



# BIBLIOTHÈQUE

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

## Mise en garde

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

## Warning

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

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE**

**ÉVALUATION SUR LE TERRAIN DE LA PERFORMANCE DES  
ARGILES ABITIBIENNES EN TANT QUE RECOUVREMENTS À FAIBLE  
CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

**ALEJANDRO EDILBERTO GRANADOS BECERRA**

FEVRIER 2024

## DÉDICACE

*À Helena et Carolina*

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Abdelkabar Maqsoud pour sa disponibilité et son encadrement tout au long de ce projet. Je suis aussi reconnaissant de l'appui et de la disponibilité de mon codirecteur, le professeur Tikou Belem.

Je remercie la Fonderie Horne, les Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies et la Fondation de l'UQAT pour le financement du projet de recherche.

J'adresse mes remerciements à toute l'équipe technique de l'URSTM, particulièrement à Jean Christophe, Guillaume, Elvin, Alain et Joël pour leur précieuse aide pendant les travaux sur le terrain et les essais au laboratoire.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

## RÉSUMÉ

L'exploitation minière et le traitement des minerais génèrent une quantité importante de rejets miniers solides. Ces rejets solides ont des compositions chimiques et minéralogiques variées et sous certaines conditions environnementales ils peuvent générer des eaux minières acides appelées drainage minier acide (DMA).

Les couvertures à faible conductivité hydraulique saturée ou barrière hydraulique sont l'une des techniques de contrôle de la formation du DMA. Ces couvertures visent à limiter l'infiltration de l'eau vers les résidus miniers réactifs, empêchant ainsi les réactions d'oxydation des minéraux sulfureux. Parmi les matériaux utilisés comme recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée, on retrouve les argiles compactées.

La performance des barrières hydrauliques à base d'argile peut être affectée par leurs propriétés géotechniques et hydrogéologiques. En effet, les cycles de gel-dégel peuvent engendrer une augmentation de leur conductivité hydraulique. Toutefois, ces effets peuvent être minimisés par l'ajout d'amendements.

Le projet de recherche vise à évaluer la performance des argiles abitibiennes comme barrière hydraulique afin de les utiliser dans la restauration des parcs à résidus miniers. À cette fin, quatre cellules expérimentales simulant des recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée ont été construites sur le terrain. La première simule une couverture composée entièrement d'argile, la deuxième composée d'un mélange argile-silt, la troisième d'un mélange argile-sable et la quatrième composée de deux couches d'argile intercalées par une couche de silt.

Chaque cellule a été équipée d'une station de mesures en continu des teneurs en eau volumiques, des succions, ainsi que de la température. Également, des essais de perméabilité et la mesure des débits de sortie ont été réalisés. Finalement, des simulations numériques de l'écoulement de l'eau à travers les cellules ont été réalisées et comparées aux données collectées expérimentalement.

Les résultats du suivi des différents paramètres et des simulations numériques ont permis d'évaluer l'efficacité des recouvrements à base d'argiles abitibiennes à contrôler l'infiltration de l'eau, de distinguer les effets des amendements, des conditions météorologiques et des conditions de mise

en place des recouvrements sur leur performance. De cette façon, les résultats des essais de laboratoire montrent que les matériaux utilisés dans les cellules expérimentales possèdent un potentiel pour être utilisés comme barrière étanche. Néanmoins, ce projet a permis de mettre en évidence qu'il y a une influence des conditions de mise en place; cette influence est marquée par la différence des valeurs de conductivité hydraulique saturée mesurées sur le terrain et celles mesurées au laboratoire.

Finalement, les résultats des suivis réalisés indiquent qu'il n'y a pas d'évidence de dégradation des propriétés hydrogéologiques pendant la période de suivi, même si le suivi révèle que certaines cellules ont été affectées par les conditions météorologiques liées au gel et/ou à la sécheresse.

## ABSTRACT

Mining and mineral processing produce a substantial amount of tailings. These tailings possess specific chemical and mineralogical compositions. Under certain environmental conditions they have the potential to contaminate mine water leading to generation of acid mine drainage (AMD).

Low Saturated hydraulic conductivity covers, or hydraulic barrier is one of the techniques that can be using to control AMD formation. These covers are designed to minimize water infiltration into reactive tailings, thereby preventing the occurrence of oxidation reactions of sulphid minerals. Materials used as a low saturated hydraulic conductivity cover include compacted clays.

The performance of clay-based hydraulic barriers may be affected by their geotechnical and hydrogeological properties. Indeed, freeze-thaw cycles can lead to an increase in their hydraulic conductivity. However, these effects can be minimized by adding amendments.

The research project aims to assess the effectiveness of Abitibian clays as a hydraulic barrier for use in the tailings storage facilities reclamation. In order to achieve this, four experimental cells simulating clay-based low hydraulic conductivity covers were built in the field. The first one simulates a cover composed entirely of clay, the second one composed by a mixture clay-silt, the third one by a mixture clay-sand and the last one composed by two layers of clay with an intermediate layer of silt.

Each cell was equipped with a monitoring station for continuous measurements of volumetric water content, suction, and temperature. Also, permeability tests and measurement of output flows were performed. Finally, numerical simulations of the water flow through the cells were performed and compared against the data collected experimentally.

The monitoring results of the parameters and the numerical simulations made it possible to evaluate the effectiveness of the Abitibian clays-based covers to control water infiltration and to identify the effects of amendments, weather and construction conditions on their performance. Laboratory test results indicate that the materials used in the experimental cells exhibit potential to be used as a hydraulic barrier. Nevertheless, the project underscored the impact of construction conditions, evident in the disparity between the field and the laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity.

However, the results of the monitoring suggest that there is no evidence of degradation of hydrogeological properties over the observed period, despite some cells were affected by frost or drought weather conditions.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	IV
REMERCIEMENTS .....	V
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT .....	VIII
TABLE DES MATIÈRES .....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XXIII
LISTE DES ANNEXES.....	XXVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	2
1.2 Objectifs .....	6
1.3 Hypothèses de recherche.....	6
1.4 Organisation du mémoire .....	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	8
2.1 Recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée .....	8
2.1.1 Géomembranes.....	10
2.1.2 Géocomposites .....	11
2.1.3 Argile compactée.....	13
2.2 Utilisation des argiles comme recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée	
13	
2.2.1 Caractéristiques des argiles .....	14

2.2.2	Facteurs influençant les propriétés des argiles .....	16
2.2.3	Dépôts argileux de l’Abitibi (Lac Ojibway) .....	21
2.3	Écoulements de l’eau .....	26
2.3.1	Écoulements de l'eau en milieu poreux saturé .....	28
2.3.2	Écoulements de l'eau en milieu poreux non saturé .....	32
2.3.3	Approximation numérique des équations de l’écoulement de l’eau .....	39
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE .....		50
3.1	Plan d’expériences.....	51
3.1.1	Configuration et construction des cellules expérimentales .....	51
3.1.2	Instrumentation.....	54
3.1.3	Essais sur le terrain.....	56
3.1.4	Données météorologiques .....	57
3.2	Caractérisation des matériaux .....	64
3.2.1	Échantillonnage et préparation des matériaux .....	65
3.2.2	Caractérisation physique et classification des sols.....	68
3.2.3	Caractérisation chimique et minéralogique.....	81
3.2.4	Caractérisation hydrogéologique.....	83
3.3	Modélisation numérique.....	88
CHAPITRE 4 RÉSULTATS .....		92
4.1	Présentation des données collectées .....	92
4.1.1	Données collectées lors de la mise en place des cellules .....	92
4.1.2	Suivi des paramètres mesurés au niveau des stations de mesure .....	99
4.1.3	Essais d’infiltration sur le terrain .....	123

4.2	Interprétation des données collectées .....	125
4.2.1	Efficacité des recouvrements à base d'argile à contrôler de l'infiltration de l'eau..	125
4.2.2	Modélisation numérique.....	128
4.2.3	Effets des conditions de mise en place des recouvrements .....	133
4.2.4	Effets des conditions météorologiques dans la période observée .....	137
CHAPITRE 5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	143
RÉFÉRENCES	.....	147
ANNEXES	.....	154

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Critères pour la sélection préliminaire des sols qui peuvent être utilisés comme barrière hydraulique.....	14
Tableau 2-2 Équations permettant la prédiction de la conductivité hydraulique saturée.....	31
Tableau 3-1 Quantités de matériaux utilisés dans la construction des cellules expérimentales. ...	52
Tableau 3-2 Nombre d'instruments installés dans les cellules expérimentales. ....	55
Tableau 3-3 Dates de réalisation des essais de conductivité hydraulique sur le terrain.....	56
Tableau 3-4 Synthèse des données climatiques pour l'Abitibi-Témiscamingue. Ouranos (2022) et Canada (2022). ....	58
Tableau 3-5 Définition des intervalles d'analyse pour l'interprétation des résultats. ....	64
Tableau 3-6 Échantillonnage initial des matériaux cibles.....	65
Tableau 3-7 Échantillonnage principal pendant la mise en place. ....	67
Tableau 3-8 Liste d'essais de la caractérisation géotechnique de base. ....	68
Tableau 3-9 Analyse granulométrique des sols (Phase initiale) .....	69
Tableau 3-10 Limites d'Atterberg (Phase initiale) .....	71
Tableau 3-11 Classification des sols. Phase initiale.....	71
Tableau 3-12 Densité relative des matériaux (Phase initiale). ....	73
Tableau 3-13 Masse volumique sèche et teneur en eau optimales obtenues à partir de l'essai Proctor. ....	74
Tableau 3-14 Regroupement des échantillons utilisés dans l'analyse granulométrique.....	75
Tableau 3-15 Analyse granulométrique des sols (Phase principale).....	75
Tableau 3-16 Limites d'Atterberg (Phase principale) .....	76
Tableau 3-17 Classification des sols. Phase principale.....	78

Tableau 3-18 Densité relative pycnomètre à l'hélium. Phase principale.....	78
Tableau 3-19 Masse volumique sèche et teneur en eau optimales pour l'argile.....	79
Tableau 3-20 Masse volumique sèche et teneur en eau optimales calculées d'après Sivrikaya (2008). .....	80
Tableau 3-21 Comparaison des caractéristiques souhaitables des matériaux agissant comme barrière imperméable.....	80
Tableau 3-22 Minéraux identifiés dans les échantillons analysés par DRX. ....	82
Tableau 3-23 Éléments identifiés dans les échantillons analysés par FRX. ....	82
Tableau 3-24 Liste d'essais de la caractérisation hydrogéologique. ....	83
Tableau 3-25 Regroupement des échantillons utilisés dans la caractérisation hydrogéologique. .	83
Tableau 3-26 Conductivité hydraulique saturée mesurée au laboratoire. ....	85
Tableau 3-27 Paramètres de la courbe de rétention d'eau (Phase principale) .....	87
Tableau 3-28 Conditions de compactage des échantillons lors des essais dans la <i>pressure plate</i> . 88	
Tableau 3-29 Paramètres des matériaux utilisés dans les simulations numériques. ....	90
Tableau 4-1 Caractéristiques de base déterminées à partir des échantillons prélevés avec le cylindre à volume connu. ....	93
Tableau 4-2 Caractéristiques de base déterminées à partir des lectures du nucléo densimètre. ....	93
Tableau 4-3 Conditions d'installation des cellules d'après les instruments de suivi. ....	94
Tableau 4-4 Résultats des essais de conductivité hydraulique (m/s) sur le terrain. ....	124
Tableau 4-5 Percolation d'eau cumulée dans les cellules expérimentales. ....	128
Tableau 4-6 Résultats des simulations numériques.....	133
Tableau 4-7 Taux de compactage au niveau des cellules expérimentales. ....	134
Tableau 4-8 Essais pour le contrôle de qualité et leur fréquence (D'après Daniel (1993a)).....	136
Tableau 4-9 Périodes de gel dans cellules expérimentales. ....	138

Tableau 4-10 Coefficient de variation (CV) et rapport maximal/minimal de référence.....	141
Tableau 4-11 Coefficient de variation (CV) et rapport maximal/minimal des valeurs mesurées sur le terrain.....	141

## LISTE DES FIGURES

Figure 1–1 Cycle de production d’une mine et le processus de génération de DMA. ....	2
Figure 1–2 Techniques de contrôle de la formation de DMA. ....	4
Figure 2–1 Configuration d’une couverture à faible conductivité hydraulique multicouche. Adaptée d’Aubertin et al. (2002) et Aubertin et al. (2015). ....	9
Figure 2–2 Effets de la teneur en eau et de l’énergie de compaction sur la conductivité hydraulique (Benson et al., 1994; Daniel, 1993b). ....	17
Figure 2–3 Représentation schématique de la formation des fissures à cause de la dessiccation (Konrad & Ayad, 1997). ....	18
Figure 2–4 Schéma explicatif du processus de consolidation due au dégel. Proposé par Nixon et Morgenstern (1973), tirée de (Konrad & Samson, 2000). ....	19
Figure 2–5 Changements dans la structure du sol à la suite des cycles de gel-dégel. Chamberlain et Gow (1979), tirée de (Konrad & Samson, 2000). ....	20
Figure 2–6 a. Carte Géologie du Quaternaire, tirée de Cloutier et al. (2016). b. Carte Épaisseur de la couche d’argile, tirée de Cloutier et al. (2016). ....	23
Figure 2–7 Plaine argileuse Barlow-Ojibway. En gris, la limite de la plaine argileuse tracée par Fulton (1995) et en ligne pointée la limite proposée par Baldwin (1969), tirée de Martineau (2018). ....	25
Figure 2–8 Coupe schématique illustrant les différents types de dépôts glaciaires et les variations dans leur épaisseur. Adaptée de Rompré et Carrier (1997) et Cloutier et al. (2016). ....	25
Figure 2–9 Charges de position, de pression et de vitesse (Adapté de Lancellotta 2008). ....	27
Figure 2–10 Loi de Darcy (Adapté de Lancellotta 2008). ....	28
Figure 2–11 Méthodes utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique saturée. ....	30

Figure 2–12 Conductivité hydraulique attendue et les intervalles d'utilisation des types d'essais de laboratoire (Adaptée de Nagy et al., 2013). .....	30
Figure 2–13 Courbe de rétention d'eau avec les points caractéristiques AEV et les zones : I, zone saturée; II, zone transitoire, III, zone résiduelle. ....	34
Figure 2–14 Variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la teneur en eau du milieu, modifié de Musy et Soutter (1991). ....	38
Figure 2–15 Discrétisation du temps et de l'espace (cas d'un espace unidimensionnel). Adaptée de Guinot et al. (2005). ....	41
Figure 2–16 Discrétisation utilisée dans la solution de l'équation de Richards. Adaptée de Musy et Soutter (1991). ....	42
Figure 2–17 Approximation d'une fonction par sous-régions. Adaptée de Reddy (2004) .....	43
Figure 2–18 Représentation d'un domaine en deux dimensions avec une agrégation de triangles et quadrilatères. Adaptée de (Reddy, 2004). ....	44
Figure 3–1 Configuration géométrique des cellules expérimentales. ....	52
Figure 3–2 Apparence finale des cellules expérimentales. À gauche, imagerie Google Earth. À droite, photographie prise en novembre 2021. ....	53
Figure 3–3 Processus de construction des cellules expérimentales. ....	54
Figure 3–4 Système de suivi des cellules expérimentales. ....	55
Figure 3–5 Composants de la station de suivi qui a été installée dans la cellule 1. ....	56
Figure 3–6 Assemblage du perméamètre de Guelph pour la mesure de la conductivité hydraulique in situ. Installation des débitmètres à la base des cellules. ....	57
Figure 3–7 Chroniques des températures pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022)...	61
Figure 3–8 Précipitations horaires pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022). ....	62
Figure 3–9 Variation de l'humidité relative horaire pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022). ....	62

Figure 3–10 Vitesse du vent pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022). .....	63
Figure 3–11 Radiation solaire journalière pour la période observée 2021-2022 (Solutions-Mesonet, 2023). .....	63
Figure 3–12 Essais de laboratoire pour la caractérisation des matériaux. ....	65
Figure 3–13 Localisation des points de prélèvement des échantillons (Modifiée à partir de l'imagerie de Google Earth).....	66
Figure 3–14 Types d'échantillon prélevés lors de la mise en place des cellules. À gauche les échantillons à grand volume et à droite les échantillons du cylindre échantillonneur. ....	67
Figure 3–15 Courbe granulométrique (Phase initiale). La partie pointée de l'échantillon 3 correspond à la granulométrie réalisée au moyen des tamis. ....	70
Figure 3–16 Classification triangulaire du système canadien (gauche) et le règlement des eaux usées de Québec (droite) (Phase initiale). Modifié à partir de CEPP (1998) et Québec (2022). .....	72
Figure 3–17 Carte de plasticité (gauche) et d'activité (droite) (Phase initiale) .....	72
Figure 3–18 Courbes de compactage, essai Proctor (Phase initiale).....	74
Figure 3–19 Courbe granulométrique (Phase principale) .....	76
Figure 3–20 Classification triangulaire du système canadien (gauche) et le règlement des eaux usées de Québec (droite) (Phase principale) Modifié à partir de CEPP (1998) et Québec (2022). .....	77
Figure 3–21 Carte de plasticité (gauche) et d'activité (droite) (Phase principale) .....	78
Figure 3–22 Montage des différents essais utilisés dans la caractérisation hydrogéologique. ....	85
Figure 3–23 Courbes de rétention d'eau (Phase principale).....	87
Figure 3–24 Modèle unidimensionnel d'un recouvrement monocouche dans le logiciel SEEP/W. a) définition de la géométrie; b) attribution des propriétés; c) discrétisation et imposition des conditions aux limites; d) interprétation des résultats. ....	89

