influenced by organic matter and mechanical or ultrasonic dispersion techniques. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(7-8), 1351-1362. <https://doi.org/10.1081/CSS-120003892>
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York. 413 p.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic. Press. <http://www.gbv.de/dms/bowker/toc/9780123485250.pdf>
- <http://catdir.loc.gov/catdir/toc/els032/98023679.html>
- <http://catdir.loc.gov/catdir/description/els033/98023679.html>
- Hoag, R. S., & Price, J. S. (1995). A field-scale, natural gradient solute transport experiment in peat at a Newfoundland blanket bog. *Journal of Hydrology*, 172(1), 171-184. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02696-M](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02696-M)

- Hogan, J. M., van der Kamp, G., Barbour, S. L., & Schmidt, R. (2006). Field methods for measuring hydraulic properties of peat deposits. *Hydrological Processes*, 20(17), 3635-3649. <https://doi.org/10.1002/hyp.6379>
- Hollis, J. M., Jones, R. J. A., & Palmer, R. C. (1977). The effects of organic matter and particle size on the water-retention properties of some soils in the west midlands of England. *Geoderma*, 17(3), 225-238. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(77\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(77)90053-2)
- Holmes, P. R., & Crundwell, F. K. (2000). The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: an electrochemical study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(2), 263-274. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00296-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00296-3)
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). INTRODUCTION A LA GEOTECHNIQUE.
- Huat, B. B., Kazemian, S., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011). State of an art review of peat: General perspective. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(8), 1988-1996.
- Huber, G., & Schaub, C. (2011). La fertilité des sols: L'importance de la matière organique. *Agriculture et terroir, chambre d'agriculture Bas Rhin*.
- Husein Malkawi, A. I., Alawneh, A. S., & Abu-Safaqah, O. T. (1999). Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay Science*, 14(5), 257-278. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(99\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00003-4)
- Iden, S. C., & Durner, W. (2014). Comment on "Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range" by A. Peters. *Water Resources Research*, 50(9), 7530-7534. <https://doi.org/10.1002/2014WR015937>
- Jambor, J. L. (1994). Chapter 3 , Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. . In J. L. J. a. D. W. Blowes (Ed.), *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. (pp. 59-102).
- Jamison, V., & Kroth, E. (1958). Available moisture storage capacity in relation to textural composition and organic matter content of several Missouri soils. *Soil Science Society of America Journal*, 22(3), 189-192. <https://doi.org/10.2136/sssaj1958.03615995002200030001x>
- Jamison, V. C. (1953). Changes in air-water relationships due to structural improvement of soils. *Soil Science*, 76(2), 143-152.
- Jébrak, M., & Marcoux, E. (2008). Géologie des ressources minérales. *Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec*.
- Jensen, J. L., Schjøning, P., Watts, C. W., Christensen, B. T., Munkholm, L. J., & Paz-Ferreiro, J. E. (2017). Soil texture analysis revisited: Removal of organic matter matters more than ever. *PLOS ONE*, 12(5).
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, 338(1), 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>
- José Ricardo da Rocha, C., Alexandre Christófaró, S., José Sebastião Cunha, F., Mozart Martins, F., & Daniel Valladão, S. (2011). Water retention in a peatland with organic matter in different decomposition stages. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 1217-1227. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400015>

- Kalonji, A. K. (2014). *Étude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effet de barrière capillaire faites entièrement de matériaux miniers* [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/1597/>
- Kalonji Kabambi, A., Bussière, B., & Demers, I. (2017). Hydrogeological behaviour of covers with capillary barrier effects made of mining materials. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 1199-1220.
- Kay, B. D., Silva, A. P. d., & Baldock, J. A. (1997). Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 77(4), 655-667. <https://doi.org/10.4141/s96-094>
- Kazemian, S. (2017). Organic Soils and Peats. In P. T. Bobrowsky & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 1-5). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_214-1
- Keith, C., & Vaughan, D. (2000). Mechanisms and rates of sulphide oxidation in relation to the problems of acid rock (mine) drainage. In *Environmental Mineralogy, Microbial Interactions, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management. The Mineralogical Society Series*, 9, 117-140. <https://doi.org/10.1180/MSS.9.7>
- Kennedy, G. W., & Price, J. S. (2005). A conceptual model of volume-change controls on the hydrology of cutover peats. *Journal of Hydrology*, 302(1), 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.024>
- Kern, J. S. (1995). Evaluation of Soil Water Retention Models Based on Basic Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59(4), 1134-1141. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900040027x>
- Khlosi, M., Cornelis, W. M., Douaik, A., Hazzouri, A., Habib, H., & Gabriels, D. (2013). Exploration of the Interaction between Hydraulic and Physicochemical Properties of Syrian Soils. *Vadose Zone Journal*, 12(4), 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0209>
- Kleinmann, R. L. P., Crerar, D. A., & Pacelli, R. R. (1981). Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Min. Eng. (N.Y.); (United States)*, 33(3), 300-305.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corp.
- Kostopoulou, S. K., & Panayiotopoulos, K. P. (1993). The influence of organic matter, cation bridges and Fe- and Al-oxides and hydroxides on the aggregation of three Alfisols. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 156(5), 435-440. <https://doi.org/10.1002/jpln.19931560510>
- Kovács, G. r. (1981). *Seepage hydraulics*. Elsevier Scientific.
- Kozak, J. A., & Ahuja, L. R. (2005). Scaling of Infiltration and Redistribution of Water across Soil Textural Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 816-827. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0085>
- Kranz, C. N., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G., & Heitman, J. L. (2020). The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils - A concise review. *Journal of Environmental Management*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110209>
- Kremer, C., Pettolino, F., Bacic, A., & Drinnan, A. (2004). Distribution of cell wall components in Sphagnum hyaline cells and in liverwort and hornwort elaters. *Planta*, 219, 1023-1035.

- Kruse, J., Lennartz, B., & Leinweber, P. (2008). A modified method for measuring saturated hydraulic conductivity and anisotropy of fen peat samples. *Wetlands*, 28(2), 527-531. <https://doi.org/10.1672/07-153.1>
- Lal, R. (1979). Physical properties and moisture retention characteristics of some nigerian soils. *Geoderma*, 21(3), 209-223. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(78\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(78)90028-9)
- Lal, R., Shukla, M., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. Marcel Dekker, New York. 716 pp. <http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb39111416q>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1979). *Soil mechanics, SI version*. J. Wiley and Sons.
- Lamorski, K., Šimůnek, J., Sławiński, C., & Lamorska, J. (2017). An estimation of the main wetting branch of the soil water retention curve based on its main drying branch using the machine learning method. *Water Resources Research*, 53, 1539 - 1552. <https://doi.org/doi:10.1002/2016WR019533>.
- 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).
- Letts, M. G., Roulet, N. T., Comer, N. T., Skarupa, M. R., & Versegny, D. L. (2000). Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme. *Atmosphere-Ocean*, 38(1), 141-160. <https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649643>
- Lewis, C., Albertson, J., Xu, X., & Kiely, G. (2012). Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope. *Hydrological Processes*, 26(10), 1527-1537. <https://doi.org/10.1002/hyp.8252>
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer.
- Lowson, R. T. (1982). Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen. *Chemical reviews*, 82(5), 461-497. <https://doi.org/10.1021/cr00051a001>
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. J. Wiley Hoboken, NJ.
- Maqsood, A. (2022). Estimation of the Fredlund & Xing model parameters for the water retention curve of sandy soils using basic geotechnical parameters. *GeoMed conference, Marrakech, Springer proceeding*.
- 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). [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)210](https://doi.org/10.1061/40802(189)210)
- Maqsood, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2012). Predicting Hysteresis of the Water Retention Curve from Basic Properties of Granular Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1147-1159. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9529-y>
- Maqsood, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2013). Conversion of the Modified Kovács model parameters to the Brooks and Corey and van Genuchten model parameters for the water retention curve of sandy and silty soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5), 388-398.

- Maqsood, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Hysteresis effects on the water retention curve: a comparison between laboratory results and predictive models. Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference, 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference,
- Martin, V., McMullen, J., & Aubertin, M. (2005). Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur. Proceedings of the 2nd International Symposium on Mining and the Environment, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada,
- Mathers, A., & Stewart, B. (1984). Manure effects on crop yields and soil properties. *Transactions of the ASAE*, 27(4), 1022-1026.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., & Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian geotechnical journal*, 40(5), 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. P., & Bussière, B. (2000). Développement de fonctions hydriques utilisant les propriétés géotechniques de base.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. P., & Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical & Geological Engineering : An International Journal*, 20(3), 235-259. <https://doi.org/10.1023/A:1016046214724>
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Maqsood, A., & Bussière, B. (2006). Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 132(9), 1121-1132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:9\(1121\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:9(1121))
- McBride, R. A., & Mackintosh, E. E. (1984). Soil Survey Interpretations from Water Retention Data: I. Development and Validation of a Water Retention Model. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1338-1343. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060028x>
- McCarthy, D. F. (2007). *Essentials of soil mechanics and foundations : basic geotechnics* (7th ed.). Pearson/Prentice Hall. 850p.
- MDDEP, M. d. d. d., de l'environnement et des parcs) (2012). *Directive 019 sur l'industrie minière. 95 pages*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/index.htm
- Menberu, M. W., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Haghghi, A. T., & Kløve, B. (2021). Hydraulic and Physical Properties of Managed and Intact Peatlands: Application of the Van Genuchten-Mualem Models to Peat Soils. *Water Resources Research*, 57(7). <https://doi.org/10.1029/2020WR028624>
- MEND. (1996). Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings, Mine Environment Neutral Drainage, Report 2.17. 1. In: Canada Centre for Mineral and Energy Technology Ottawa, Canada.
- MEND. (2001). Mine environment neutral drainage (MEND) rmanual, Vol. 4. Prevention and Control, MEND 5.4.2d, Canada Centre for Minerai and Energy Technology (CANMET), Canada.

- Monterroso, C., & Macías, F. (1998). Drainage waters affected by pyrite oxidation in a coal mine in Galicia (NW Spain): Composition and mineral stability. *Science of the Total Environment*, 216(1-2), 121-132. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00149-1)
- Morel-Seytoux, H. (1992). L'effet de barrière capillaire à l'interface de deux couches de sol aux propriétés fort contrastées [ACL : Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées par l'AERES]. *Hydrologie Continentale*, 7(2), 117-128. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:39523>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Musy, A. (2001). Cours d'Hydrologie générale. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (EPFL), Suisse*.
- Nayak, M., Patgiri, D., & Baruah, T. (2017). Effect of Organic Matter and Initial Moisture Content on Water Transmission Characteristics of Alfisols of Assam. *Agropedology*, 27. <https://doi.org/10.47114/j.agroped.2017.jun5>
- Neculita, C. M., Zagury, G. J., & Bussière, B. (2007). Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulfate-reducing bacteria: critical review and research needs. *J Environ Qual*, 36(1), 1-16. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0066>
- Nemes, A., & Rawls, W. J. (2006). Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132(1-2), 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.018>
- Nguyen, P. M., Haghverdi, A., Pue, J. D., Botula, Y.-D., Le, K. V., Waegeman, W., & Cornelis, W. (2017). Comparison of statistical regression and data-mining techniques in estimating soil water retention of tropical delta soils. *Biosystems Engineering*, 153, 12-27.
- Nicholson, R. (1994). Chapter 6, Iron-sulfide oxidation mechanisms: Laboratory studies. In J. L. J. a. D. W. Blowes (Ed.), *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. (pp. 164-183).
- 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.
- Nong, X. F., Rahardjo, H., Lee, D. T. T., Leong, E. C., & Fong, Y. K. (2019). Effects of organic content on soil-water characteristic curve and soil shrinkage. *Environmental Geotechnics*, 8(7), 442-451.
- Nordstrom, D. K. (2000). Advances in the Hydrogeochemistry and Microbiology of Acid Mine Waters. *International Geology Review*, 42(6), 499-515. <https://doi.org/10.1080/00206810009465095>
- Nordstrom, D. K., & Southam, G. (1997). Geomicrobiology of Sulfide Mineral Oxidation. *REVIEWS IN MINERALOGY*, 35, 361-390.
- Olness, A., & Archer, D. (2005). Effect of organic carbon on available water in soil. *Soil Science*, 170(2), 90-101.

- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. J. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1312-1323. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.005>
- Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés* [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/673/>
- Pabst, T. (2021). Elevated water table with monolayer covers. *Hard Rock Mine Reclamation. From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*; Bussière, B., Guittonny, M., Eds., 187-202.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.05.006>
- Päivänen, J. (1973). *Hydraulic Conductivity and water retention in peat soils. Suomen Metsätieteellinen Seura. Acta forestalia Fennica Vol. 129, 1-70.*
- Papuga, K., Kaszubkiewicz, J., Kawalko, D., & Kreimeyer, M. (2022). Effect of organic matter removal by hydrogen peroxide on the determination of soil particle size distribution using the dynamometer method. *Agriculture*, 12(2), 226.
- Parent, S.-E. t. (2003). *Étude des couvertures avec effet de barrière capillaire : applications à l'utilisation des résidus de désencrage comme matériau de recouvrement de sites de résidus miniers et de lieux d'enfouissement sanitaire* WorldCat.org.
- Parent, S.-E. t., & Cabral, A. (2006). Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect. *Geotechnical & Geological Engineering : An International Journal*, 24(3), 689-710. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-3229-9>
- Peregoedova, A. (2012). *Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire* [Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/983/>
- Perie, C., & Ouimet, R. (2008). Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 88(3), 315-325. <https://doi.org/10.4141/CJSS06008>
- Peters, A. (2013). Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research*, 49(10), 6765-6780. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20548>
- Peters, A. (2014). Reply to comment by S. Iden and W. Durner on “Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range”. *Water Resources Research*, 50(9), 7535-7539. <https://doi.org/10.1002/2014WR016107>
- Petersen, G. W., Cunningham, R. L., & Matelski, R. P. (1968). Moisture Characteristics of Pennsylvania Soils: II. Soil Factors Affecting Moisture Retention Within a Textural Class—Silt Loam. *Soil Science Society of America Journal*, 32(6), 866-870. <https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200060042x>