Figure 4–1 a. Masse volumique sèche mesurée en utilisant les échantillons (bleu), le nucléodensimètre (orange) et le système de suivi (vert). b. Porosité mesurée lors de la mise en place des cellules. ....	95
Figure 4–2 a. Teneur en eau massique mesurée depuis les échantillons (bleu), le nucléo densimètre (orange) et le système de suivi (vert). b. Teneur en eau volumique lors de la mise en place. ....	96
Figure 4–3 Variation en profondeur de la densité volumique sèche (gauche) et la porosité (droite) lors de la mise en place. ....	97
Figure 4–4 Variation en profondeur de la saturation (gauche) et le teneur en eau volumique (droite) lors de la mise en place. ....	97
Figure 4–5 Comparaison des masses volumiques sèches des essais Proctor et celles mesurées sur le terrain.....	99
Figure 4–6 Variation de la température du sols au niveau de la cellule 1.....	100
Figure 4–7 Variation de la température du sols au niveau de la cellule 2.....	101
Figure 4–8 Variation de la température du sol au niveau de la cellule 3. ....	101
Figure 4–9 Variation de la température du sol au niveau de la cellule 4. ....	102
Figure 4–10 Distribution des données de température collectées dans la cellule 1 (a) et la cellule 2 (b) comparées avec les données de la station météorologique de référence. ....	103
Figure 4–11 Distribution des données de température collectées dans la cellule 3 (a) et la cellule 4 (b) comparées avec les données de la station météorologique de référence. ....	104
Figure 4–12 Cellule 1. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C. ....	105
Figure 4–13 Cellule 2. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C. ....	105
Figure 4–14 Cellule 3. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C. ....	105

Figure 4–15 Cellule 4. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C .....	106
Figure 4–16 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 1.....	107
Figure 4–17 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 2.....	107
Figure 4–18 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 3.....	107
Figure 4–19 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 4.....	108
Figure 4–20 Distribution des données des teneurs en eau volumiques collectées dans la cellule 1 (a) et la cellule 2 (b). .....	109
Figure 4–21 Distribution des données de teneurs en eau volumiques collectées dans la cellule 3 (a) et la cellule 4 (b).....	110
Figure 4–22 Cellule 1. Données spatialisées des teneurs en eau volumiques. La ligne bleu représente la température de 0 °C. ....	111
Figure 4–23 Cellule 2. Données spatialisées des teneurs en eau volumiques. La ligne bleu représente la température de 0 °C. ....	111
Figure 4–24 Cellule 3. Données spatialisées de la teneur en eau volumique du sol. La ligne bleu représente 0 °C. ....	112
Figure 4–25 Cellule 4. Données spatialisées de la teneur en eau volumique du sol. La ligne bleu représente 0 °C. ....	112
Figure 4–26 Variation de la succion au niveau de la cellule 1 durant la periode d’observation..	113
Figure 4–27 Variation de la succion au niveau de la cellule 2 durant la periode d’observation..	114
Figure 4–28 Variation de la succion au niveau de la cellule 3 durant la periode d’observation..	114
Figure 4–29 Variation de la succion au niveau de la cellule 4 durant la periode d’observation..	114
Figure 4–30 Distribution des succions mesurées dans la cellule 1 (a) et la cellule 2 (b).....	115
Figure 4–31 Distribution des données de la pression de succion collectées dans la cellule 3 (a) et la cellule 4 (b).....	116

Figure 4–32 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 1.....	117
Figure 4–33 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 2. La ligne bleu représente la température de 0 °C.....	117
Figure 4–34 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 3. La ligne bleu représente la température de 0 °C.....	118
Figure 4–35 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 4. La ligne bleu représente la température de 0 °C.....	118
Figure 4–36 Conditions de drainage en aval des débitmètres de la cellule 1 (gauche) et la cellule 3 (droite) le 30 juin 2022.....	119
Figure 4–37 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 1. ....	120
Figure 4–38 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 2. ....	121
Figure 4–39 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 3. ....	121
Figure 4–40 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 4. ....	122
Figure 4–41 Distribution de la hauteur équivalente horaire de sortie, incluant les valeurs extrêmes. ....	123
Figure 4–42 Évolution de la conductivité hydraulique saturée des cellules (gauche). Distribution statistique des données mesurées (droite). L’axe des ordonnées est en échelle logarithmique. ....	124
Figure 4–43 Comparaison de la précipitation et la percolation d'eau dans les cellules expérimentales.....	127
Figure 4–44 Analyse de sensibilité de la conductivité hydraulique saturée (m/s) et calibration du modèle pour la cellule 1 (gauche) et la cellule 2 (droite).....	129

Figure 4-45 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 1. ....	130
Figure 4-46 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 2. ....	131
Figure 4-47 Analyse de sensibilité de la conductivité hydraulique saturée (m/s) et calibration du modèle pour la cellule 3 (gauche) et la cellule 4 (droite).....	131
Figure 4-48 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 3. ....	132
Figure 4-49 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 4. ....	133
Figure 4-50 Évolution de la saturation dans les cellules expérimentales. À gauche, les niveaux supérieures des couches et à droit au fond de la couche (première couche argileuse pour la cellule 4).....	140

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$a_c$	Coefficient d'adhésion (modèle MK) [-]
AEV	Pression d'entrée de l'air (air entry value) [L]
BEM	Méthode des éléments finis de frontière
$C(\psi)$	Capacité capillaire [-]
$C_c$	Coefficient de courbure [-]
$C_U$	Coefficient d'uniformité [-]
$C_\psi$	Paramètre d'ajustement (modèle MK) [-]
CEBC	Couverture à effets de barrière capillaire
CRE	Courbe de rétention d'eau
$D_{10}$	Diamètre effectif des particules qui correspond au 10% des passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_{30}$	Diamètre effectif des particules qui correspond au 30% des passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_{60}$	Diamètre effectif des particules qui correspond au 60% des passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_e$	Coefficient de diffusion effectif [ $L^2.T^{-1}$ ]
$D_H$	Diamètre équivalente [L]
DMA	Drainage minier acide
e	Indice des vides [-]
ECCC	Environnement et Changements Climatiques Canada
ECCC – SMC	Environnement et Changement climatique Canada – Service météorologique du Canada
FDM	Méthode des différences finies

FEM	Méthode des éléments finis
FVM	Méthode des volumes finis
$g$	Accélération gravitationnelle [L.T <sup>-2</sup> ]
$G_s$	Gravité spécifique ou densité relative des grains [-]
GCB	Géocomposites bentonitique
$h$	Charge hydraulique [L]
$h_{co}$	Remontée capillaire équivalente [-]
H	Charge hydraulique totale [L]
KC	Kozeny-Carman
IP	Indice de plasticité [-]
$k_{sat}$	Conductivité hydraulique saturée [L.T <sup>-1</sup> ]
$K(\theta)$	Fonction de conductivité hydraulique non saturée [L.T <sup>-1</sup> ]
LCI	Condition aux limites « interaction sol-climat » ( <i>land-climate-interaction</i> )
$m$	Paramètre fonction de la distribution des pores (MK) [-]
$m_v$	Paramètre empirique d'ajustement du modèle de van Genuchten (1980) [-]
MEF	Méthode des éléments finis
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec
MK	Modèle de Kovacs modifié
$n$	Porosité [-]
$n_v$	Paramètre empirique d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
pH	Potentiel hydrogène
$S_a$	Degré de saturation dû à l'adhésion [-]
$S_c$	Degré de saturation dû à la capillarité [-]

$S_m$	Surface spécifique des grains
$t$	Temps [T]
$w_L$	Limite de la liquidité du sol [-]
$x$	Paramètre de tortuosité [-]
XRD	Diffraction de rayons X
XRF	Fluorescence de rayons X
$\alpha_v$	Paramètre empirique d'ajustement du modèle de van Genuchten [ $L^{-1}$ ]
$\beta_w$	Angle de contact entre l'eau et la surface des particules solides
$\rho_s$	Masse volumique des solides [ $M.L^{-3}$ ]
$\gamma_{d_{opt}}$	Masse volumique sèche optimale [ $M.L^{-3}$ ]
$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau [ $M.L^{-3}$ ]
$\theta$	Teneur en eau volumique [- ]
$\theta_e$	Teneur en eau réduite [- ]
$\theta_r$	Teneur en eau volumique résiduelle [- ]
$\theta_s$	Teneur en eau volumique saturée [- ]
$\sigma_w$	Tension de surface de l'eau [0,073 N/m à 20°C]
$\mu_w$	Viscosité dynamique de l'eau
$\psi$	Pression de succion [L]
$\psi_n$	Paramètre de normalisation (modèle MK) [-]
$\psi_r$	Succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle [-]
$\chi$	Paramètre de forme [-]
$\omega_{opt}$	Teneur en eau optimale [- ]

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

ANNEXE B COURBES DE CALIBRATION DES SONDÉS

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'exploitation minière et le traitement de minerais génèrent une quantité importante de résidus miniers. Ces résidus miniers ayant des compositions chimiques et minéralogiques particulières et sous certaines conditions environnementales peuvent contaminer les eaux de mine sous forme de drainage minier acide (DMA). Cette problématique est l'un des enjeux majeurs auxquels fait face l'industrie minière en raison de sa complexité, son échelle spatiale et temporelle et ses conséquences sur l'environnement.

Pour faire face à cette problématique, plusieurs méthodes et techniques ont été développées afin de réduire ou contrôler la génération du DMA dans les sites d'entreposage des rejets, c'est-à-dire, les haldes à stériles et les parcs à résidus miniers. Parmi ces techniques, on peut citer le recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée ou barrière hydraulique, les recouvrements de type couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC), les recouvrements de type monocouche combinés à une nappe phréatique surélevée et les recouvrements en eau.

Pour les barrières hydrauliques ou les recouvrements étanches, on utilise des matériaux ayant une faible conductivité hydraulique ( $k_{\text{sat}}$  doit être inférieure à  $10^{-9}$  m/s). Parmi les matériaux qui peuvent être utilisés dans ce type de recouvrement, on trouve les argiles compactées, les géomembranes et les géotextiles. Les recouvrements à base d'argile deviennent une solution appropriée grâce à leurs propriétés hydrauliques et à leur faible coût si elles sont disponibles à proximité des sites à restaurer.

La performance des recouvrements à base d'argile peut être affectée par des changements dans leurs propriétés hydrogéologiques induits par les effets des cycles gel-dégel et les successions des cycles de mouillage-séchage.

Le présent manuscrit vise à évaluer la performance des argiles abitibiennes comme barrière hydraulique dans la restauration des parcs à résidus miniers.

Dans ce chapitre, on trouvera une description générale de la problématique du DMA et les différentes techniques de restauration des sites miniers. Par la suite, on présente le projet de

recherche, ses objectifs ainsi que les hypothèses de travail. Finalement, le contenu et la structure du mémoire sont présentés.

Cette étude fait partie d'un projet de valorisation des argiles abitibiennes dans la restauration des sites minières. Elle est la suite d'une première étude qui a évalué, au niveau du laboratoire, l'effet des amendements des argiles dans la minimisation des effets des cycles de gel-dégel au niveau de la conductivité hydraulique saturée. La principale contribution de ce mémoire est l'évaluation, sous conditions de terrain, des argiles provenant des sites de la Fonderie Horne en tant que barrière hydraulique.

## 1.1 Mise en contexte et problématique

Le cycle de production d'une mine et le processus de séparation et de concentration des métaux génèrent trois types de rejets miniers solides qui sont : les stériles qui proviennent de l'exploitation de la mine, les résidus miniers provenant du concentrateur et les boues générées lors du traitement des effluents miniers. Ces rejets peuvent être stockés en surface sous forme de haldes à stériles ou dans des parcs à résidus miniers. La présence de minéraux sulfureux et leur exposition aux conditions météorologiques engendre des problèmes d'instabilité géochimique qui se traduisent par la génération de drainage minier acide (DMA), en raison de l'oxydation des sulfures. La Figure 1-1 présente un schéma du cycle de production du minerai avec la disposition des rejets miniers solides et le processus de génération de DMA.

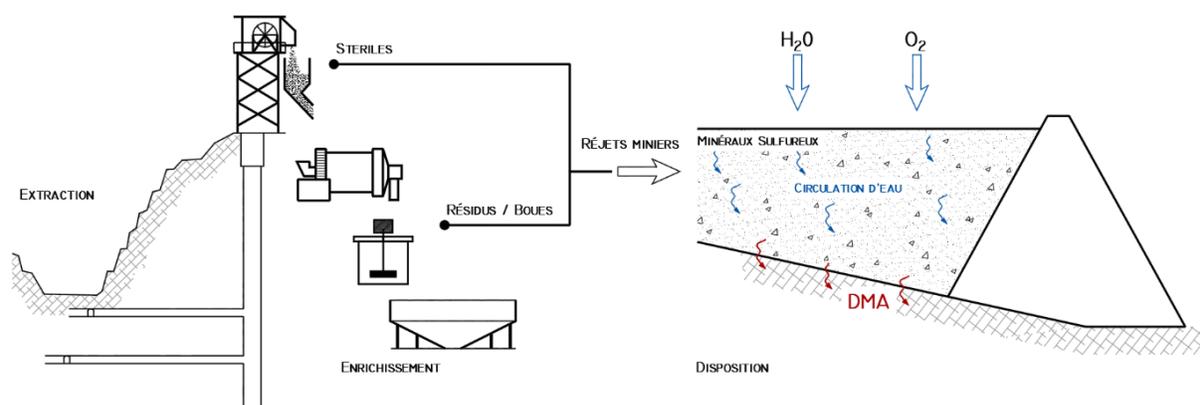


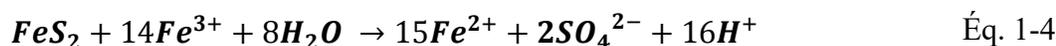
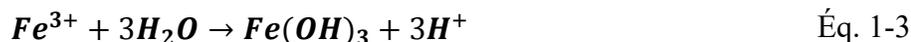
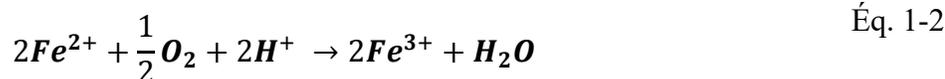
Figure 1-1 Cycle de production d'une mine et le processus de génération de DMA.

Le processus de formation du DMA inclut à la fois les phénomènes d'oxydation des minéraux acidogènes, la neutralisation de l'acide formé et la précipitation des minéraux secondaires. À titre d'exemple, on présente ci-dessous les équations d'oxydation des sulfures (pyrite). L'oxydation de la pyrite se produit en trois phases: une phase d'oxydation directe, une phase de baisse du pH et une dernière phase d'oxydation indirecte. Comme résultat, ces réactions produisent de l'acide et des métaux en solution.

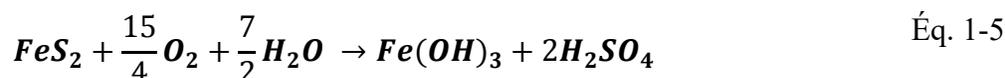
**Oxydation directe :**



**Oxydation indirecte :**



**Réaction globale :**



Ensuite, l'acidité générée par l'oxydation peut être neutralisée par des minéraux acidivores, généralement des carbonates et certains silicates. Les métaux et les produits d'oxydation-neutralisation peuvent se précipiter sous la forme de minéraux secondaires.

Les trois réactions d'oxydation, de neutralisation et de précipitation sont souvent influencées par des bactéries. De même que la formation du DMA est influencée par la vitesse de réaction des processus de génération et neutralisation d'acide. Les eaux du DMA sont caractérisées par un pH faible ( $pH < 6$ ) ou très faible ( $pH < 3$ ), des concentrations élevées en sulfates, en métaux lourds dissous et une conductivité électrique de l'eau très élevée (Jambor, 1994; Kleinmann, 1981; Nordstrom, 2000; Ritchie, 1994). Plus d'informations sur la génération du DMA peuvent être trouvées dans Blowes et al. (2014), Aubertin et al. (2002) et Plante et al. (2021).