- Proteau, A. (2021). *Influence de la végétation et des racines sur la performance d'une couverture à effets de barrière capillaire sur un site minier dix-sept ans après restauration*. (Thèse de doctorat). Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.]. <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/1319>
- Puckett, W., Dane, J., & Hajek, B. (1985). Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 831-836.
- Quideau, S., Simpson, M., & Gillespie, A. (2021). Soil Organic Matter. In *Digging into Canadian Soils: An Introduction to Soil Science*. University of Saskatchewan. <https://geo.libretexts.org/@go/page/16607>
- Radforth, N. W., & Brawner, C. (1977). *Muskeg and the northern environment in Canada*. University of Toronto Press.
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Reina-Leal, C. R., Ramírez, C. S., & Colmenares, J. E. (2019). Influence of the Organic Matter Content on the soil water retention characteristics of a reconstituted kaolinitic clay. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 7(2), 439-444.
- Rezanezhad, F., Price, J. S., & Craig, J. R. (2012). The effects of dual porosity on transport and retardation in peat: A laboratory experiment. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 92(5), 723-732.
- Rezanezhad, F., Price, J. S., Quinton, W. L., Lennartz, B., Milojevic, T., & Van Cappellen, P. (2016). Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. *Chemical Geology*, 429, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.010>
- Richards, L. A. (1931). *Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums*.
- Riley, H. (1981). Relationships between soil moisture-holding properties and soil texture, organic matter content, and bulk density. .
- Ritchie, A. I. M. (1994). Chapter 8, Sulfide oxydation mechanisms: Controls and rates of oxygen transport. In J. L. J. a. D. W. Blowes (Ed.), *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste* (pp. 201-245).
- Robitaille, V., & Tremblay, D. (1997). *Soil mechanics: theory and practice*. Modulo editor, 652p.
- Rompré, M., & Carrier, D. (1997). *Étude pédologique des sols défrichés de l'Abitibi-Témiscamingue*. Centre de recherche et d'expérimentation en sols, Ministère de l'agriculture
- Rosa, E., & Larocque, M. (2008). Investigating peat hydrological properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland complex (southern Quebec, Canada). *Hydrological Processes*, 22(12), 1866-1875. <https://doi.org/10.1002/hyp.6771>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

- Scheinost, A., Sinowski, W., & Auerswald, K. (1997). Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, 78(3-4), 129-143.
- Schlotzhauer, S. M., & Price, J. S. (1999). Soil water flow dynamics in a managed cutover peat field, Quebec: Field and laboratory investigations. *Water Resources Research*, 35(12), 3675-3683. <https://doi.org/10.1029/1999WR900126>
- Schmid, C. J., Murphy, J. A., & Murphy, S. (2017). Effect of tillage and compost amendment on turfgrass establishment on a compacted sandy loam. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(1), 55-64. <https://doi.org/10.2489/jswc.72.1.55>
- Singer, P. C., & Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage: the rate-determining step. *Science*, 167(3921), 1121-1123. <https://doi.org/10.1126/science.167.3921.1121>
- Surridge, B. W. J., Baird, A. J., & Heathwaite, A. L. (2005). Evaluating the quality of hydraulic conductivity estimates from piezometer slug tests in peat. *Hydrological Processes*, 19(6), 1227-1244. <https://doi.org/10.1002/hyp.5653>
- Szajdak, L. W., Szatyłowicz, J., & Kölli, R. (2011). Peats and Peatlands, Physical Properties. In J. Gliński, J. Horabik, & J. Lipiec (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics* (pp. 551-555). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_221
- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et Rompré, M. (1991). Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. . 83.
- Tarnocai, C., Kettles, I. M. B. M., Geological Survey of Canada, A., & Agri-Food, C. (1995). *Peatlands of Canada*. Geological Survey of Canada.
- Tassinari, D., Soares, P. G., Costa, C. R., Barral, U. M., Horák-Terra, I., Silva, A. C., & Carmo, W. J. (2022). Water retention and pore size distribution in organic soils from tropical mountain peatlands under forest and grassland. *Mires & Peat*(28).
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics* (711p, Ed.). New York. JOHN WILEY & SONS, Inc. London. CHAMPMAN & HALL, Limited.
- Tomasella, J., & Hodnett, M. G. (1998). Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, 163(3), 190-202. https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1998/03000/estimating_soil_water_retention_characteristics.3.aspx
- Tremblay, D., & Robitaille, V. (2014). *Mécanique des sols : théorie et pratique* (2e édition. ed.). Modulo.
- van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Genuchten, M. v., Leij, F., & Yates, S. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Vereecken, H. (2004). Statistical regression. *Developments in Soil Science*, 30C, 3-19.
- Vereecken, H., Maes, J., & Feyen, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149(1), 1-12.

- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., & Darius, P. L. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148, 389–403.
- Vick, S. G. (1990). Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams [BiTech]. <https://open.library.ubc.ca/collections/52387/items/1.0394902>
- von Post, L. (1922). Sveriges Geologiska Undersöknings torvinventering och några av dess hittills vunna resultat. Svenskamosskulturföreningens.
- Wang, M., Liu, H., & Lennartz, B. (2021). Small-scale spatial variability of hydro-physical properties of natural and degraded peat soils. *Geoderma*, 399, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115123>
- Weber, T. K. D., Iden, S. C., & Durner, W. (2017a). A pore-size classification for peat bogs derived from unsaturated hydraulic properties. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6185-6200. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6185-2017>
- Weber, T. K. D., Iden, S. C., & Durner, W. (2017b). Unsaturated hydraulic properties of Sphagnum moss and peat reveal trimodal pore-size distributions. *Water Resources Research*, 53(1), 415-434. <https://doi.org/10.1002/2016WR019707>
- Wesseling, J., Stoof, C., Ritsema, C., Oostindie, K., & Dekker, L. (2009). The effect of soil texture and organic amendment on the hydrological behaviour of coarse-textured soils. *Soil use and management*, 25(3), 274-283.
- Weynants, M., Vereecken, H., & Javaux, M. (2009). Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 86-95.
- Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 123-150. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00464-4)
- Yang, F., Zhang, G.-L., Yang, J.-L., Li, D.-C., Zhao, Y.-G., Liu, F., Yang, R.-M., & Yang, F. (2014). Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 519(Part D), 3086-3093. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.054>
- Zaccone, C., Martin, M., Freppaz, M., Said-Pullicino, D., & Celi, L. (2015). Peatlands and organic soils. In *Understanding Mountain Soils: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015* (pp. 67-69). FAO.
- Zebarth, B. J., Neilsen, G. H., Hogue, E. J., & Neilsen, D. (1999). Influence of organic waste amendments on selected soil physical and chemical properties. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 79(3), 501-504.
- Zhang, J., Qun, C., & Changfu, Y. (2016). Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil. *Pedosphere*, 26(2), 265-272.
- Zulkifley, M. T. M., Ng, T. F., Raj, J. K., Ghani, A., Shuib, M. K., Ashraf, M. A., & Hashim, R. (2013). Definitions and engineering classifications of tropical lowland peats. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(3-4), 547-553. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0520-5>

ANNEXE A COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DU SABLE ET DU SILT

Tableau A.1 Proportions des minéraux identifiés par DRX dans le sable.