De manière générale, pour que le DMA puisse se produire, il est nécessaire d'avoir des minéraux sulfureux en quantité suffisante, la présence d'eau et surtout la disponibilité d'oxygène. Le contrôle

de la formation du DMA peut être réalisé en utilisant différentes techniques. Ces dernières visent à inhiber les réactions d'oxydation en excluant ou en réduisant la disponibilité de l'un de ces trois éléments (sulfures, eau et oxygène). La Figure 1–2 liste les techniques qui peuvent être utilisées selon l'éléments cible à exclure.

L'exclusion des sulfures se fait à la fin du processus d'enrichissement du minéral et consiste à enlever les sulfures en utilisant des méthodes métallurgiques de désulfuration (Demers & Pabst, 2021a).

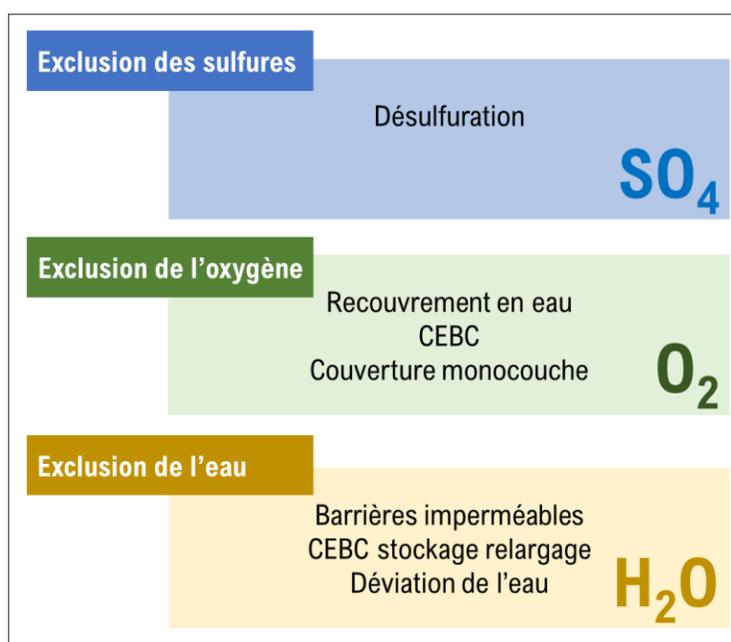


Figure 1–2 Techniques de contrôle de la formation de DMA.

L'exclusion de l'oxygène se fait à l'aide de recouvrements qui empêchent la migration de l'oxygène vers les résidus miniers réactifs. L'exclusion de l'oxygène peut se faire par des recouvrements en eau (recouvrement aqueux - les résidus restent submergés) ou en utilisant des recouvrements constitués de matériaux dont certaines couches doivent être maintenues à un fort degré de saturation (couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC) ou recouvrement monocouche combiné avec une nappe phréatique surélevée).

La technique du recouvrement aqueux cherche à bloquer le flux d'oxygène avec une couche d'eau qui surmonte les rejets en exploitant la propriété de faible diffusivité des gaz dans l'eau (quatre ordres de grandeur plus faible que dans l'air) (Awoh, 2012; Awoh et al., 2020).

Le recouvrement du type CEBC est constitué de plusieurs couches de sols superposées et ayant des contrastes granulométriques favorisant la création des effets de barrière capillaire; ces derniers favorisent la saturation de la couche constituée de matériau fin. Ainsi cette saturation en eau du sol fin contrôle le flux d'oxygène vers les rejets miniers sulfurés en raison de la faible diffusion de l'oxygène dans l'eau (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 2015; Demers & Pabst, 2021b).

Finalement, le recouvrement monocouche combiné avec une nappe phréatique surélevée peut également contrôler les interactions des résidus réactifs avec l'atmosphère en maintenant la nappe phréatique près de l'interface recouvrement-résidus miniers (Dagenais et al., 2006; Pabst, 2020).

Finalement, les techniques d'exclusion de l'eau cherchent à empêcher l'infiltration de l'eau vers les résidus miniers réactifs. Cette exclusion peut se faire en utilisant des recouvrements étanches, aussi appelés recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée, ou des recouvrements de type stockage et relargage combinés avec les effets de barrière capillaire (Aubertin et al., 2002; Aubertin et al., 2015; Bussière & Wilson, 2021; Maqsood et al., 2021).

Les recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée peuvent être construits en utilisant des matériaux naturels ou artificiels ayant une conductivité hydraulique inférieure à  $10^{-9}$  m/s. Parmi les matériaux qui peuvent être utilisés dans ces recouvrements on trouve les matériaux naturels (argiles, bentonites), les géomembranes et les géocomposites.

L'argile est un matériau naturel largement utilisé dans la construction des recouvrements à faible conductivité hydraulique en raison de ses propriétés hydrogéologiques et son coût faible si elle est disponible à proximité des sites (Maqsood et al., 2021). Néanmoins, les propriétés de l'argile et sa performance comme barrière étanche peuvent être affectées par différents facteurs telles que les conditions de la mise en place, le développement de la fissuration et les changements de structure induits par les successions de cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel (Council, 2007; Maqsood et al., 2021; Wagner, 2013). Toutefois, ces effets peuvent être minimisés par l'ajout d'amendements (Merzouk et al., 2022).

En Abitibi-Témiscamingue et dans le nord de l'Ontario, les matériaux argileux recouvrent de très grandes étendues néanmoins, en raison des problèmes présentés ci-dessus, ils sont peu utilisés dans la restauration des sites miniers. Afin de valoriser les argiles abitibiennes, ce projet a été initié dans

le but de tester à l'échelle expérimentale la performance des recouvrements à base d'argile amendée.

## 1.2 Objectifs

L'objectif général de ce projet consiste à évaluer la performance sur le terrain des recouvrements à base d'argile et leur capacité à empêcher l'infiltration de l'eau.

L'atteinte de cet objectif principal passe par la réalisation des objectifs spécifiques suivants :

- Construire quatre cellules expérimentales ayant des configurations différentes afin d'évaluer la performance des recouvrements à limiter le flux d'eau ;
- Faire le suivi des paramètres hydrogéologiques ainsi que la percolation en eau à l'aide des instruments installés dans les cellules expérimentales et réaliser des essais périodiques sur le terrain ;
- Construire et calibrer des modèles numériques à l'aide des données prises sur le terrain.
- Analyser les données collectées au moyen du système de suivi et calculées d'après les modèles numériques.

## 1.3 Hypothèses de recherche

Afin d'évaluer la performance sur le terrain des recouvrements à base d'argile en tant que barrière hydraulique, les hypothèses suivantes sont émises :

- Les recouvrements à base d'argile sont efficaces pour le contrôle de l'infiltration de l'eau ;
- Les propriétés hydrogéologiques des sols argileux, et par conséquent leur performance comme barrière étanche, seront affectées par les conditions de mise en place des recouvrements ;
- Les propriétés hydrogéologiques des recouvrements à base d'argile, et par conséquent leur efficacité comme barrière hydraulique, seront affectées par les fluctuations des précipitations et de la température tout au long de l'année ;

- L'amendement des argiles avec des matériaux granulaires, ou plusieurs couches incluant ce type de matériaux réduit les effets des conditions météorologiques au niveau de la performance des recouvrements à base d'argile.

#### **1.4 Organisation du mémoire**

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre, qui est le chapitre introduction, présente une mise en contexte et une description de la problématique, ainsi qu'une description générale du projet de recherche. Le deuxième chapitre est consacré à la revue de littérature concernant les aspects relatifs à l'écoulement de l'eau en milieux poreux saturé et non saturé, aux recouvrements à faible conductivité hydraulique et à l'utilisation des argiles comme recouvrements à faible conductivité hydraulique. Le chapitre 3 présente les matériels et les méthodes utilisés et adoptés pour atteindre les objectifs du projet de recherche, incluant la caractérisation des matériaux, la description de la configuration des cellules expérimentales, leur instrumentation, les essais réalisés sur le terrain et la présentation des données météorologiques du secteur à l'étude. Le chapitre 4 est consacré à la présentation des résultats qui découlent des travaux réalisés ainsi qu'à leur analyse et leur interprétation. Finalement, les principales conclusions et recommandations obtenues à la suite de la réalisation ce projet de recherche sont présentées au chapitre 5.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Tel que décrit dans le chapitre précédent, le DMA est généré par l'oxydation des sulfures. Ce DMA est caractérisé par un pH acide et des concentrations élevées en métaux dissous et en sulfates. Pour que le DMA se produit, il est nécessaire d'avoir les conditions suivantes :

- Présence des minéraux sulfureux dans les rejets miniers ;
- Présence d'eau ; et
- Disponibilité de l'oxygène.

De ce fait la formation du DMA peut être contrôlée en utilisant différentes techniques qui visent à exclure ou limiter la disponibilité de l'un de ces trois éléments (voir Figure 1–2).

L'exclusion de l'eau se fait généralement à l'aide de recouvrements étanches constitués d'une ou plusieurs couches distinctes ayant chacune un rôle spécifique. Dans ce chapitre, on présente les notions théoriques nécessaires pour décrire le comportement des recouvrements à base d'argile et évaluer leur performance à limiter l'infiltration de l'eau. Dans la première partie, on décrit les recouvrements à faible conductivité hydraulique; ensuite on traite l'utilisation des argiles comme barrière à l'eau, leur caractéristiques et les différents facteurs d'influence pouvant affecter leur efficacité. Une brève description des dépôts argileux de l'Abitibi-Témiscamingue est aussi présentée. Finalement, les lois et les paramètres permettant de décrire l'écoulement de l'eau dans le milieu poreux (saturées et non saturées) et qui sont nécessaires pour évaluer la performance des recouvrements sont présentés, incluant également la modélisation numérique.

### 2.1 Recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée

Les recouvrements à faible conductivité hydraulique, aussi nommés barrières imperméables ou barrières étanches, sont utilisés pour éviter les échanges entre les résidus miniers réactifs et le milieu extérieur. Ainsi, l'objectif principal des recouvrements à faible conductivité hydraulique consiste à contrôler l'infiltration d'eau vers les résidus miniers sous-jacents et à réduire voir

empêcher la production des réactions responsables de la génération du DMA (Maqsoud et al., 2021; MEND, 2004).

Les recouvrements à faible conductivité hydraulique peuvent être composés d'une seule couche de faible conductivité hydraulique (typiquement compactée), de deux couches comprenant une couche non compactée recouvrant la couche compactée, ou d'une structure complète composée de plusieurs couches chacune jouant un rôle particulier. Dans le cas des couvertures à deux couches, la couche non compactée a la fonction de stockage et de libération de l'eau protégeant la couche compactée des effets d'évapotranspiration (MEND, 2004).

Les recouvrements multicouche sont généralement composés de cinq couches (Aubertin et al., 2015; Maqsoud et al., 2021), tel que l'illustre la Figure 2–1:

- i. Une couche superficielle ayant la fonction de support pour l'établissement de la végétation; cette couche est habituellement composée de sols organiques,
- ii. une couche de protection assurant la stabilité physique et empêchant les biointrusions, celle-ci est composée de matériaux granulaires avec une forte proportion de blocs et cailloux,
- iii. une couche drainante et jouant le rôle de bris capillaire, généralement composée de sable et gravier avec une conductivité hydraulique saturée d'au moins  $10^{-5}$  m/s;

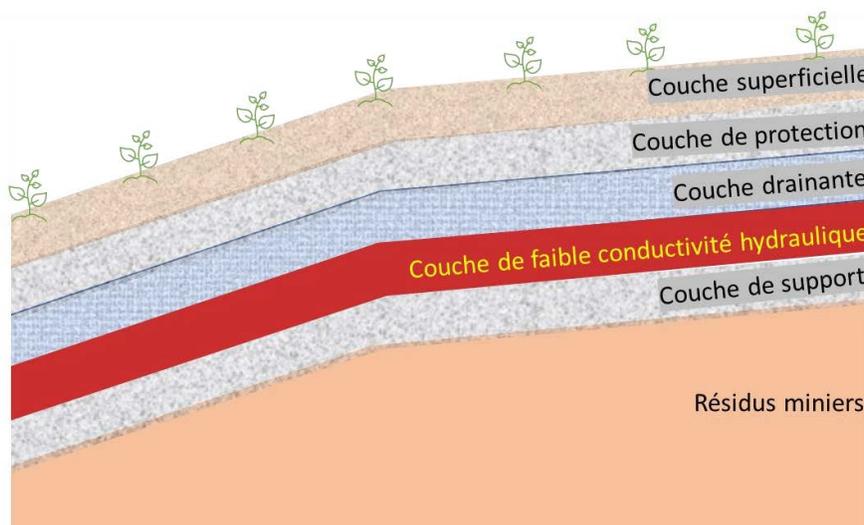


Figure 2–1 Configuration d'une couverture à faible conductivité hydraulique multicouche. Adaptée d'Aubertin et al. (2002) et Aubertin et al. (2015).

- iv. une couche de faible conductivité hydraulique, habituellement constituée par des matériaux fins (argile et silt) ou matériaux synthétiques (géomembranes, géocomposites, etc.) jouant le rôle de barrière face aux infiltrations d'eau; et
- v. une couche de support, ayant une fonction portante et de bris capillaire; celle-ci est généralement composée de sables et graviers ayant une conductivité hydraulique saturée de  $10^{-5}$  m/s au minimum.

La couche superficielle (i) et les couches drainante (iii) et de protection (ii) visent à limiter l'impact des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel sur les couches sous-jacentes (Maqsood et al., 2021). Les matériaux qui constituent les différentes couches du revêtement doivent être stables et compatibles entre eux afin d'éviter toute érosion interne ou migration de particules fines (Aubertin et al., 2015). La couche de barrière imperméable (iv) a une faible conductivité hydraulique saturée et constitue la principale barrière face aux échanges entre les rejets et l'extérieur. Les matériaux utilisés dans la conformation de cette couche doivent avoir une conductivité hydraulique saturée maximale de  $10^{-9}$  m/s (Cossu & Stegmann, 2018; Maqsood et al., 2021; Roque & Didier, 2006; Sterpi, 2015). Cette condition peut être satisfaite par des sols ayant une granulométrie fine (argile et silt) ou en utilisant des matériaux synthétiques comme des géomembranes, des géocomposites, des sols amendés avec bentonite ou une combinaison de ceux-ci.

Dans les sections suivantes on va décrire les différents matériaux qui peuvent être utilisés comme barrière hydraulique.

### **2.1.1 Géomembranes**

La géomembrane est un film mince polymérique assurant une fonction d'étanchéité. Généralement, elle est formée d'un polymère constituant le squelette du matériau et des additifs chimiques tels que le noir de carbone, des stabilisants, et des antioxydants qui sont ajoutés afin de protéger le squelette et/ou apporter des propriétés spécifiques (Rarison, 2021). Les géomembranes peuvent être classées selon la nature des polymères utilisés dans leur fabrication; ainsi on peut trouver des géomembranes à base de polyéthylène, de polypropylène, de polychlorure de vinyle et de polyéthylène téréphtalate.

Les géomembranes composées de polyéthylène peuvent être également classées selon leur densité : haute ( $>0,94 \text{ g/cm}^3$ ), moyenne ( $0,926 - 0,94 \text{ g/cm}^3$ ) et faible ( $0,919 - 0,926 \text{ g/cm}^3$ ) (Maqsoud et al., 2021). La densité du polyéthylène a un effet important sur les propriétés des géomembranes; ainsi pour des polymères plus denses, la géomembrane devient plus rigide, et sa résistance à la traction et aux attaques chimiques augmentent aussi. Au même temps elle aura une flexibilité, une résistance à la fissuration sous contrainte ainsi qu'une conductivité hydraulique plus faible (Rarison, 2021).

L'utilisation des géomembranes est de plus en plus courante. Dans le domaine minier, elles sont utilisées lors de la phase d'exploitation comme tapis d'étanchéité des aires de lixiviation et/ou lors de la gestion des rejets comme matériaux de recouvrement (Rarison, 2021). Le choix d'une géomembrane se base sur trois principaux critères : la résistance chimique, la résistance mécanique et la capacité de transfert de masse (perméabilité aux liquides et la capacité de sorption/diffusion) selon les sollicitations imposées dans la conception du système.

Ces matériaux sont caractérisés par une très faible vitesse de percolation des fluides (à travers le film mince intacte), de ce fait ils sont considérés comme des matériaux étanches (Aubertin et al., 2015). Ainsi, la conductivité hydraulique des géomembranes de polyéthylène de haute densité mesurées au laboratoire sont de l'ordre de  $10^{-14} \text{ m/s}$  (Rarison, 2021).

Néanmoins, la conductivité hydraulique effective des géomembranes après leur mise en place peut être plus élevée en raison des défauts qui peuvent survenir lors de leur installation sur le terrain : perforations, déchirements, plis, brûlures, déficience de soudure, mauvaise articulation avec le terrain (Maqsoud et al., 2021). Afin de réduire ces effets, il est impératif de mettre en place un système de contrôle exhaustif lors de la mise en place de ces recouvrements.

### **2.1.2 Géocomposites**

Les géocomposites (GCL) sont constituées de deux géotextiles renfermant à l'intérieur une couche intermédiaire constituée de bentonite. La bentonite est une argile naturelle composée principalement de montmorillonite (entre 60 et 90%). Généralement, les géocomposites contiennent entre 3 et 5  $\text{kg/m}^2$  de bentonite et leur épaisseur se situe entre 4,9 et 12,9 mm après hydratation (Aubertin et al., 2015; Maqsoud et al., 2021). La conductivité hydraulique des

géocomposites varie entre  $2 \times 10^{-10}$  et  $5 \times 10^{-12}$  (Maqsoud et al., 2021) après une hydratation adéquat de la bentonite.

Parmi les principaux avantages de ces matériaux, on trouve leur capacité d'autoréparation à la suite de l'hydratation de la bentonite. Leurs propriétés sont peu affectées par les cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel, et ils possèdent une bonne résistance face aux tassements différentiels et aux perforations accidentelles en raison de leur capacité d'autoréparation.

Néanmoins, à la suite des observations *in situ*, divers auteurs, (voir Aubertin et al., 2015 et Chevé, 2019), reportent des dégradations importantes de leurs propriétés en raison des facteurs intrinsèques et extrinsèques. Pour les facteurs intrinsèques dont les conséquences sont à court terme, on trouve la minéralogie et la texture de la bentonite, sa masse par unité de surface, l'uniformité dans la distribution de la bentonite et la grosseur et la densité d'aiguilletage. Pour les facteurs extrinsèques dont les conséquences sont à moyen et à long terme, on peut citer la pression de confinement, l'existence d'une couche de protection, l'hydratation initial (y compris le liquide hydratant), les cycles de gel-dégel et de mouillage séchage et l'effet des racines qui peuvent engendrer la perforation de la GCL.

Sous de faibles pressions de confinement (similaires aux conditions dans un recouvrement minier), Chevé (2019) a trouvé des variations au niveau de la conductivité hydraulique saturée et qui peuvent atteindre deux ordres de grandeur pour des géocomposites soumis à des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage.

Il est important de mentionner que la qualité chimique des lixiviats peut affecter la performance des GCL en raison des réactions physico-chimiques qui réduisent le potentiel de gonflement de la bentonite, en augmentant la conductivité hydraulique. Ainsi, Chevé (2019) a montré que l'impact de la qualité de l'eau peut engendrer une augmentation de la conductivité hydraulique d'un ordre de grandeur lorsque les GCL sont hydratés avec du DMA synthétique par rapport à une hydratation avec l'eau; d'autres études ont montré que des variations au niveau de la conductivité hydraulique sont plus importantes lorsque des solutions salines sont utilisées dans l'hydratation des GCL. Ces variations sont dues aux fortes forces d'attraction entre les cations multivalents (libérés avec le remplacement des ions  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^+$ ) et les particules de montmorillonite qui génèrent des films d'eau autour des particules de montmorillonite (Maqsoud et al., 2021).

Il est nécessaire de signaler qu'il existe peu de données relatives à la performance in situ (surtout à long terme) des GCL.

### **2.1.3 Argile compactée**

L'argile compactée est le matériau naturel le plus fréquemment utilisé comme couche à faible conductivité hydraulique, en raison de ses propriétés hydrogéologiques et son faible coût dans le cas de sa disponibilité à proximité des sites à restaurer (Cossu, 2018; Maqoud et al., 2021). Ainsi, pour qu'un matériau argileux puisse être utilisé dans les couvertures à faible conductivité hydraulique, il doit posséder certaines caractéristiques. Ces paramètres concernent la minéralogie, la distribution granulométrique, les propriétés physiques initiales (teneur en eau, compacité, plasticité, etc.). Ces caractéristiques seront détaillées dans la section 2.2.1.

Cependant, les matériaux argileux présentent certaines caractéristiques qui peuvent affecter leur performance en tant que barrière imperméable. Ces matériaux sont souvent difficiles à mettre en place et à compacter adéquatement, surtout si leur teneur en eau est élevée, ce qui a un impact sur leur perméabilité et leur conductivité hydraulique. Cette modification de la conductivité hydraulique est probablement liée à la présence de mottes d'argile qui peuvent former des macropores. Également, ces matériaux argileux tendent à se dessécher et se fissurer lors qu'ils sont exposés au soleil et ils sont également sensibles aux effets des cycles de gel-dégel, ce qui a aussi comme conséquence une augmentation de la valeur de la conductivité hydraulique. Ces facteurs et leur influence sur la performance des barrières imperméables à base d'argile sont discutés dans la section 2.2.2.

## **2.2 Utilisation des argiles comme recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée**

Comme on vient d'énoncer, l'argile est le matériau naturel le plus utilisé comme couche à faible conductivité hydraulique, en raison de ses propriétés hydrogéologiques. Pour assurer une bonne performance conformément aux critères de conception, les argiles placées en tant que composante d'un recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée doivent être préalablement bien caractérisées ensuite installées de manière très appropriée afin d'atteindre la valeur de la

conductivité hydraulique visée (Cossu & Stegmann, 2018). Dans ce contexte, les matériaux argileux doivent avoir une plasticité faible à moyenne.

Lors de la mise en place des couches à faible conductivité hydraulique, le contrôle du compactage est une procédure nécessaire. Le compactage a pour objectif de remodeler les mottes de sol en une masse homogène libre de grands vides (entre mottes) interconnectés (Daniel, 1993b). Par conséquent, la caractérisation et le contrôle de qualité lors de la construction de ces recouvrements doivent inclure les essais de compactage (en évaluant le rapport entre la teneur en eau, le degré de saturation et la densité), mesures de la conductivité hydraulique au laboratoire et sur le terrain, et les mesures de la densité après l'installation du recouvrement (Favaretti & Cossu, 2018).

### 2.2.1 Caractéristiques des argiles

Différents auteurs ont identifié les paramètres permettant de sélectionner les matériaux qui répondent aux valeurs de conductivité hydraulique visées et ils ont établi quelques critères facilement identifiables pour évaluer la pertinence d'utiliser un matériau comme barrière imperméable. De ce fait, pour qu'un matériau argileux puisse être utilisé dans une couverture à faible conductivité hydraulique, il doit posséder les caractéristiques présentées au Tableau 2-1.

Tableau 2-1 Critères pour la sélection préliminaire des sols qui peuvent être utilisés comme barrière hydraulique.

Reference	Fines (%)	Argile (%)	IP (%)	wL (%)	Gravier (%)	Taille max
Maqoud et al. (2021)	> 30	>15	7<IP<20	>20	<50	--
Daniel (1993b)	> 20-30	--	7<IP<40	--	<30	25-50
Marcoen et al. (2000)	>30	>15	10<IP<40	<80	<10	50
Roque et Didier (2006)	--	>25	15<IP<30	15<wL<60	--	--
	>30-50	>25	>15	>30	--	--
	>20	--	10<IP<30	--	<10	--
	>30	--	7<IP<40	--	<10-20	--
Benson et al. (1994)	>50	>15	>7	>20	--	--

En résumé, le matériau doit avoir les caractéristiques suivantes:

- la fraction fine (taille maximale de  $75 \mu m$ , tamis No. 200) doit être supérieure à 20 – 30 %,
- le pourcentage d'argile (taille maximale de  $2 \mu m$ ) doit être supérieure à 15 – 25 %,
- l'indice de plasticité (IP) doit être compris entre 7 et 40 %,
- la limite de liquidité (wL) doit être comprise entre 20 % et 60 %,
- le pourcentage de graviers (taille minimale de  $5 mm$ ) doit être inférieur à 50 %.
- La taille des mottes ne doit pas dépasser les 25 ou 50 mm.

Le pourcentage des particules fines et les pourcentages de la fraction argileuse définissent un sol argileux, les valeurs minimales de l'IP et wL sont établies afin d'atteindre une faible conductivité hydraulique, tandis que les valeurs maximales visent les propriétés de maniabilité et de compactage appropriées avec des effets de retrait et de gonflement limités (Favaretti & Cossu, 2018).

Benson et al. (1994) ont proposé une valeur de 0,3 comme valeur minimale de l'activité des argiles (rapport entre l'indice de plasticité et la fraction d'argile). Shakoor et Cook (1990) et Roque et Didier (2006) ont démontré que pour des teneurs en gravier pouvant atteindre 50%, il est possible que les particules d'argile remplissent les vides entre le gravier et contrôlent le comportement hydraulique des matériaux.

Il est important de noter que la plupart de ces critères ont été définis pour les barrières argileuses utilisés dans des centres d'enfouissement technique (décharges municipales). Ces critères sont utiles dans les étapes préliminaires des projets et permettent de sélectionner les matériaux qui répondent mieux aux exigences, mais aussi à définir les conditions de mise en œuvre et le contrôle sur le terrain. Une fois les critères requis des matériaux sont établis, il est nécessaire de quantifier les paramètres qualifiant la nature et les caractéristiques des matériaux (conductivité hydraulique, maniabilité, etc.) afin d'établir les corrélations qui permettent de valider la qualité des matériaux et faire le contrôle pendant la mise en place (Marcoen et al., 2000).

## 2.2.2 Facteurs influençant les propriétés des argiles

Les propriétés des matériaux argileux et leur performance à jouer le rôle de barrière étanche peuvent être affectées par différents facteurs telles que les conditions de mise en place, le développement de la fissuration et les changements de structure induits par les successions de cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel (Council, 2007; Maqsoud et al., 2021; Wagner, 2013).

À court terme, les facteurs qui vont influencer la conductivité hydraulique et la performance des barrières hydrauliques à base d'argile compactée sont la qualité du matériau, le compactage, la dessiccation et l'instabilité des pentes. À long terme, une performance réduite ou une perte totale de sa fonctionnalité peut être observée en raison de la dessiccation (fissuration) engendrée par les cycles de mouillage-séchage et gel-dégel, le développement des systèmes racinaire des végétaux, et les tassements différentiels (Council, 2007).

Les impacts sur les modifications des propriétés des matériaux argileux et qui sont liées aux conditions de mise en place, aux cycles de mouillage-séchage et aux cycles de gel-dégel seront exposés dans les sections suivantes.

### *Conditions de mise en place*

La procédure de compactage et les teneurs en eau lors de la mise en place des couches d'argile influencent fortement leurs propriétés mécaniques et hydrogéologiques et de ce fait influence également la performance du recouvrement. Ainsi, la conductivité hydraulique sera plus faible si la mise en place des argiles est faite avec une teneur en eau supérieure à la teneur en eau optimale, qui peut être évaluée avec l'essai Proctor (Benson et al., 1994; Daniel, 1993a, 1993b) ou estimée à l'aide des limites de Atterberg (Maqsoud, 2022). Cet aspect est illustré à la Figure 2-2 où on peut observer la variation de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau, ce graphique permet de visualiser une baisse de la conductivité hydraulique pour des teneurs en eau plus grandes que la teneur en eau optimale (celle qui conduit à la densité maximale). Le contrôle de la teneur en eau permet aussi de diminuer la présence de mottes de grande taille qui vont créer des vides importants et dont les conséquences peuvent engendrer une augmentation de la conductivité hydraulique (Benson et al., 1994; Daniel, 1993b; Maqsoud et al., 2021).

D'autre part, une énergie de compactage plus grande engendre une réduction de la conductivité hydraulique. Une énergie de compactage plus grande peut remouler les mottes d'argile, en contrôlant la formation de vides (Eigenbrod, 2003; Maqsoud et al., 2021). La présence de mottes fait que la conductivité hydraulique mesurée in situ peut être nettement plus élevée (de 10 à 1000 fois) que celle mesurée en laboratoire (Aubertin et al., 2015). Cela met en évidence la nécessité de bien contrôler le processus de compactage.

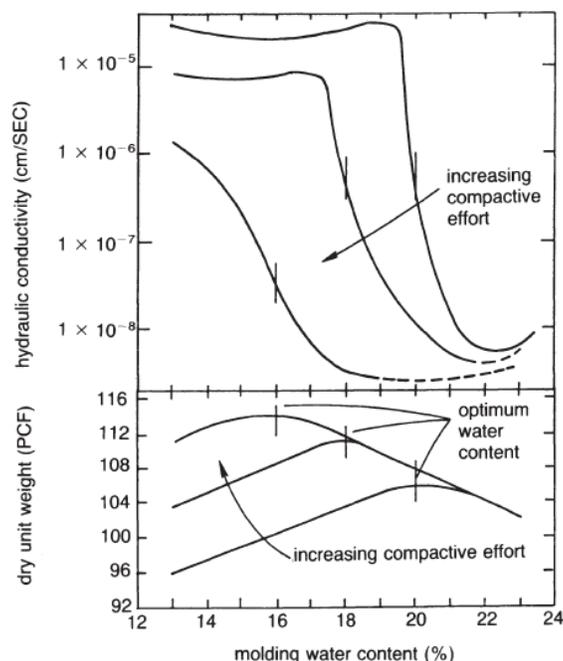


Figure 2–2 Effets de la teneur en eau et de l'énergie de compactation sur la conductivité hydraulique (Benson et al., 1994; Daniel, 1993b).

### *Cycles mouillage - séchage*

Les recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée composés de matériaux argileux peuvent être exposés aux cycles de mouillage-séchage. Le processus de séchage engendre une réduction de la teneur en eau des matériaux argileux ainsi qu'une augmentation de la succion matricielle, ce qui induit la création des fissures comme conséquence d'un processus de consolidation (Maqsoud et al., 2021; Rayhani et al., 2008). En même temps, les fissures deviennent des chemins préférentiels pour l'écoulement de l'eau, contribuant ainsi à augmenter la perméabilité de ces matériaux argileux. Un seul cycle de séchage peut générer des dégâts dans le recouvrement et la perte de sa capacité à agir comme barrière imperméable (Albrecht & Benson, 2001).

La Figure 2–3 présente le processus proposé par Konrad et Ayad (1997) pour expliquer la formation et la propagation de fissures induites par dessiccation. Partons d'un sol horizontal, le processus est déclenché par l'évaporation du sol (Figure 2–3.a); ensuite, une pression de succion est générée en provoquant une consolidation verticale sans que cela produise des tassements (Figure 2–3.b). La fissuration commence juste quand la contrainte horizontale sur le sol ( $\sigma_3$ ) atteint la valeur de la résistance à la traction ( $\sigma_t$ ) (Figure 2–3.c), c'est-à-dire que la succion atteint sa valeur critique ( $\psi_{cr}$ ), et finalement la propagation verticale est produite (Figure 2–3.d). La profondeur de propagation (A) est fonction de l'état de contraintes, du profil de succion et de la trajectoire des contraintes effectives processus de dessiccation (Konrad & Ayad, 1997). D'autre part, Albrecht et Benson (2001) ont mesuré une contrainte effective de 60 kPa (c.a.d. une profondeur d'au moins 10 m) requise pour fermer les fissures générées par le processus de dessiccation, ce qu'impliquent des dommages permanents sur les recouvrements en considérant que son installation est superficielle (à moins de 10 m de profondeur), c'est-à-dire avec des contraintes faibles.

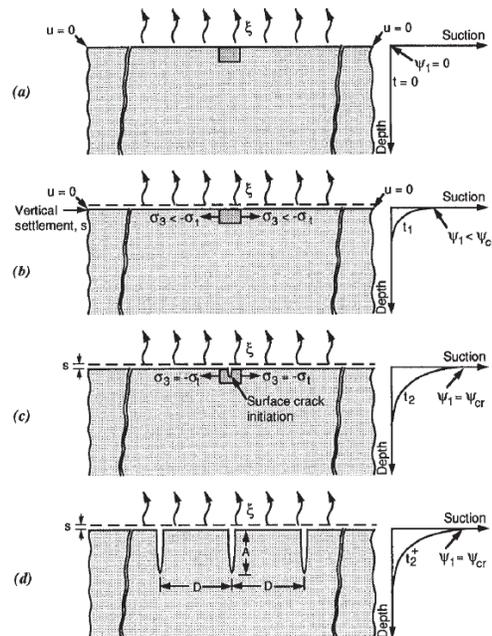


Figure 2–3 Représentation schématique de la formation des fissures à cause de la dessiccation (Konrad & Ayad, 1997).

Les changements de volume induits par le processus de dessiccation sont reliés directement à la teneur en eau de l'argile à l'état saturé. Cette teneur en eau est fonction des propriétés du sol

(notamment ses limites de consistance) et les conditions de compactage (Albrecht & Benson, 2001; Ghazizade & Safari, 2017; Rayhani et al., 2008). Les recouvrements conçus avec des matériaux ayant une teneur en argile et un indice de plasticité élevé montrent des teneurs en eau plus élevées et sont sujets à des changements volumiques importants. Pour réduire ces aspects, les critères imposés pour qu'un matériau puisse être utilisé comme barrière imperméable ont été proposés (voir Tableau 2-1, Section 2.2.1). Cependant, il est possible d'utiliser des amendements d'argile avec du sable, du silt, de la bentonite et d'autres matériaux afin de réduire la plasticité des argiles et réduire la possibilité de formation des fissures. Néanmoins, ces mélanges généralement font accroître la conductivité hydraulique du recouvrement (Wagner, 2013).