Nom échantillon	Minéraux	% en poids
Sable	Actinolite	6,09
	Albite	36,82
	Clinochlore	8,23
	Clinozoisite	10,47
	Muscovite	7,19
	Schorl (tourmaline)	2,73
	Quartz	28,47
	Totale	100

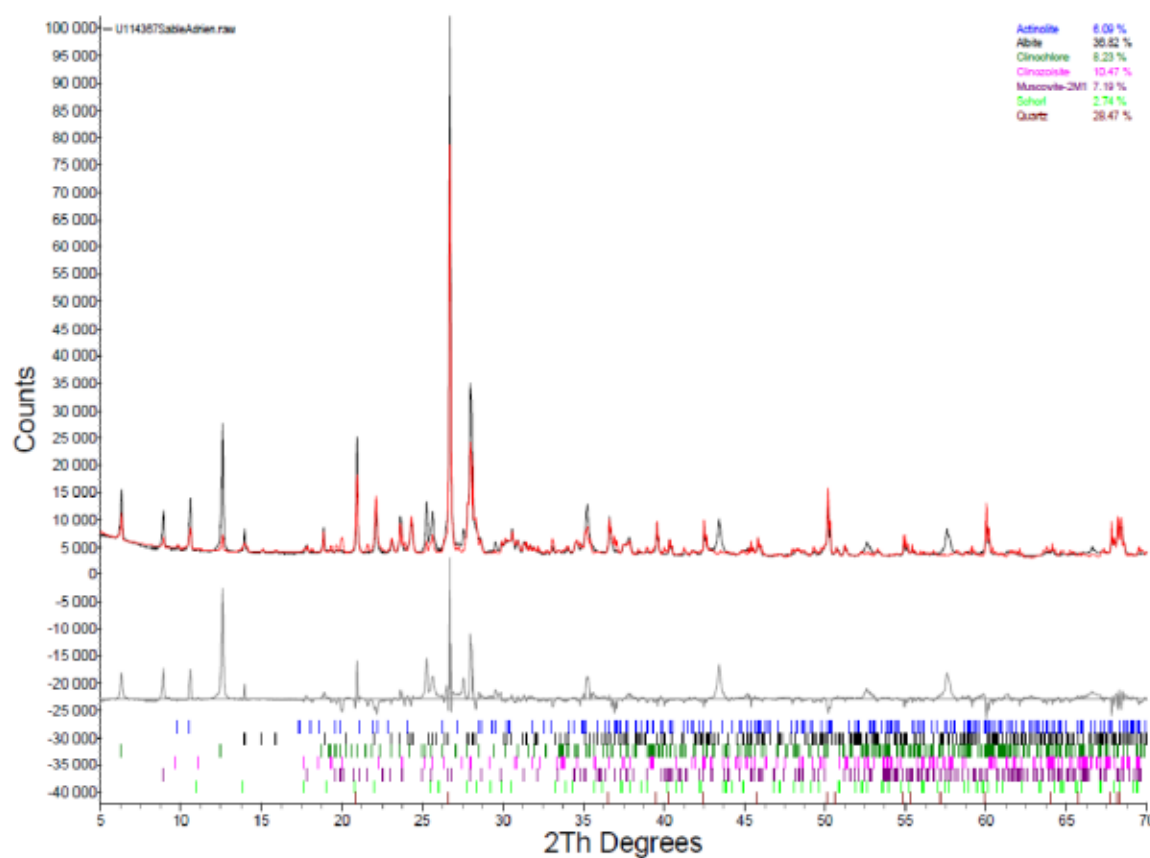


Figure A.1 Modèle de diffraction des rayons X du sable.

Tableau A.2 Proportions des minéraux identifiés par DRX du silt.

Nom échantillon	Minéraux	% en poids
Silt	Actinolite	5,58
	Albite	38,5
	Clinochlore	2,82
	Clinozoisite	5,84
	Muscovite	4,16
	Schorl (tourmaline)	1,78
	Quartz	41,32
	Totale	100

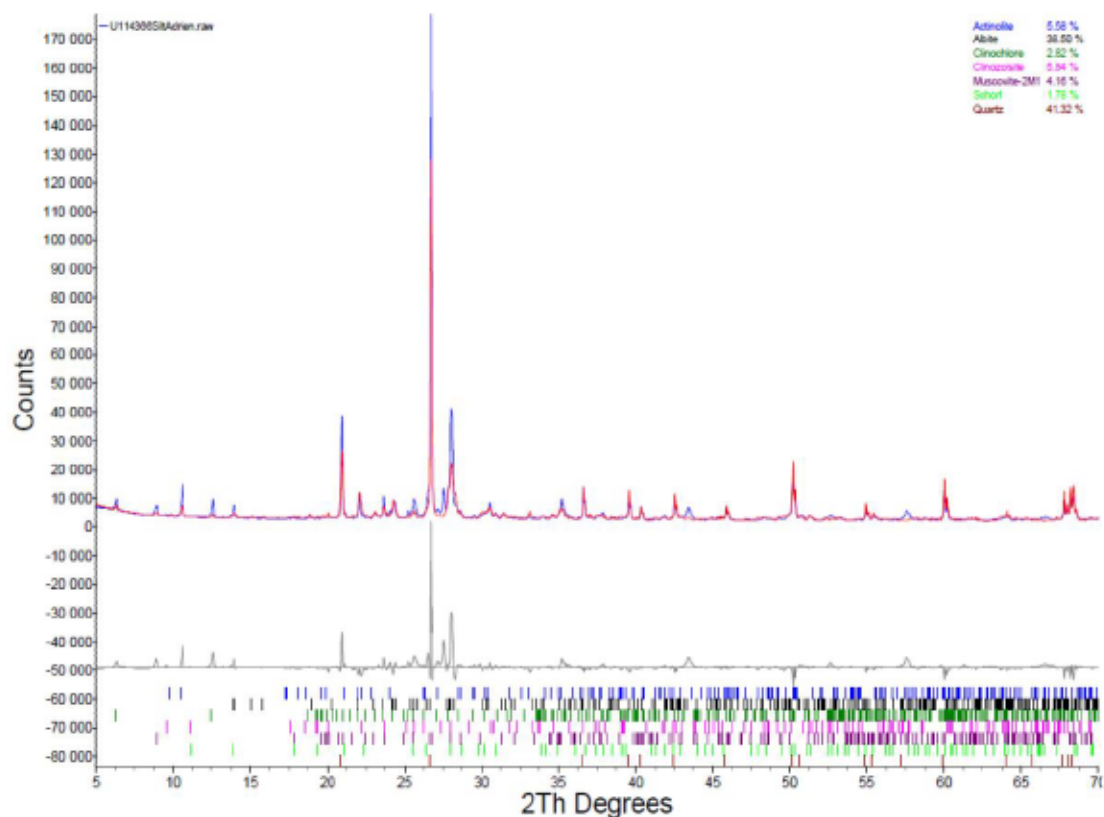


Figure A.2 Modèle de diffraction des rayons X du sable.

ANNEXE B CORRÉLATION DES PARAMÈTRES POUR LA RÉGRESSION

Tableau B.1 Matrice de corrélation des variables de prédiction et de mesure et niveaux de signification correspondants de l'ensemble des données des mélanges du sable.

Variables	θ_s (-)	To (%)	P _{<80 μm} (%)	P _{>80 μm} (%)	D ₁₀ (μm)	D ₂₀ (μm)	D ₃₀ (μm)	D ₄₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₆₀ (μm)	D ₇₀ (μm)	D ₈₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	C _V (-)	C _C (-)	G _S (-)	ψ _i (cm)	ψ _r (cm)	ψ _p (cm)	θ _i (-)
θ_s (-)	1	0,839	0,838	-0,838	-0,867	-0,814	-0,750	-0,752	-0,726	-0,664	-0,422	0,587	0,606	-0,308	-0,324	-0,890	0,841	0,860	0,700	0,953
To (%)	0,839	1	0,997	-0,997	-0,930	-0,937	-0,918	-0,958	-0,937	-0,876	-0,572	0,806	0,913	-0,742	-0,636	-0,995	0,542	0,980	0,814	0,904
P _{<80 μm} (%)	0,838	0,997	1	-1,000	-0,946	-0,953	-0,936	-0,967	-0,947	-0,891	-0,600	0,782	0,904	-0,717	-0,673	-0,993	0,528	0,969	0,803	0,899
P _{>80 μm} (%)	-0,838	-0,997	-1,000	1	0,946	0,953	0,936	0,967	0,947	0,891	0,600	-0,782	-0,904	0,717	0,673	0,993	-0,528	-0,969	-0,803	-0,899
D ₁₀ (μm)	-0,867	-0,930	-0,946	0,946	1	0,993	0,976	0,960	0,954	0,929	0,746	-0,572	-0,737	0,523	0,734	0,943	-0,578	-0,893	-0,724	-0,877
D ₂₀ (μm)	-0,814	-0,937	-0,953	0,953	0,993	1	0,994	0,983	0,981	0,962	0,783	-0,580	-0,767	0,595	0,791	0,938	-0,519	-0,895	-0,725	-0,841
D ₃₀ (μm)	-0,750	-0,918	-0,936	0,936	0,976	0,994	1	0,987	0,989	0,980	0,823	-0,551	-0,766	0,625	0,852	0,910	-0,455	-0,865	-0,691	-0,783
D ₄₀ (μm)	-0,752	-0,958	-0,967	0,967	0,960	0,983	0,987	1	0,997	0,975	0,772	-0,645	-0,837	0,730	0,806	0,943	-0,446	-0,920	-0,759	-0,814
D ₅₀ (μm)	-0,726	-0,937	-0,947	0,947	0,954	0,981	0,989	0,997	1	0,989	0,815	-0,593	-0,805	0,722	0,830	0,920	-0,428	-0,899	-0,745	-0,786
D ₆₀ (μm)	-0,664	-0,876	-0,891	0,891	0,929	0,962	0,980	0,975	0,989	1	0,892	-0,469	-0,719	0,684	0,868	0,857	-0,387	-0,838	-0,699	-0,717
D ₇₀ (μm)	-0,422	-0,572	-0,600	0,600	0,746	0,783	0,823	0,772	0,815	0,892	1	-0,022	-0,340	0,426	0,840	0,556	-0,235	-0,543	-0,474	-0,439
D ₈₀ (μm)	0,587	0,806	0,782	-0,782	-0,572	-0,580	-0,551	-0,645	-0,593	-0,469	-0,022	1	0,937	-0,726	-0,293	-0,787	0,327	0,777	0,609	0,690
D ₉₀ (μm)	0,606	0,913	0,904	-0,904	-0,737	-0,767	-0,766	-0,837	-0,805	-0,719	-0,340	0,937	1	-0,849	-0,589	-0,881	0,299	0,863	0,681	0,717
C _V (-)	-0,308	-0,742	-0,717	0,717	0,523	0,595	0,625	0,730	0,722	0,684	0,426	-0,726	-0,849	1	0,545	0,675	-0,061	-0,739	-0,666	-0,481
C _C (-)	-0,324	-0,636	-0,673	0,673	0,734	0,791	0,852	0,806	0,830	0,868	0,840	-0,293	-0,589	0,545	1	0,599	-0,085	-0,527	-0,340	-0,357
G _S (-)	-0,890	-0,995	-0,993	0,993	0,943	0,938	0,910	0,943	0,920	0,857	0,556	-0,787	-0,881	0,675	0,599	1	-0,609	-0,979	-0,807	-0,934
ψ _i (cm)	0,841	0,542	0,528	-0,528	-0,578	-0,519	-0,455	-0,446	-0,428	-0,387	-0,235	0,327	0,299	-0,061	-0,085	-0,609	1	0,588	0,333	0,673
ψ _r (cm)	0,860	0,980	0,969	-0,969	-0,893	-0,895	-0,865	-0,920	-0,899	-0,838	-0,543	0,777	0,863	-0,739	-0,527	-0,979	0,588	1	0,887	0,931
ψ _p (cm)	0,700	0,814	0,803	-0,803	-0,724	-0,725	-0,691	-0,759	-0,745	-0,699	-0,474	0,609	0,681	-0,666	-0,340	-0,807	0,333	0,887	1	0,854
θ _i (-)	0,953	0,904	0,899	-0,899	-0,877	-0,841	-0,783	-0,814	-0,786	-0,717	-0,439	0,690	0,717	-0,481	-0,357	-0,934	0,673	0,931	0,854	1

Tableau B.2 Matrice de corrélation des variables de prédiction et de mesure et niveaux de signification correspondants de l'ensemble des données des mélanges du silt.