### *Cycles de gel - dégel*

Les cycles de gel-dégel provoquent des changements dans les propriétés hydrogéologiques des argiles. Dans le front de gel, une pression de succion qui attire les molécules de l'eau de la zone non gelée est induite; ce phénomène génère des changements dans la structure du sol en affectant la conductivité hydraulique des argiles et sa performance comme barrière hydraulique (Konrad & Samson, 2000; Maqsood et al., 2021; Sterpi, 2015). Ces effets sont plus importants dans le cas des matériaux ayant une grande plasticité (Eigenbrod, 2003; Sterpi, 2015).

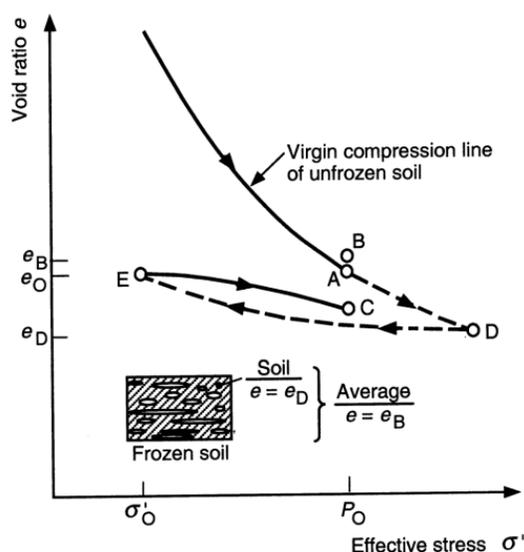


Figure 2-4 Schéma explicatif du processus de consolidation due au dégel. Proposé par Nixon et Morgenstern (1973), tirée de (Konrad & Samson, 2000).

La Figure 2–4 explique le processus de consolidation suivi par un sol après d'un cycle de gel-dégel (Konrad & Samson, 2000). Pour le processus général, l'état initial du sol se trouve dans le point A, ensuite, le sol est gelé en incrémentant l'indice de vides (point B) à cause de l'expansion volumique de l'eau dans les pores du sol. Postérieurement, si le sol dégèle complètement, sans permettre le drainage, il arrive à l'état représenté par le point C, à la suite d'une perte de volume. Une fois la contrainte effective due à la succion imposée par le gel dépasse la pression de préconsolidation,  $P_0$ , les contraintes suivent la trajectoire AD. Pendant le dégel, les éléments surconsolidés gonflent en absorbant l'eau disponible; s'il n'y a pas de drainage, la trajectoire suivie sera DE. Si le drainage est permis, le sol est reconsolidé jusqu'à  $P_0$  en suivant la trajectoire EC. L'état représenté dans le point E correspond à la contrainte résiduelle du sol après le gel.

Chamberlain et Gow (1979) cités par Konrad et Samson (2000) expliquent que l'augmentation de la conductivité hydraulique après un cycle de gel-dégel, sans produire la fissuration, est due à des changements dans la structure du sol au niveau microscopique et macroscopique. Ce phénomène est représenté dans la Figure 2–5. Pour une argile silteuse (Figure 2–5.b), les grains grossiers contrôlent la structure du sol tandis que les grains fins contrôlent la conductivité hydraulique. Après le gel-dégel, les paquets d'argile forment des structures plus denses et dispersées dues à la consolidation, en occupant un volume plus faible, augmentant l'indice de vides et comme conséquence la conductivité hydraulique augmente (Konrad & Samson, 2000). Dans le cas d'un silt argileux (Figure 2–5.a), les grains grossiers ne sont pas en contact. L'arrangement des argiles à la suite de la consolidation induite par le gel-dégel fait aussi réduire le volume occupé en augmentant l'indice de vides et à nouveau, la conductivité hydraulique augmente (Konrad & Samson, 2000).

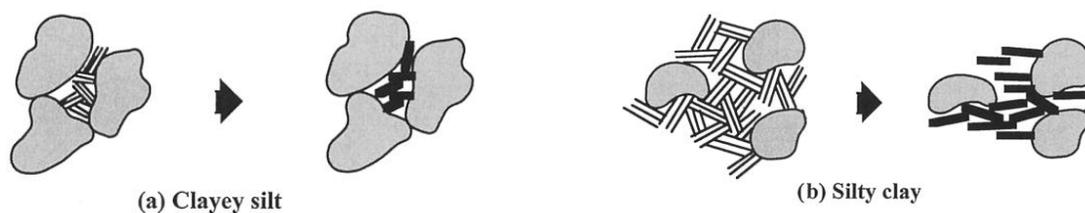


Figure 2–5 Changements dans la structure du sol à la suite des cycles de gel-dégel. Chamberlain et Gow (1979), tirée de (Konrad & Samson, 2000).

À partir des essais de laboratoire, Sterpi (2015) a démontré que les effets engendrés par les cycles de gel-dégel peuvent être réduits en utilisant une énergie de compactage élevée. D'autre part, l'augmentation de la conductivité hydraulique est aussi contrôlée par des contraintes élevées (Eigenbrod, 2003), ce qui n'est pas le cas des recouvrements qui sont plutôt superficiels.

Il est important de mentionner que certains sols non plastiques ou à très faible plasticité ou des sols fortement gonflants ne subissent pas des changements de perméabilité, même si après les périodes de gel on peut observer des zones de fissuration. Ce comportement s'explique par les capacités d'autocicatrisation de ces fissures au cours du dégel (Eigenbrod, 2003). L'autocicatrisation peut se développer par l'augmentation de la contrainte effective au-dessus du niveau de la résistance non drainé du sol; par le colmatage des fractures par les particules érodées pendant la percolation, dans le cas des sols de faible plasticité; ou par le gonflement des particules argileuses près des fractures dans le cas des sols fortement gonflantes (Eigenbrod, 2003). Finalement, à partir des essais menés au laboratoire Merzouk et al. (2022) ont montré que les effets des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique peuvent être minimisés par l'amendement avec des sols granulaires (sable et silt).

### **2.2.3 Dépôts argileux de l'Abitibi (Lac Ojibway)**

Les matériaux argileux couvrent de très grandes étendues sur le territoire de l'Abitibi-Témiscamingue. De point de vue physiographique, le paysage de l'Abitibi apparaît généralement comme une vaste plaine argileuse, au-dessus de laquelle s'élèvent, ici et là, des collines rocheuses et de nombreux eskers (Tremblay, 1974). Ce paysage a été formé lors de la mise en place de dépôts au cours des trois épisodes majeurs : le retrait du glacier; la submersion du lac qui talonnait le front glaciaire et la période post-glaciaire (Cloutier et al., 2016).

Il y a environ 20000 ans, un immense glacier couvrait l'ensemble du Canada et le nord des États-Unis. Le glacier a commencé son retrait il y a environ 10000 ans au sud du Témiscamingue et 9000 ans en Abitibi. Les eaux de fonte se sont accumulées entre la croûte terrestre (rebondi à cause du soulèvement isostatique au Sud) et le glacier (au Nord). Cela a permis la formation de deux lacs : Barlow, dans le bassin hydrographique du Sud (au Témiscamingue) et Ojibway dans le bassin du Nord (en Abitibi); les deux lacs forment pendant un certain temps un seul plan d'eau nommé Lac

Barlow-Ojibway. Le lac d'Ojibway a subsisté jusqu'à l'ouverture d'une brèche dans la glace permettant sa vidange dans la baie d'Hudson (Cloutier et al., 2016) il y a environ 8000 ans.

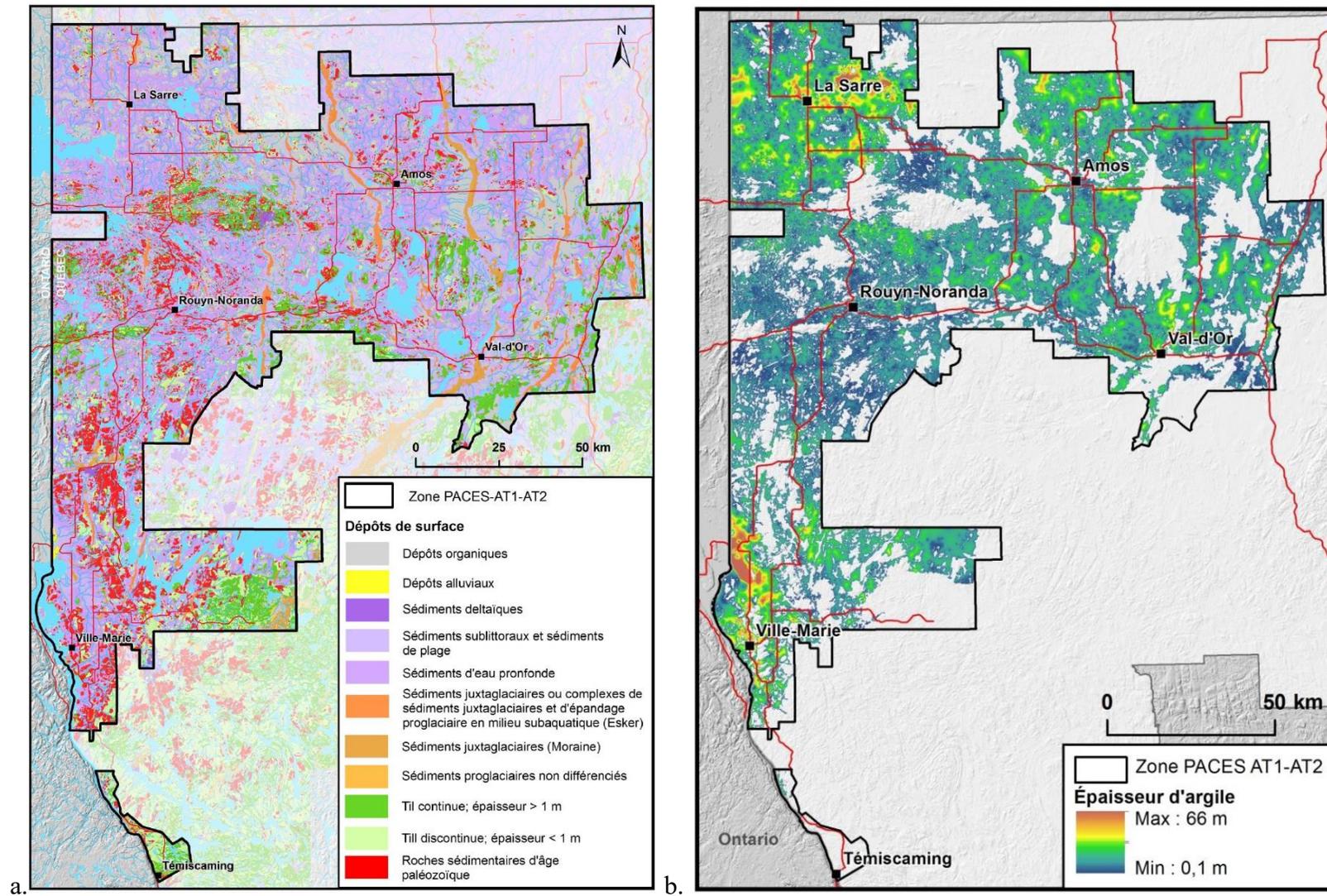


Figure 2-6 a. Carte Géologie du Quaternaire, tirée de Cloutier et al. (2016). b. Carte Épaisseur de la couche d'argile, tirée de Cloutier et al. (2016).

Les plaines de l'Abitibi-Témiscamingue se sont formées à la suite du dépôt au fond de ces deux lacs d'une succession de particules de sol. Ces dépôts glaciolacustres peuvent être divisés en deux sous-unités : les dépôts d'eau profonde (argile, silt, sable) et les dépôts d'eau peu profonde (sable, gravier, blocs). Les dépôts d'eau profonde couvrent à peu près 40% de la superficie de l'Abitibi-Témiscamingue (Cloutier et al., 2016). La Figure 2–6.a présente la carte géologique du quaternaire, sur cette carte, il est possible d'identifier les zones couvertes par les sédiments d'eau profonde ainsi que les autres dépôts formés après le retrait du glacier.

La Figure 2–7 montre l'extension de la plaine argileuse Barlow-Ojibway (dépôts d'eau profonde); pourtant, l'argile n'est pas répartie également dans l'enclave. Près du lac Témiscamingue, on y trouve des épaisseurs d'argile supérieures à 50 m. Toutefois, des épaisseurs d'environ 10 m sont généralement observées pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Cloutier et al., 2013). Lorsque les lacs Barlow et Ojibway existaient, quelques collines et eskers émergeaient du lac. Ces îles sont aujourd'hui les plus hautes collines de la région et ne sont pas recouvertes par ces dépôts. D'autre part, les ondulations du socle rocheux dans le fond du lac sont masquées par l'argile présente uniquement là où l'eau avait une profondeur de plusieurs dizaines de mètres (Martineau, 2018). Pour illustrer cet effet, on peut observer la répartition des différents types de sédiments et la variabilité des épaisseurs sur la coupe stratigraphique schématisée qui se présente dans la Figure 2–8. Ainsi cette variation en termes d'épaisseur peut être observé à la Figure 2–6.b. où on peut observer que l'épaisseur de l'argile peut s'échelonner entre quelques décimètres jusqu'à 66 m.

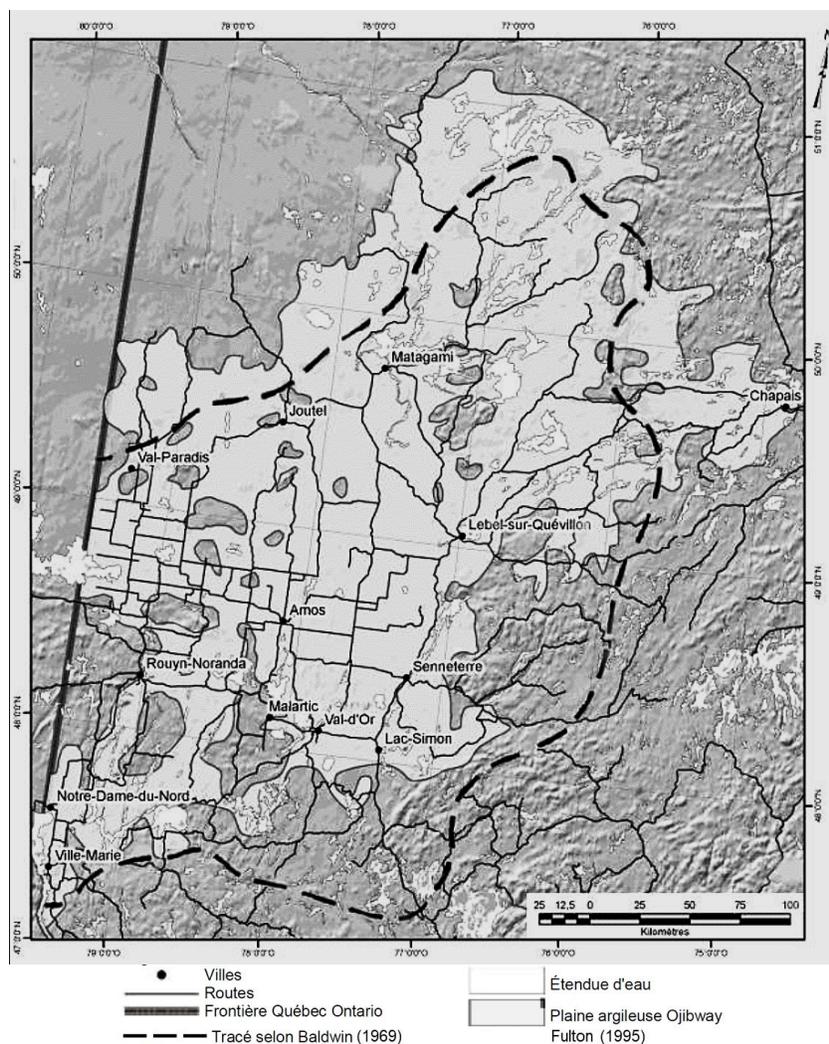


Figure 2–7 Plaine argileuse Barlow-Ojibway. En gris, la limite de la plaine argileuse tracée par Fulton (1995) et en ligne pointée la limite proposée par Baldwin (1969), tirée de Martineau (2018).

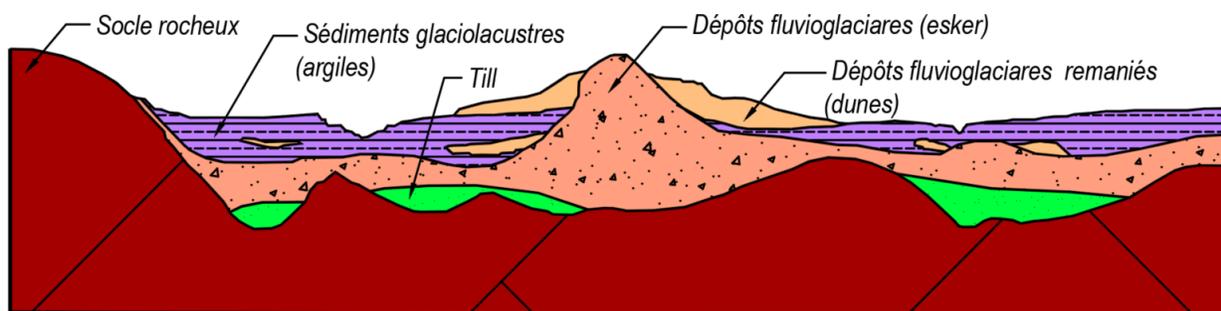


Figure 2–8 Coupe schématique illustrant les différents types de dépôts glaciaires et les variations dans leur épaisseur. Adaptée de Rompré et Carrier (1997) et Cloutier et al. (2016).

En résumé, les matériaux argileux couvrent de très grandes étendues sur le territoire de l'Abitibi-Témiscamingue. La région est caractérisée par le développement de vastes plaines d'argile formées au fond des lacs de barrage glaciaire et exposées après la vidange des lacs. Rompré et Carrier (1997) classifient ces dépôts glaciolacustres (couramment appelés enclave argileuse, plaine argileuse ou *clay belt* de Barlow-Ojibway) en : loams et loams silteux argileux, argiles lourdes, et argiles et argiles silteuses.

Les *argiles lourdes* sont le type de dépôt le plus répandu dans la région. Il s'agit d'argiles grises, lourdes, poreuses et de consistance friable et très bien structurées; elles sont varvées aux environs de 50 cm (Rompré & Carrier, 1997). De point de vue granulométrique, ce dépôt a une composition moyenne de 77% d'argile (qui varie entre 52 et 89%), 21% de silt (11 – 41 %) et traces de sable (entre 0 et 2%), d'après les données présentées par Rompré et Carrier (1997).

Selon les mêmes auteurs, les *argiles et argiles limoneuses* sont grises, peu structurées ou sans structure, de porosité très variable et une consistance de friable à très fermée. Elles sont composées de 54% d'argile (variant entre 41 et 91%), 42% de silt et 4% de sable. De sa part, les *loams et loams limoneux argileux* sont formés de loam limoneux dont la porosité, la consistance et la structure sont variables. Ils sont composés par 40% d'argile (variant entre 17 et 87%), 56% de silt et 4% de sable.

### 2.3 Écoulements de l'eau

La restauration minière fait appel à des notions d'écoulement d'eau et de fait il est indispensable de comprendre comment le phénomène se produit. À ce propos, il est essentiel de connaître les mécanismes et les équations qui gouvernent le mouvement des fluides dans un milieu poreux dans le but de faire une approximation mathématique ou une simulation numérique appropriée pour valider les observations faites sur le terrain.

À cet égard, cette section énonce l'équation de Darcy pour décrire l'écoulement de l'eau dans un milieu saturé et l'équation de Richards pour l'écoulement dans un milieu non saturé. Les propriétés hydrogéologiques impliquées dans ces équations sont aussi décrites. À la fin de ce chapitre on présente également une approximation numérique de ces équations.

Tout d'abord, l'eau s'écoule d'un point avec une certaine quantité d'énergie associée vers un autre point avec une quantité d'énergie plus faible (voir Figure 2–9). Dans ce bilan, on prend en compte l'énergie cinétique comme l'énergie potentielle. L'énergie cinétique est associée à la vitesse du fluide, tandis que l'énergie potentielle est associée à la charge de position et à la charge de pression. Selon l'équation de Bernoulli, la charge totale est égale à la somme de ces termes :

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v_w^2}{2g} \quad \text{Éq. 2-1}$$

Où,  $z$  est la charge de position (l'élévation par rapport à un *datum* arbitraire),

$u$  est la pression interstitielle,

$\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau,

$\frac{u}{\gamma_w}$  est la charge de pression,

$v_w$  est la vitesse effective de l'eau,

$g$  est l'accélération gravitationnelle, et

$\frac{v_w^2}{2g}$  est la charge associée à la vitesse du fluide.

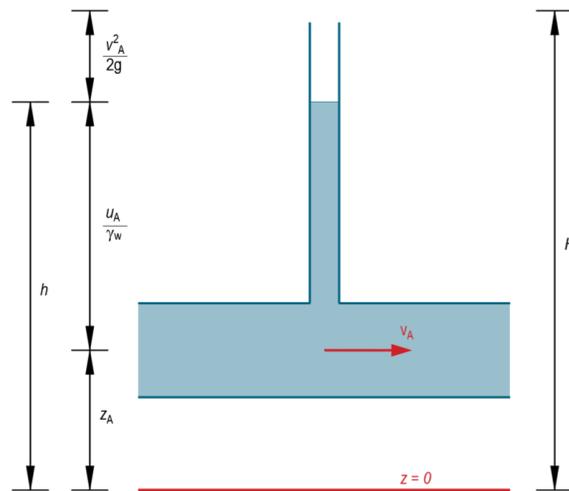


Figure 2–9 Charges de position, de pression et de vitesse (Adapté de Lancellotta 2008).

Si l'on considère un fluide parfaitement incompressible et un flux stationnaire, la charge hydraulique totale est constante à travers toute la ligne de flux :

$$z_A + \frac{u_A}{\gamma_w} + \frac{v_{wA}^2}{2g} = z_B + \frac{u_B}{\gamma_w} + \frac{v_{wB}^2}{2g} \quad \text{Éq. 2-2}$$

Avec A et B deux points quelconques sur la ligne de flux.

Si on considère un flux d'eau dans un sol, les vitesses les plus élevées attendues sont de l'ordre des 0,01 m/s, ce qui signifie une charge de vitesse de l'ordre des  $5 \times 10^{-6}$  m, en faisant le terme de la vitesse négligeable dans l'Éq. 2-2 (Lancellotta, 2008). Par conséquent, la charge totale dans un point du domaine du flux quelconque devient égale à l'élévation piézométrique :

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad \text{Éq. 2-3}$$

### 2.3.1 Écoulements de l'eau en milieu poreux saturé

L'écoulement de l'eau dans un sol peut être décrit en utilisant la loi de Darcy qui relie la vitesse avec le gradient hydraulique. Cette loi stipule que le débit Q qui s'écoule à travers un sol, comme celui qui est montré dans la Figure 2-10, est lié linéairement à l'aire de la section du sol traversée par l'eau (A) et au gradient hydraulique, c'est-à-dire la perte de charge ( $h_2 - h_1$ ) produit entre deux points séparés par une distance L :

$$Q = -KA \frac{h_2 - h_1}{L} \quad \text{Éq. 2-4}$$

Où,  $K [L.T^{-1}]$  est le coefficient de perméabilité (selon la définition de Darcy).

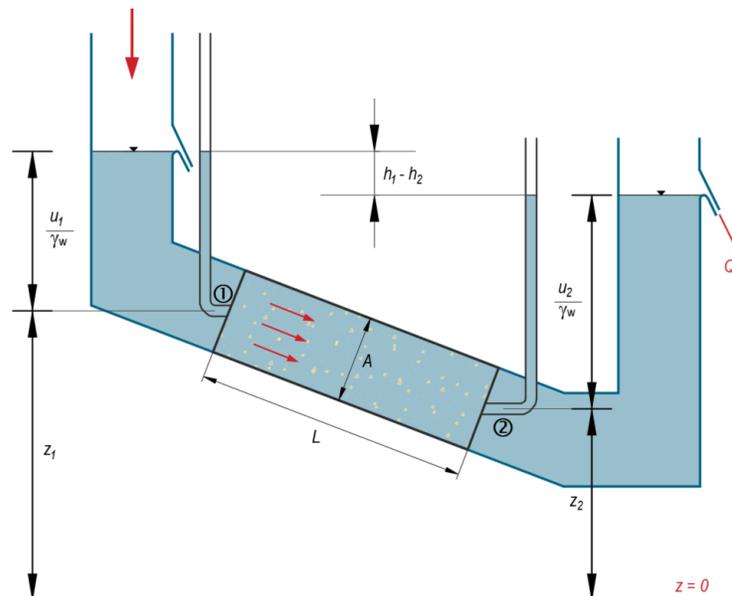


Figure 2-10 Loi de Darcy (Adapté de Lancellotta 2008).

En termes physiques, le coefficient de perméabilité peut être défini comme la facilité avec laquelle l'eau s'écoule à travers d'un milieu poreux. Le coefficient de perméabilité dépend des propriétés de la matrice solide (porosité, forme des particules, granulométrie, tortuosité et surface spécifique) et des propriétés du fluide (densité et viscosité).

En introduisant la définition du débit spécifique (aussi appelé vitesse de filtration ou vitesse de Darcy) comme la quantité d'eau qui s'écoule à travers une superficie unitaire par une unité de temps, c'est-à-dire le rapport entre  $Q$  et  $A$ , on peut réécrire l'Éq. 2-4, pour le cas isotrope, de la façon suivante :

$$v = Ki \quad \text{Éq. 2-5}$$

Où,  $i = -\nabla h$  est le gradient hydraulique.

Dans le cas général (anisotrope), l'Éq. 2-5 devient :

$$v_i = K_{ij}i_j \quad \text{Éq. 2-6}$$

Dans ce cas-là,  $K$  devient le tenseur de conductivité hydraulique.

Finalement, la loi de Darcy a été établie sous des conditions d'écoulement particulières qui limitent sa validité. Les conditions nécessaires pour la validité de cette équation sont les suivantes :

- Écoulement laminaire,
- Régime d'écoulement permanente,
- Energie cinétique négligeable,
- Matrice solide homogène et isotrope
- Fluide homogène, isotherme, et incompressible.

### ***Estimation de la conductivité hydraulique saturée***

Comme présenté dans la section précédente, la conductivité hydraulique saturée permet de caractériser l'écoulement de l'eau à travers d'un milieu poreux. Le coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique) est une propriété des sols avec une haute dispersion et qui est influencé

par la méthode de mesure choisie (Deb & Shukla, 2012; Nagy et al., 2013). Elle peut être déterminée au laboratoire, à l'aide d'essais *in situ*, ou bien elle peut être prédite à l'aide d'équations en fonction des propriétés des sols (Figure 2–11).



Figure 2–11 Méthodes utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique saturée.

Pour les essais de laboratoire, on trouve des essais normalisés à l'aide de perméamètres à charge constante et à charge variable, des essais en cellule triaxial à charge variable, des essais en œdomètre et des essais triaxiaux. Dans la Figure 2–12 sont présentés les intervalles de conductivité hydraulique pour lesquels sont recommandés les différents types d'essais faits au laboratoire.

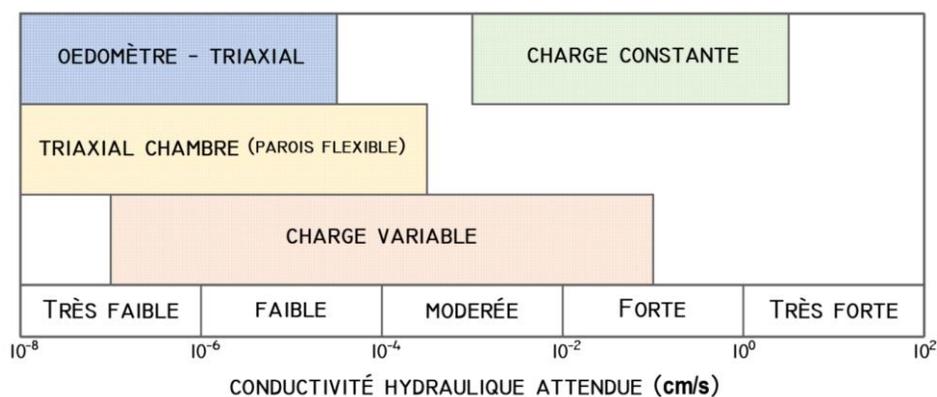


Figure 2–12 Conductivité hydraulique attendue et les intervalles d'utilisation des types d'essais de laboratoire (Adaptée de Nagy et al., 2013).

La conductivité hydraulique des sols peut aussi être mesurée à l'aide des essais *in situ*. Ces essais peuvent être réalisés avec des infiltromètres (à simple ou à double anneau) ou avec un perméamètre

à l'entrée d'air, en mesurant l'infiltration de l'eau vers le sol (Fernuik & Haug, 1990). Il est possible aussi de mesurer la conductivité hydraulique des unités géologiques (massif rocheux) au moyen des essais de pompage en utilisant des forages.

Finalement, la conductivité hydraulique saturée d'un sol peut être prédite à l'aide d'équations empiriques en se basant sur la distribution granulométrique des particules, la porosité et les caractéristiques du fluide utilisé. Cette approximation devient intéressante dans les phases préliminaires des projets. Chapuis (2012) a comparé la performance de 45 méthodes pour prédire la conductivité hydraulique saturée. Plusieurs de ces équations ont des restrictions quant à leur application à différents types de sols et sa précision dépend fortement de la qualité des résultats expérimentaux utilisés pour les calibrer (Mbonimpa et al., 2021). Dans le tableau qui suit, on présente les modèles de prédiction les plus utilisés pour évaluer la conductivité hydraulique saturée.

Tableau 2-2 Équations permettant la prédiction de la conductivité hydraulique saturée.

Modèle	Équation	
Hazen (1892)	$k_{sat} = C_H D_{10}^2$	Éq. 2-7
Kozeny-Carman (1956) tirée de Chapuis et Aubertin (2003)	$k_{sat} = C_1 \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{1}{G_s^2 S_m^2} \frac{e^3}{(1+e)}$	Éq. 2-8
Terzaghi (1925)	$k_{sat} = C_T \frac{\gamma_w}{\mu_w} \left( \frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^n D_{10}^2$	Éq. 2-9
Kozeny-Carman Modifié (Mbonimpa et al., 2002)	$k_{satG} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{(1+e)} C_U^{1/3} D_{10}^2$ $k_{satP} = C_P \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{(1+e)} \frac{1}{\rho_s^2 w_L^{2x}}$	Éq. 2-10
Taylor (1948) et Budhu (2011) tirée de (Chapuis, 2012)	$k_{sat} = C_1 \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^3}{(1+e)} D_{50}^{3/2}$	Éq. 2-11

Avec :

$k_{sat}$  la conductivité hydraulique saturée

$C$  la constante du modèle ( $C_H, C_1, C_G, C_P, C_T$ )

$D_{10}$  le diamètre effectif des particules qui correspond au 10% des passants

$\gamma_w$  le poids volumique de l'eau

$\mu_w$  la viscosité dynamique de l'eau

$G_s$  la densité relative des grains

$S_m$  la surface spécifique des grains

$e$  l'indice de vides

$n$  la porosité

$C_U$  le coefficient d'uniformité

$\chi$  le paramètre de tortuosité

$w_L$  la limite de la liquidité du sol

$\chi$  un paramètre de forme

$D_{50}$  le diamètre des grains correspondant à 50% passant sur la courbe granulométrique

Jusqu'à ici, on a présenté l'équation de Darcy pour décrire l'écoulement de l'eau dans un milieu saturé et les méthodes d'estimation (mesure et prédiction) de la conductivité hydraulique saturée, qui est le paramètre qui gouverne le mouvement de l'eau dans les sols. Dans la section suivante, l'équation de Richards qui gouverne l'écoulement de l'eau dans le milieu non saturé est présentée ainsi que les paramètres hydrogéologiques impliqués dans cette équation (courbe de rétention d'eau et fonction de perméabilité).

### 2.3.2 Écoulements de l'eau en milieu poreux non saturé

À partir de l'équation de Darcy qu'on vient de décrire et de l'équation de conservation de la masse, Richardson (1922) a développé une équation pour décrire l'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux non saturé, en considérant l'action de la capillarité et la gravité. L'équation de Richards (nommé d'après Richards (1931), mais publié en 1922 (Farthing & Ogden, 2017), et qui est également appelé équation généralisée de Darcy, peut être écrite de différentes façons : en fonction de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ), en fonction de la pression de succion ( $\psi$ ) ou en fonction de ces deux variables. En considérant un écoulement vertical (1D) et en exprimant l'équation de Richards en fonction de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ), on obtient l'expression suivante:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad \text{Éq. 2-12}$$

Où,  $z$  est l'élévation,

$t$  est le temps,

$h$  est la charge hydraulique supplémentaire due à la capillarité,

$\theta = \theta(z, t)$  est la teneur en eau volumique, et

$K(\theta)$  est la fonction de conductivité hydraulique non saturée (aussi appelée fonction de perméabilité).