Variables	θ_s (-)	n (-)	To (%)	P _{<50 μm} (%)	P _{>50 μm} (%)	D ₁₀ (μm)	D ₂₀ (μm)	D ₃₀ (μm)	D ₄₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₆₀ (μm)	D ₇₀ (μm)	D ₈₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	C _U (-)	C _C (-)	G _S (-)	w _L (%)	w _P (-)	a _r	m _r	n _r
θ_s (-)	1	0,964	0,916	-0,067	0,067	-0,602	-0,144	0,180	0,243	0,318	0,451	0,603	0,740	0,767	0,894	0,882	-0,924	0,866	0,856	-0,123	0,286	0,701
n (-)	0,964	1	0,977	-0,023	0,023	-0,645	-0,187	0,132	0,212	0,304	0,464	0,651	0,838	0,883	0,953	0,943	-0,981	0,956	0,930	-0,140	0,393	0,710
To (%)	0,916	0,977	1	-0,066	0,066	-0,578	-0,132	0,163	0,250	0,349	0,515	0,705	0,907	0,950	0,935	0,895	-1,000	0,991	0,974	-0,092	0,506	0,730
P _{<50 μm} (%)	-0,067	-0,023	-0,066	1	-1,000	-0,733	-0,976	-0,992	-0,980	-0,949	-0,857	-0,665	-0,130	-0,093	-0,153	0,146	0,077	-0,108	-0,266	-0,403	-0,101	0,055
P _{>50 μm} (%)	0,067	0,023	0,066	-1,000	1	0,733	0,976	0,992	0,980	0,949	0,857	0,665	0,130	0,093	0,153	-0,146	-0,077	0,108	0,266	0,403	0,101	-0,055
D ₁₀ (μm)	-0,602	-0,645	-0,578	-0,733	0,733	1	0,863	0,649	0,591	0,513	0,347	0,089	-0,408	-0,461	-0,533	-0,762	0,574	-0,528	-0,389	0,501	-0,063	-0,515
D ₂₀ (μm)	-0,144	-0,187	-0,132	-0,976	0,976	0,863	1	0,943	0,917	0,871	0,752	0,530	-0,024	-0,071	-0,051	-0,347	0,123	-0,083	0,077	0,459	0,057	-0,213
D ₃₀ (μm)	0,180	0,132	0,163	-0,992	0,992	0,649	0,943	1	0,994	0,971	0,896	0,723	0,206	0,172	0,252	-0,041	-0,176	0,198	0,354	0,355	0,119	0,013
D ₄₀ (μm)	0,243	0,212	0,250	-0,980	0,980	0,591	0,917	0,994	1	0,991	0,938	0,792	0,306	0,266	0,340	0,045	-0,262	0,290	0,438	0,329	0,156	0,048
D ₅₀ (μm)	0,318	0,304	0,349	-0,949	0,949	0,513	0,871	0,971	0,991	1	0,975	0,865	0,425	0,377	0,432	0,140	-0,359	0,391	0,530	0,293	0,213	0,077
D ₆₀ (μm)	0,451	0,464	0,515	-0,857	0,857	0,347	0,752	0,896	0,938	0,975	1	0,954	0,611	0,554	0,584	0,309	-0,523	0,558	0,675	0,216	0,297	0,144
D ₇₀ (μm)	0,603	0,651	0,705	-0,665	0,665	0,089	0,530	0,723	0,792	0,865	0,954	1	0,814	0,752	0,751	0,522	-0,709	0,744	0,823	0,095	0,386	0,233
D ₈₀ (μm)	0,740	0,838	0,907	-0,130	0,130	-0,408	-0,024	0,206	0,306	0,425	0,611	0,814	1	0,965	0,843	0,755	-0,900	0,924	0,918	-0,085	0,557	0,428
D ₉₀ (μm)	0,767	0,883	0,950	-0,093	0,093	-0,461	-0,071	0,172	0,266	0,377	0,554	0,752	0,965	1	0,848	0,777	-0,943	0,965	0,959	-0,007	0,677	0,584
C _U (-)	0,894	0,953	0,935	-0,153	0,153	-0,533	-0,051	0,252	0,340	0,432	0,584	0,751	0,843	0,848	1	0,951	-0,941	0,944	0,920	-0,208	0,236	0,605
C _C (-)	0,882	0,943	0,895	0,146	-0,146	-0,762	-0,347	-0,041	0,045	0,140	0,309	0,522	0,755	0,777	0,951	1	-0,899	0,887	0,816	-0,353	0,151	0,627
G _S (-)	-0,924	-0,981	-1,000	0,077	-0,077	0,574	0,123	-0,176	-0,262	-0,359	-0,523	-0,709	-0,900	-0,943	-0,941	-0,899	1	-0,989	-0,974	0,094	-0,491	-0,733
w _L (%)	0,866	0,956	0,991	-0,108	0,108	-0,528	-0,083	0,198	0,290	0,391	0,558	0,744	0,924	0,965	0,944	0,887	-0,989	1	0,984	-0,076	0,515	0,695
w _P (-)	0,856	0,930	0,974	-0,266	0,266	-0,389	0,077	0,354	0,438	0,530	0,675	0,823	0,918	0,959	0,920	0,816	-0,974	0,984	1	0,008	0,560	0,678
a _r	-0,123	-0,140	-0,092	-0,403	0,403	0,501	0,459	0,355	0,329	0,293	0,216	0,095	-0,085	-0,007	-0,208	-0,353	0,094	-0,076	0,008	1	0,503	-0,017
m _r	0,286	0,393	0,506	-0,101	0,101	-0,063	0,057	0,119	0,156	0,213	0,297	0,386	0,557	0,677	0,236	0,151	-0,491	0,515	0,560	0,503	1	0,357
n _r	0,701	0,710	0,730	0,055	-0,055	-0,515	-0,213	0,013	0,048	0,077	0,144	0,233	0,428	0,584	0,605	0,627	-0,733	0,695	0,678	-0,017	0,357	1

ANNEXE C VALEURS DES TENEURS EN EAU MESURÉES ET PRÉDITES

Tableau C.1 Données comparatives des teneurs en eau mesurées et prédites du sable et de ses mélanges.

100% Sa + 0% To				99% Sa + 1% To				97% Sa + 3% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
0,1	1	0,3364	0,3326	0,1	1	0,3892	0,3842	0,1	1	0,4790	0,4660
0,25	2,5	0,3109	0,3018	0,25	2,5	0,3588	0,3615	0,25	2,5	0,4496	0,4408
1	10	0,1614	0,1474	1	10	0,2207	0,2183	1	10	0,3226	0,3338
3,16	31,6	0,0510	0,0894	3,16	31,6	0,0969	0,1176	3,16	31,6	0,1793	0,2094
6,31	63,1	0,0381	0,0722	6,31	63,1	0,0731	0,0881	6,31	63,1	0,1337	0,1533
95% Sa + 5% To				92,5% Sa + 7,5% To				90% Sa + 10% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
0,1	1	0,5320	0,5116	0,1	1	0,5997	0,5946	0,1	1	0,6424	0,6342
0,25	2,5	0,4931	0,4830	0,25	2,5	0,5749	0,5785	0,25	2,5	0,6118	0,6144
1	10	0,3646	0,3825	1	10	0,4827	0,4556	1	10	0,4753	0,4952

Tableau C.1 Données comparatives des teneurs en eau mesurées et prédites du sable et de ses mélanges. (suite)

95% Sa + 5% To				92,5% Sa + 7,5% To				90% Sa + 10% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
0,1	1	0,5320	0,5116	0,1	1	0,5997	0,5946	0,1	1	0,6424	0,6342
0,25	2,5	0,4931	0,4830	0,25	2,5	0,5749	0,5785	0,25	2,5	0,6118	0,6144
1	10	0,3646	0,3825	1	10	0,4827	0,4556	1	10	0,4753	0,4952
3,16	31,6	0,2262	0,2611	3,16	31,6	0,2762	0,2464	3,16	31,6	0,3070	0,2971
6,31	63,1	0,1714	0,1971	6,31	63,1	0,2206	0,1583	6,31	63,1	0,2477	0,1993
87,5% Sa + 12,5% To				85% Sa + 15% To							
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)				
0,1	1	0,6922	0,6861	0,1	1	0,7235	0,7156				
0,25	2,5	0,6440	0,6694	0,25	2,5	0,6746	0,6966				
1	10	0,5180	0,5503	1	10	0,5316	0,5785				
3,16	31,6	0,3285	0,3218	3,16	31,6	0,3463	0,3590				
6,31	63,1	0,2635	0,2077	6,31	63,1	0,2825	0,2402				

Tableau C.2 Données comparatives des teneurs en eau mesurées et prédites du silt et de ses mélanges.

100% Si + 0% To				99% Si + 1% To				97% Si + 3% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
0	1	0,3920	0,3912	0	1	0,3722	0,3655	0	1	0,4560	0,4560
5	51	0,3013	0,3316	5,6	57,12	0,2806	0,2811	4,4	44,88	0,4533	0,4536
12,2	124,44	0,2623	0,2622	15,2	155,04	0,2054	0,2151	8,8	89,76	0,4470	0,4506
19,2	195,84	0,2056	0,2156	40,8	416,16	0,1508	0,1299	16,8	171,36	0,4395	0,4444
43,2	440,64	0,0967	0,1326	80,6	822,12	0,0592	0,0725	60,4	616,08	0,4024	0,4044
98,2	1001,64	0,0626	0,0726	130,4	1330,08	0,0374	0,0406	118,2	1205,64	0,3286	0,3479
151,8	1548,36	0,0523	0,0524	180,4	1840,08	0,0263	0,0248	204,4	2084,88	0,2639	0,2697
199,2	2031,84	0,0434	0,0429	223,6	2280,72	0,0164	0,0170	295,2	3011,04	0,1764	0,2009
278	2835,6	0,0325	0,0339	260,2	2654,04	0,0156	0,0127				
292,2	2980,44	0,0325	0,0327	297,8	3037,56	0,0131	0,0096				
95% Si + 5% To				92,5% Si + 7,5% To				90% Si + 10% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
0	1	0,4964	0,4964	0	1	0,5524	0,5509	0	1	0,6138	0,6134

Tableau C.2 Données comparatives des teneurs en eau mesurées et prédites du silt et de ses mélanges. (suite)

95% Si + 5% To				92,5% Si + 7,5% To				90% Si + 10% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
4,4	44,88	0,4698	0,4801	4,2	42,84	0,4672	0,4632	3	30,6	0,5710	0,5784
8,8	89,76	0,4308	0,4503	10	102	0,4211	0,3720	7,2	73,44	0,5016	0,5181
16,8	171,36	0,4037	0,3899	19	193,8	0,3204	0,2890	9,8	99,96	0,4680	0,4846
60,4	616,08	0,1964	0,2163	52,8	538,56	0,1699	0,1748	31,6	322,32	0,3423	0,3245
118,2	1205,64	0,1331	0,1532	134,4	1370,88	0,1322	0,1096	63	642,6	0,2043	0,2432
204,4	2084,88	0,1161	0,1191	190,8	1946,16	0,0903	0,0929	122,4	1248,48	0,1781	0,1866
295,2	3011,04	0,1055	0,1021					201,8	2058,36	0,1602	0,1551
								246,6	2515,32	0,1454	0,1445
								298,6	3045,72	0,1375	0,1352
87,5% Si + 12,5% To				85% Si + 15% To							
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)				
0	1	0,5725	0,5724	0	1	0,5888	0,5889				
3	30,6	0,5691	0,5698	10,2	104,04	0,5823	0,5800				

Tableau C.2 Données comparatives des teneurs en eau mesurées et prédites du silt et de ses mélanges. (suite)

87,5% Si + 12,5% To				85% Si + 15% To			
Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)	Pression (kPa)	Pression (cm)	θ_s mesurée (-)	θ_s prédite (-)
7,2	73,44	0,5632	0,5621	30,8	314,16	0,5175	0,5447
9,8	99,96	0,5577	0,5556	60	612	0,4614	0,4721
31,6	322,32	0,4887	0,4780	120	1224	0,3486	0,2994
63	642,6	0,3808	0,3780	182,2	1858,44	0,1346	0,1537
122,4	1248,48	0,3000	0,2798				
201,8	2058,36	0,2192	0,2233				

ANNEXE D COEFFICIENTS ET ERREUR DES RÉGRESSIONS

Tableau D.1 Récapitulatif des erreurs et coefficients de la prédiction du sable et de ses mélanges.

	SSD	MSE	RMSE	R ²	r
100% Sa + 0% To	2,94 x10 ⁻³	5,88 x10 ⁻⁴	2,42 x10 ⁻²	9,85 x10 ⁻¹	9,92 x10 ⁻¹
99% Sa + 1% To	6,91E-04	1,38 x10 ⁻⁴	1,18 x10 ⁻²	9,98 x10 ⁻¹	9,99 x10 ⁻¹
97% Sa + 3% To	1,66 x10 ⁻³	3,33 x10 ⁻⁴	1,82 x10 ⁻²	9,98 x10 ⁻¹	9,99 x10 ⁻¹
95% Sa + 5% To	2,72 x10 ⁻³	5,44 x10 ⁻⁴	2,33 x10 ⁻²	9,96 x10 ⁻¹	9,98 x10 ⁻¹
92,5% Sa + 7,5% To	5,54 x10 ⁻³	1,11 x10 ⁻³	3,33 x10 ⁻²	9,97 x10 ⁻¹	9,98 x10 ⁻¹
90% Sa + 10% To	2,92 x10 ⁻³	5,84 x10 ⁻⁴	2,42 x10 ⁻²	9,89 x10 ⁻¹	9,95 x10 ⁻¹
87,5% Sa + 12,5% To	4,89 x10 ⁻³	9,77 x10 ⁻⁴	3,13 x10 ⁻²	9,85 x10 ⁻¹	9,92 x10 ⁻¹
85% Sa + 15% To	4,70 x10 ⁻³	9,40 x10 ⁻⁴	3,07 x10 ⁻²	9,79 x10 ⁻¹	9,89 x10 ⁻¹

Tableau D.2 Récapitulatif des erreurs et coefficients de la prédiction du silt et de ses mélanges.

	SSD	MSE	RMSE	R ²	r
100% Si + 0% To	2,41 x10 ⁻³	2,41 x10 ⁻⁴	1,55 x10 ⁻²	9,90 x10 ⁻¹	9,95 x10 ⁻¹
99% Si + 1% To	7,88 x10 ⁻⁴	7,88 x10 ⁻⁵	8,88 x10 ⁻³	9,95 x10 ⁻¹	9,97 x10 ⁻¹
97% Si + 3% To	7,88 x10 ⁻⁴	7,88 x10 ⁻⁵	8,88 x10 ⁻³	9,95 x10 ⁻¹	9,97 x10 ⁻¹
95% Si + 5% To	1,50 x10 ⁻³	1,87 x10 ⁻⁴	1,37 x10 ⁻²	9,95 x10 ⁻¹	9,97 x10 ⁻¹
92,5% Si + 7,5% To	3,96 x10 ⁻³	5,66 x10 ⁻⁴	2,38 x10 ⁻²	9,87 x10 ⁻¹	9,94 x10 ⁻¹
90% Si + 10% To	2,53 x10 ⁻³	2,53 x10 ⁻⁴	1,59 x10 ⁻²	9,94 x10 ⁻¹	9,97 x10 ⁻¹
87,5% Si + 12,5% To	5,51E-04	6,89E-05	8,30E-03	9,97E-01	9,99 x10 ⁻¹
85% Si + 15% To	3,64E-03	6,07E-04	2,46E-02	9,77E-01	9,88 x10 ⁻¹

SSD (*sum of squared deviations*) : somme des écarts au carré ;