Pour le même cas l'équation peut être décrite en fonction de la pression de succion ( $\psi$ ) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad \text{Éq. 2-13}$$

Où,  $\psi(\theta)$  est la fonction empirique de la succion matricielle.

Finalement, l'équation de Richards en fonction de la succion peut s'exprimer d'une façon générale (3D) pour un milieu poreux anisotrope comme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} \quad \text{Éq. 2-14}$$

Généralement dans les analyses liées à l'évaluation de la performance des recouvrements pour le contrôle du DMA, l'équation de Richards est exprimée en fonction de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ), ainsi que présentée dans l'Éq. 2-12. Par conséquent, l'écoulement de l'eau est décrit en utilisant les courbes de rétention d'eau et les fonctions de la conductivité hydraulique (aussi appelée fonction de perméabilité).

La courbe de rétention d'eau (CRE), aussi appelé courbe caractéristique sol-eau (CCSE ou SWCC en anglais) relie la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) ou bien la saturation ( $S$ ) des matériaux avec la succion matricielle ( $\psi$ ). La CRE dépend de certains facteurs tels la granulométrie, la porosité, la tortuosité du système des pores et le sens de l'écoulement (en mouillage ou en drainage) (Aubertin et al., 1998; Maqsood et al., 2006).

Typiquement, la CRE présent trois zones (voir Figure 2–13): une zone de saturation (I), où  $\theta$  est égale à la teneur en eau à saturation  $\theta_s$  qui est très proche de la valeur de la porosité  $n$ , une zone de transition (II), où  $\theta$  diminue avec une augmentation de la succion et une zone résiduelle (III) où  $\theta$  est très proche de la teneur en eau résiduelle  $\theta_r$ . Lors du processus de drainage, ces zones sont délimitées par le point caractéristique, AEV (*air entry value*  $\psi_a$ ), qui correspond à la teneur en eau

à partir laquelle les pores commencent à se vider, et la succion minimale nécessaire pour arriver à la teneur en eau résiduelle ( $\theta_r$ ).

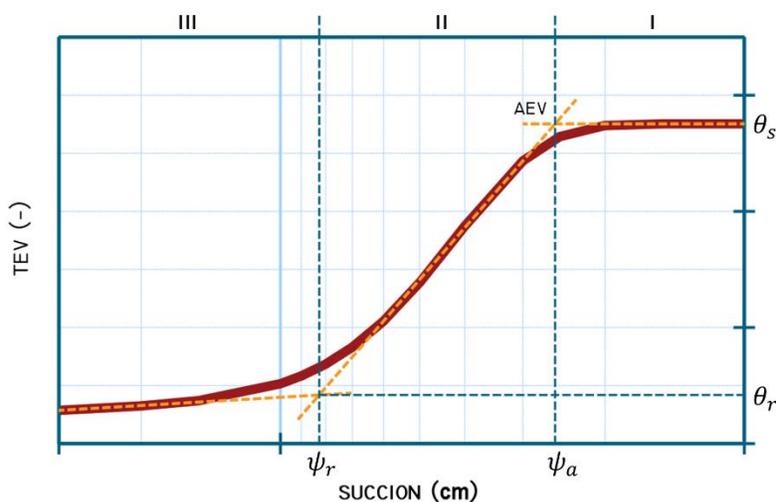


Figure 2–13 Courbe de rétention d'eau avec les points caractéristiques AEV et les zones : I, zone saturée; II, zone transitoire, III, zone résiduelle.

### *Estimation de la courbe de rétention d'eau, CRE*

La courbe de rétention d'eau peut être mesurée au laboratoire à partir de deux types d'essais: succion constante ou teneur en eau constante. Dans le premier cas on impose une succion constante et l'on suit l'évolution de sa teneur en eau; dans le deuxième cas, on fixe la teneur en eau et l'on mesure la succion obtenue à l'équilibre. Parmi les méthodes les plus utilisées on retrouve: l'essai en cellule de pression, l'essai en colonne, l'essai de contrôle osmotique, l'essai de contrôle de succion par la phase vapeur, mesure tensiométrique de la succion, mesure psychométrique de la succion, et la méthode du papier filtre (Delage & Cui, 2000). Plusieurs méthodes peuvent être jumelées afin d'obtenir la CRE la plus complète d'un sol.

La CRE d'un sol peut être également déterminée à l'aide de mesures sur le terrain. Maqsoud et al. (2007) ont présenté une méthode pour déterminer la CRE *in situ* en utilisant des capteurs de teneur en eau volumique et de succion. Des lectures peuvent être effectuées périodiquement lors de mouillage ou de drainage généré artificiellement ou sous des conditions naturelles.

Des modèles mathématiques peuvent être utilisés pour ajuster les points mesurés aux modèles descriptifs théoriques tels que Gardner (1958), Brooks et Corey B-C (1964), Campbell (1974), van Genuchten (1980), Fredlund et Xing (1994) et Pham et Fredlund (2005) et Fredlund et al. (2012).

Le modèle de van Genuchten (1980) peut être décrit par les équations suivantes:

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Éq. 2-15}$$

$$\theta_e = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_v \psi)^{n_v}} \right]^{m_v} \quad \text{Éq. 2-16}$$

Avec :

$\theta_e$  la teneur en eau réduite [- ]

$\theta$  la teneur en eau volumique [- ]

$\theta_s$  la teneur en eau volumique saturée [- ]

$\theta_r$  la teneur en eau volumique résiduelle [- ]

$\psi$  la succion [L]

$\alpha_v \cong 1/AEV$ ,  $n_v$  et  $m_v$  sont des paramètres d'ajustement du modèle.

$m_v = 1 - 1/(n_v)$ ,

ou  $m_v = 1 - 2/(n_v)$ .

Il est également possible d'estimer les CRE à l'aide de modèles prédictifs à partir de leurs propriétés de base. Un modèle souvent utilisé est celui de Kovács Modifié (MK) (Mbonimpa et al., 2002). Le modèle MK est présenté ci-dessus à partir des équations tirées de Aubertin et al. (2015) et Mbonimpa et al. (2021) :

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + (1 - S_c)(1 - S_a) \quad \text{Éq. 2-17}$$

Avec :

$\theta$  la teneur en eau volumique [-]

$n$  la porosité totale du milieu poreux [-]

$S_c$  le degré de saturation dû à la capillarité [-]

$S_a$  degré de saturation dû à l'adhésion [-]

Le degré de saturation dû à la capillarité  $S_c$  et le degré de saturation dû à l'adhésion  $S_a$  sont définis à partir de propriétés géotechniques de base des matériaux, incluant le diamètre effectif des grains, le coefficient d'uniformité, l'indice des vides et la densité des grains solides. Le degré de saturation capillaire est une fonction de la distribution statistique de la dimension des pores :

$$S_c = 1 - [(h_{co}/\psi)^2 + 1]^m \exp[-m((h_{co}/\psi)^2)] \quad \text{Éq. 2-18}$$

Avec :

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

$\psi$  la succion matricielle [L]

$m$  le coefficient de la distribution de taille des pores [-],  $m \approx 1/C_U$  pour les sols granulaires.

La saturation d'adhésion  $S_a$  fait référence aux forces d'attraction électrostatiques entre la surface des grains et les molécules bipolaires de l'eau. Ces forces conduisent à la formation d'une pellicule d'eau « résiduelle » autour des particules solides. La saturation d'adhésion peut être calculée de la façon suivante :

$$S_a = a_c C_\psi \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \quad \text{Éq. 2-19}$$

Avec :

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_0/\psi_r)} \quad \text{Éq. 2-20}$$

Où  $a_c$  est le coefficient d'adhésion

$\psi_n$  est le paramètre de normalisation

$\psi_r$  est la succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle

L'équation générale qui décrit la remontée capillaire équivalente ( $h_{co}$ ) est la suivante :

$$h_{co} = \frac{\sigma_w \cos \beta_w \rho_s S_m}{\gamma_w e} \quad \text{Éq. 2-21}$$

Où  $\sigma_w$  est la tension de surface de l'eau [0,073 N/m à 20°C]

$\beta_w$  l'angle de contact entre l'eau et la surface des particules solides

$\gamma_w$  le poids volumique de l'eau

$\rho_s$  la masse volumique des solides

$S_m$  la surface spécifique

$e$  l'indice de vides

Quand il s'agit des sols granulaires,  $S_m = \alpha/\rho_s D_H$  et l'équation Éq. 2-21 devient :

$$h_{co} = \frac{\alpha \sigma_w \cos \beta_w}{[1 + 1,17 \log(C_U)] \gamma_w e D_{10}} \quad \text{Éq. 2-22}$$

Avec :  $\alpha$  le facteur de forme

$D_H = [1 + 1,17 \log(C_U)] D_{10}$  le diamètre équivalente

$C_U = D_{60}/D_{10}$  le coefficient de uniformité

$D_{10}$  le diamètre effectif des particules

Dans le cas des sols plastiques ( $w_L > 30\%$ ),  $S_m = \lambda w_L^\chi$  et l'équation Éq. 2-21 devient :

$$h_{co} = \frac{\sigma_w \cos \beta_w}{e \gamma_w} \lambda \rho_s w_L^\chi \quad \text{Éq. 2-23}$$

Où  $w_L$  est la limite de liquidité

$\lambda$  et  $\chi$  des paramètres du matériau. Typiquement  $\lambda = 0,2$  et  $\chi = 1,45$

### ***Estimation de la fonction de perméabilité***

Finalement, on décrit la fonction de conductivité hydraulique non saturée qui gouverne l'équation de Richards (Éq. 2-12). La fonction de conductivité hydraulique non saturée, ou habituellement appelée fonction de perméabilité, est la variation de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau volumique des matériaux (voir Figure 2-14). En général, la résistance à l'écoulement augmente avec la diminution du degré de saturation des matériaux, ce qui engendre une diminution de la conductivité hydraulique du milieu. L'allure de la fonction de la conductivité hydraulique montre des valeurs très faibles au-dessous de la teneur en eau résiduelle qui augmentent

progressivement jusqu'à la valeur maximale qui correspond à la conductivité hydraulique saturée (Musy & Soutter, 1991).

La conductivité hydraulique est principalement contrôlée par la répartition de la taille des pores, tout comme la courbe de rétention d'eau (CRE); de ce fait la fonction de perméabilité peut être obtenue à partir de la CRE. Plusieurs modèles ont été développés afin d'estimer la fonction de conductivité hydraulique (Fredlund et al., 2012; Mbonimpa et al., 2021). Dans ce qui suit seront décrits les modèles de Burdine (1953) (Éq. 2-24) et Mualem (1976) (Éq. 2-25) dans sa forme analytique approchée:

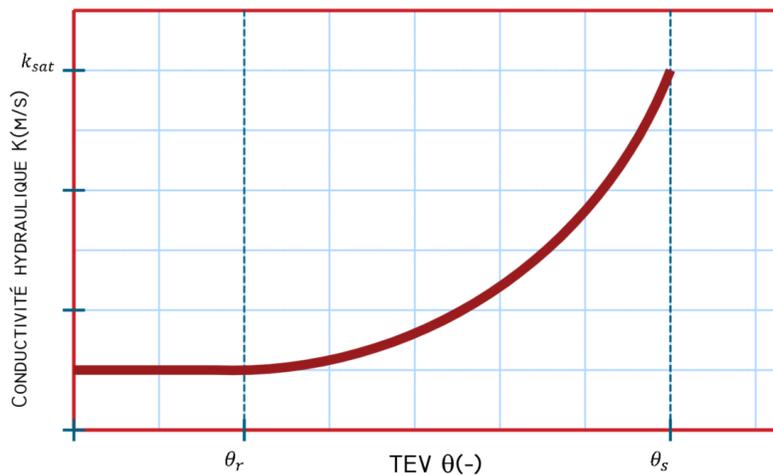


Figure 2–14 Variation de la conductivité hydraulique non saturée en fonction de la teneur en eau du milieu, modifié de Musy et Soutter (1991).

L'équation proposée par Burdine et formulée par van Genuchten est la suivante :

$$k_r = \theta_e^l \left\{ 1 - \left[ \theta_e^{(1/m_v)} \right]^{m_v} \right\}^2 \quad \text{Éq. 2-24}$$

Avec :

$m_v = 1 - 2/n_v$  est le paramètre de lissage de la courbe de rétention d'eau,

$l$  est le paramètre d'interconnectivité des pores.

L'équation proposée par Mualem et formulée par van Genuchten est la suivante :

$$k(\theta) = k_{sat} \left\{ 1 - \left[ 1 - \theta_e^{(1/m_v)} \right]^{m_v} \right\}^2 \theta_e^{n_v} \quad \text{Éq. 2-25}$$

$m_v$  et  $n_v$  sont les constantes d'ajustement de la courbe selon le modèle de van Genuchten (1980), voir Éq. 2-16.

### 2.3.3 Approximation numérique des équations de l'écoulement de l'eau

L'équation de Richards (décrite dans la section 2.3.2) généralise l'équation de Darcy et décrit l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux non saturé. Les solutions analytiques de l'équation de Richards n'existent que pour les cas simplifiés avec des hypothèses parfois éloignées de la réalité, de sorte que la plupart des situations pratiques nécessitent une solution numérique.

L'équation Éq. 2-13 peut se réécrire en fonction de la pression de succion ( $\psi$ ) et la teneur en eau volumique ( $\theta = \theta(\psi)$ ) pour le cas d'un mouvement unidimensionnel vertical:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial \psi(z, t)}{\partial z} - 1 \right) \right] - C(\psi) \frac{\partial \psi(z, t)}{\partial t} = 0 \quad \text{Éq. 2-26}$$

Où,  $\psi(z, t)$  est la charge de pression,  $K(\psi)$  la conductivité hydraulique et  $C(\psi)$  la capacité capillaire, représentée par la courbe de rétention d'eau. Cette équation n'est valide que lorsque les hypothèses suivantes sont satisfaites : la matrice solide est indéformable, homogène et isotrope; le fluide est incompressible, la loi de Darcy est applicable et la capacité capillaire  $C(\psi)$  vaut zéro lors de la saturation (Musy & Soutter, 1991).

D'après Reddy (2004) on entend par modélisation (ou simulation) numérique d'un processus, la solution des équations d'équilibre (ou modèle mathématique) du processus à l'aide d'une méthode numérique et d'un ordinateur. Les méthodes numériques transforment généralement les équations différentielles régissant un continuum en un ensemble d'équations algébriques du modèle discret du continuum qui peuvent être résolues à l'aide d'ordinateurs. L'équation de Richards est une équation différentielle aux dérivées partielles de type parabolique en milieu non saturée ( $C(\psi) \neq 0$ ) et elliptique en milieu saturé. La solution numérique de cette équation nécessite la connaissance des éléments suivants (Musy & Soutter, 1991):

- les fonctions  $C(\psi)$  et  $K(\psi)$ ,

- la condition initiale, c'est-à-dire la valeur de la fonction  $\psi_0(z, t)$  pour  $t = 0$  dans chaque  $z$  du domaine,
- les conditions aux limites au cours du processus. Ces conditions peuvent être de type essentiel (imposant une condition de Dirichlet ou de pression imposée) :

$$\psi(z, t) = \psi_1(z, t) \text{ pour } t > 0 \text{ en } z \in \partial\Omega_1 \text{ (}\Omega_1 \text{ est le domaine en la frontière)}$$

Ou de type naturel (imposant une condition de Neumann ou de flux imposée) :

$$\frac{\partial \psi}{\partial z_i}(z, t) = q(z, t) \text{ pour } t > 0 \text{ en } z \in \partial\Omega_2 \text{ (}\Omega_2 \text{ est le domaine en la frontière); } q(z, t) = 0$$

si la frontière est imperméable.

Une fois satisfaites ces besoins d'information, l'équation de Richards peut être résolue avec différentes méthodes numériques tels que la méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des volumes finis (FVM) ou la méthode des éléments finis de frontière (BEM), entre autres.

Les méthodes de différences finies et des éléments finies sont présentés dans les sections suivantes.

### ***Méthode des différences finies***

Dans la méthode des différences finies, les dérivées de l'équation différentielle sont remplacées par des quotients de différence (la fonction est développée dans une série de Taylor) qui impliquent les valeurs de la solution aux points de maillage discrets du domaine. Les équations algébriques résultantes sont résolues pour les valeurs de la solution à chaque point de maillage après avoir imposé les conditions aux limites.

Cette méthode s'avère très efficace pour des problèmes où le domaine est homogène, isotrope, et de frontières régulières de sorte que la discrétisation du domaine puisse se faire de manière uniforme c'est-à-dire avec un maillage régulier. Dans le cas contraire, l'élaboration et programmation des schémas de discrétisation devient un processus complexe. Les aspects généraux de la méthode des différences finies sont présentés ci-dessous.