MSE (*mean squared error*) : erreur quadratique moyenne ;

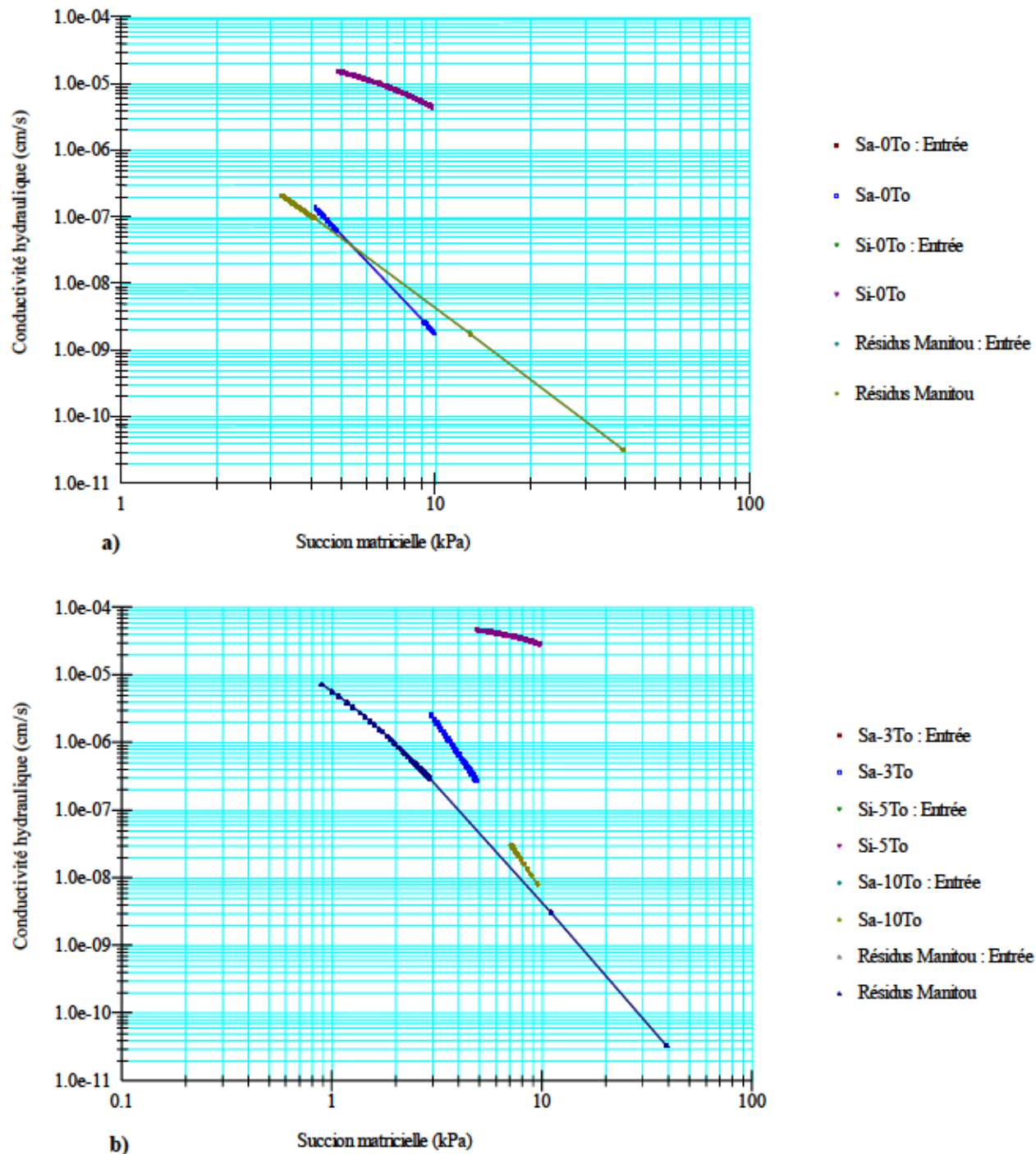
RMSE (*root mean square error*) : erreur quadratique moyenne ;

R² (*coefficient of determination*) : coefficient de détermination ;

r (*Pearson correlation coefficient*) : coefficient de corrélation de Pearson.

ANNEXE E ÉVALUATION DE LA CONVERGENCE

La figure E.1 montre une correspondance étroite entre les fonctions « réelles » et les fonctions d'entrée : convergence k_{sat} vs CRE obtenue pour les scénarios C1, C2 et C3.



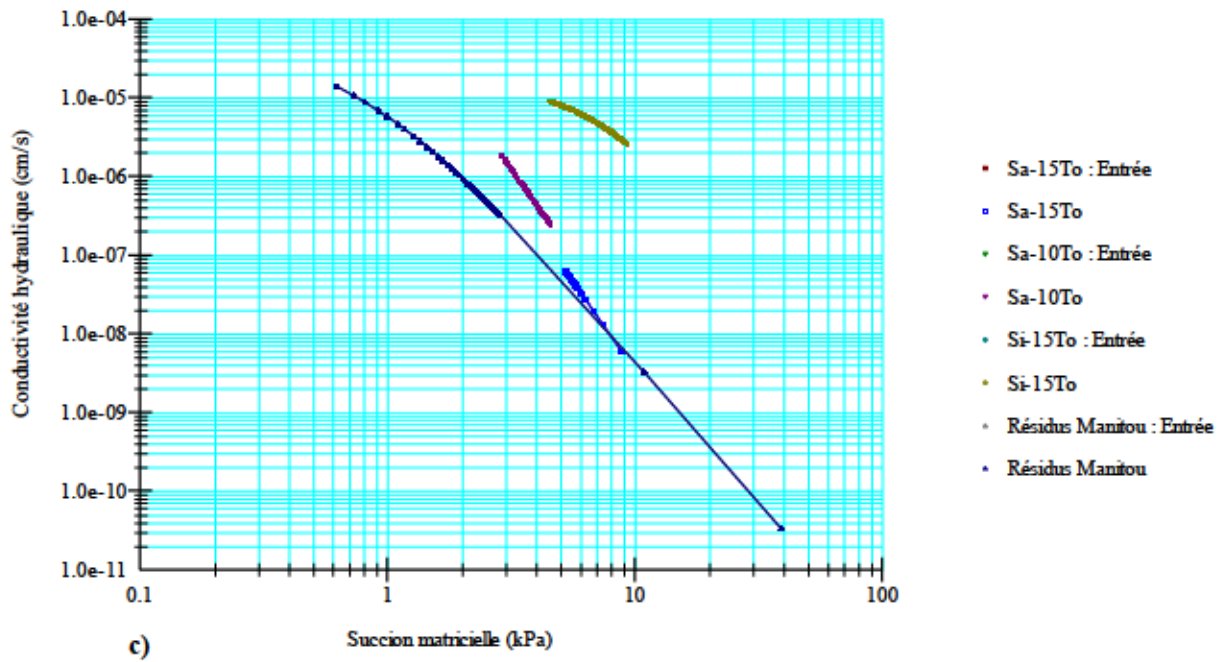


Figure E.1 Graphique de la conductivité en fonction de la succion illustrant les solutions convergentes pour le : a) scénario C1, b) scénario C2 et c) scénario C3.