D'après Guinot et al. (2005), lorsqu'on résout une équation différentielle au moyen de la méthode des différences finies, on cherche à déterminer la valeur de la solution à des instants (si la variable

indépendante est le temps) ou des points (si la variable indépendante est l'espace) prédéfinis, de sorte que la solution numérique trouvée n'a de sens que dans ces points (du temps ou l'espace). En d'autres termes, on transforme les variables indépendante et dépendantes (continues) en variables discrètes. Ce processus est nommé discrétisation.

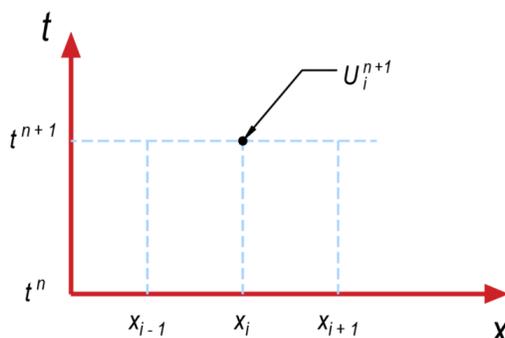


Figure 2–15 Discretisation du temps et de l'espace (cas d'un espace unidimensionnel). Adaptée de Guinot et al. (2005).

La Figure 2–15 illustre la discrétisation pour le cas comportant une seule dimension d'espace. Le temps et l'espace sont discrétisés de la même manière : on définit des points de calcul (notés avec l'indice  $i$ ) d'abscisses  $x_i$  et des intervalles de calcul  $t^n$  où l'on veut déterminer la solution numérique. La solution numérique de l'équation au point  $i$  au pas de temps  $n$  est notée  $U_i^{n+1}$ . Pour des problèmes multidimensionnels dans l'espace, l'espace est discrétisé en lignes. Les intersections des lignes définissent les points de calcul. Dans le cas 2D, un point de calcul est repéré par deux indices ( $i$  et  $j$ ) et en trois dimensions d'espace par les indices  $i, j$  et  $k$ .

Le principe de résolution consiste à trouver les valeurs de  $U_i^{n+1}$  (après un intervalle  $\Delta t$ , tel que  $t^{n+1} = t^n + \Delta t$ ), pour tous les points de calcul  $x_i$ , à partir de la valeur de  $U_i^n$  au temps  $t^n$  en un nombre discret de points  $x_i$ . Pour cela il est nécessaire de procéder à la discrétisation de l'équation différentielle, c'est-à-dire écrire l'approximation des dérivées  $\partial U/\partial t$  et  $\partial U/\partial x$  en termes de  $U_i^n$ ,  $U_i^{n+1}$ ,  $U_{i+1}^n$ ,  $U_{i+1}^{n+1}$ ,  $U_{i-1}^n$ ,  $U_{i-1}^{n+1}$ ,  $\Delta t$ , et  $\Delta x$  selon le schéma numérique choisi (Euler, Crank-Nicolson, etc.)

Dans le cas de l'équation de Richards (Éq. 2-26), la solution de cette équation est une fonction  $\psi(z, t)$  qui caractérise l'évolution de l'écoulement dans le sol. La Figure 2–16 montre la discrétisation de maillage uniforme du domaine spatio-temporel  $(z, t)$  proposée afin de résoudre

l'équation de Richards. L'espace est représenté sur l'axe vertical et le temps sur l'axe horizontal; les points sur l'axe spatial sont repérés par l'indice  $i$  et sur l'axe temporel par l'indice  $j$ .

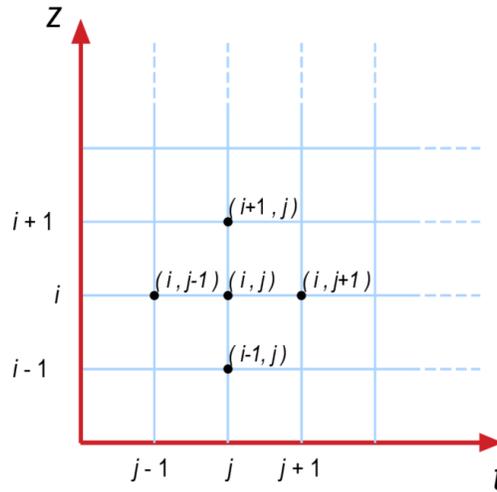


Figure 2-16 Discretisation utilisée dans la solution de l'équation de Richards. Adaptée de Musy et Soutter (1991).

À partir de la notation présentée dans la Figure 2-16, la forme discrète du second membre de l'équation Éq. 2-26 s'obtient par l'approximation suivante :

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \bar{C} \frac{\psi_i^{j+1} - \psi_i^j}{\Delta t} \quad \text{Éq. 2-27}$$

Où  $\bar{C}$  est une valeur moyenne de la fonction  $C(\psi)$  au cours de l'intervalle  $\Delta t$ .

Pareillement, il est possible d'achever la forme discrète de l'équation Éq. 2-26 à l'aide de divers schémas numériques. En utilisant le schéma de Crank-Nicolson, ou des différences centrées, on obtient :

$$\frac{\psi_i^{j+1} - \psi_i^j}{\Delta t} = \frac{(\psi_{i+1}^{j+1} + \psi_{i+1}^j - 2\Delta z - \psi_i^{j+1} - \psi_i^j)K_{i+1/2}^{j+1/2}}{2C_i^{j+1/2}(\Delta z)^2} - \frac{(\psi_i^{j+1} + \psi_i^j - 2\Delta z - \psi_{i-1}^{j+1} - \psi_{i-1}^j)K_{i-1/2}^{j+1/2}}{2C_i^{j+1/2}(\Delta z)^2} \quad \text{Éq. 2-28}$$

Cette relation peut s'écrire sous forme matricielle, pour les nœuds intérieurs, comme suit :

$$A_i \psi_{i+1}^{j+1} + B_i \psi_i^{j+1} + C_i \psi_{i-1}^{j+1} = F_i \quad \text{Éq. 2-29}$$

Ce système d'équations peut se résoudre avec des méthodes algébriques traditionnelles, par exemple une procédure itérative d'élimination du type de Gauss. Les nœuds situés aux extrémités du domaine ont un traitement spécifique en fonction des conditions aux limites imposées.

### *Méthode des éléments finis*

De sa part, la méthode des éléments finis permet d'obtenir une solution pour tous les points du domaine à l'aide d'une fonction approchée. La méthode des éléments finis est une méthode numérique plus générale et puissante dans son application aux problèmes du monde réel qui impliquent des conditions physiques, géométriques ou aux limites complexes (Reddy, 2006). Cette méthode repose sur une formulation mathématique modifiée (mais équivalente) du problème : la formulation variationnelle.

Dans la méthode des éléments finis, un domaine donné est considéré comme une agrégation de sous-domaines. Sur chaque sous-domaine, les équations d'équilibre sont approchées par l'une des méthodes variationnelles traditionnelles (e.g. Ritz, Galerkin). La principale raison derrière la recherche d'une solution approximative sur une agrégation de sous-domaines est le fait qu'il est plus facile de représenter une fonction compliquée comme une agrégation de polynômes simples comme il est montré dans la Figure 2–17. Bien entendu, chaque segment individuel de la solution doit correspondre à celle de ses voisins dans le sens que la fonction et éventuellement les dérivées jusqu'à un certain ordre doivent être continues aux points de connexion. Le schéma général de la méthode des éléments finis est présenté dans ce qui suit.

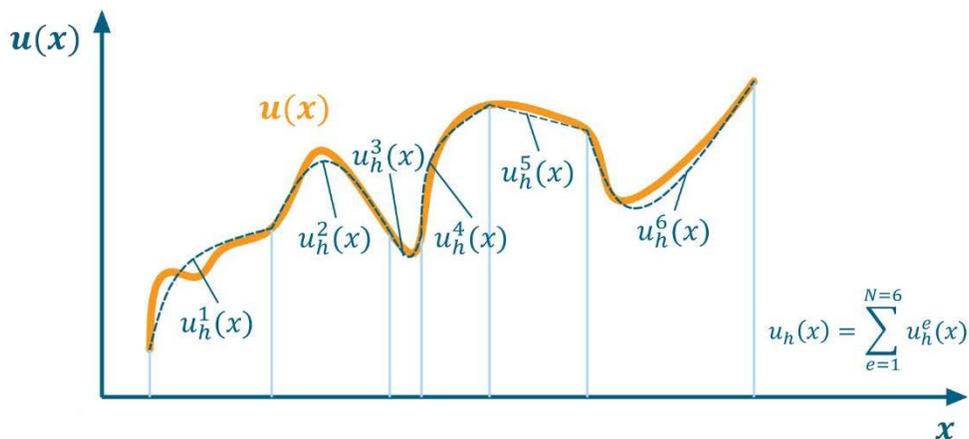


Figure 2–17 Approximation d'une fonction par sous-régions. Adaptée de Reddy (2004)

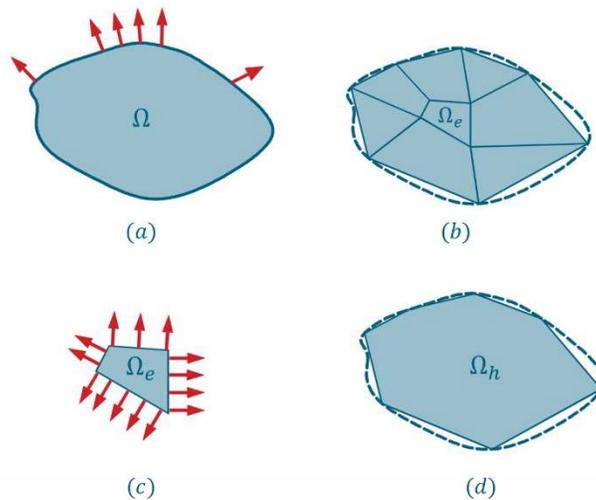


Figure 2–18 Représentation d'un domaine en deux dimensions avec une agrégation de triangles et quadrilatères. Adaptée de (Reddy, 2004).

La méthode des éléments finis non seulement permet de surmonter les lacunes des méthodes variationnelles traditionnelles, mais elle a aussi des caractéristiques qui font de la méthode une technique de calcul efficace (Reddy, 2006). La méthode des éléments finis possède trois caractéristiques qui expliquent sa supériorité sur les autres méthodes concurrentes : en premier lieu, un domaine  $\Omega$  avec une géométrie complexe est représenté comme une collection de sous-domaines géométriquement simples, appelés éléments finis (voir Figure 2–18). Chaque élément fini  $\Omega_e$  est considéré comme un domaine indépendant par lui-même. En deuxième lieu, sur chaque élément fini, des équations algébriques parmi les quantités d'intérêt sont développées en utilisant les équations d'équilibre du problème. Finalement, les éléments sont assemblés à l'aide de certaines relations entre eux, afin de garantir la continuité du problème.

À la suite, les principes essentiels de l'analyse par éléments finis et les étapes de base impliquées sont présentés dans le contexte du problème de l'écoulement en milieu poreux :

1. Discretisation (ou représentation) du domaine en une agrégation d'éléments finis avec une géométrie présélectionnée.
  - a. Construction du maillage d'éléments finis.
  - b. Numération des nœuds et des éléments.

- c. Génération des propriétés géométriques (e.g. les coordonnées et les surfaces) nécessaires pour la solution du problème.
2. Dérivation des équations des éléments pour tous les éléments typiques du maillage.

- a. Construction de la formulation variationnelle de l'équation différentielle donnée pour l'élément typique

L'équation de Richards (Éq. 2-26) peut s'exprimer de manière synthétique et condensée sous la forme :

$$\mathcal{D}(\psi) - f = 0 \quad \text{Éq. 2-30}$$

Où  $\mathcal{D}(\psi)$  est l'opérateur différentiel,  $\psi(z, t)$  la variable inconnue et  $f(z, t)$  une fonction connue ne dépendant de  $\psi$ .

La solution de cette relation par la méthode des éléments finis consiste à déterminer une solution approchée  $\psi'$  :

$$\mathcal{D}(\psi') - f = \varepsilon \quad \text{Éq. 2-31}$$

Où  $\varepsilon$  est un résidu qui tend vers 0 lorsque  $\psi'$  tend vers  $\psi$ . De cette façon la méthode des éléments finis conduit à chercher la meilleure solution approchée  $\psi'$ , c'est-à-dire celle qui minimise le résidu  $\varepsilon$ . Entre les méthodes d'approximation par résidus pondérés, on y trouve l'approche de Galerkin. Cette méthode repose sur une procédure de minimalisation par orthogonalisation, qui fait appel aux propriétés du produit scalaire (Musy & Soutter, 1991), de façon formelle :

$$\int_{\Omega} (\varepsilon \cdot v) d\Omega = 0 \quad \text{Éq. 2-32}$$

Où  $v$  est une fonction qui appartient à l'espace vectoriel  $\mathcal{H}$  des fonctions à valeur réelle qui satisfassent l'équation Éq. 2-32, tel que :

$$v' = \sum_{i=1}^s \beta_i \phi_i \quad \text{Éq. 2-33}$$

Où  $\beta_i$  sont des coefficients scalaires,  $\phi_i(z)$  un ensemble de fonctions linéairement indépendantes (fonctions de base) constituant une base de  $\mathcal{H}'$  et  $s$  la dimension de

$\mathcal{H}'$ . Les fonctions de base  $\phi_i$  sont sélectionnées de telle sorte que pour un ensemble de  $s$  nœuds  $p_i$  répartis sur tout le domaine  $\Omega$  :

$$\begin{cases} \phi_i(p_i) & i = 1, s \\ \phi_i(p_j) & i \neq j, j = 1, s \end{cases} \quad \text{Éq. 2-34}$$

b. Établir des équations élémentaires sous la forme matricielle.

L'approche de Galerkin consiste à utiliser les mêmes fonctions de base  $\phi_i$  pour les fonctions d'essai  $v'$  et pour la solution approchée  $\psi'$ , de sorte que :

$$\psi' = \sum_{i=1}^s \alpha_i \phi_i \quad \text{Éq. 2-35}$$

Où  $\alpha_i$  sont des coefficients scalaires et en conséquence :

$$\alpha_i(t) = \psi_i' \quad \text{Éq. 2-36}$$

Avec cette démarche, l'équation de Richards prend la forme :

$$\sum_{j=1}^s \left( \int_{\Omega} K \frac{d\phi_i}{dz} \frac{d\phi_j}{dz} dz \right) \psi_j'(t) + \sum_{j=1}^s \left( \int_{\Omega} C \phi_i \phi_j dz \right) \frac{\partial \psi_j'(t)}{\partial t} + \int_{\Omega} K \frac{d\phi_i}{dz} dz = 0 \quad \text{Éq. 2-37}$$

Ou de manière condensée :

$$\mathbf{K} \psi_i' + \mathbf{C} \frac{\partial \psi_i'}{\partial t} + \mathbf{F} = 0 \quad \text{Éq. 2-38}$$

Avec :

$$\mathbf{K}_{ij} = \int_{\Omega} K \frac{d\phi_i}{dz} \frac{d\phi_j}{dz} dz \quad \text{Éq. 2-39}$$

$$\mathbf{C}_{ij} = \int_{\Omega} C \phi_i \phi_j dz \quad \text{Éq. 2-40}$$

$$\mathbf{F}_i = \int_{\Omega} K \frac{d\phi_i}{dz} dz \quad \text{Éq. 2-41}$$

Il faut mentionner que la discrétisation temporelle se fait en utilisant la méthode des différences finies avec un schéma central de Crank-Nicolson, ce qui donne :

$$\left(\frac{\mathbf{K}^{t+\Delta t/2}}{2} + \frac{\mathbf{C}^{t+\Delta t/2}}{\Delta t}\right) \boldsymbol{\psi}^{t+\Delta t} = \left(-\frac{\mathbf{K}^{t+\Delta t/2}}{2} + \frac{\mathbf{C}^{t+\Delta t/2}}{\Delta t}\right) \boldsymbol{\psi}^t - \mathbf{J}^{t+\Delta t/2} \quad \text{Éq. 2-42}$$

- c. Sélection, si disponible dans la littérature, ou déduction des fonctions d'interpolation élémentaires  $N_i$  et le calcul des matrices élémentaires.

La méthode des éléments finis est une procédure d'interpolation par morceaux d'une fonction. Les éléments  $\Omega_e$  (composé par  $s$  nœuds) sont des sous-ensembles du domaine  $\Omega$ , ainsi que l'illustre la Figure 2-18. Les  $s$  nœuds propres à la discrétisation élémentaire s'accordent aux nœuds évoqués en la démarche de l'approche de Galerkin. Une fonction d'interpolation  $N_i (i = 1, s)$  est assignée à chacun d'entre eux. Lorsque ces fonctions répondent aux conditions données dans l'équation Éq. 2-34, elles peuvent s'associer aux fonctions de base  $\phi_i$ . Si la valeur de  $\psi$  est connue en chaque nœud, alors l'interpolant  $\psi'$  est donné par :

$$\psi' = N \cdot \psi \quad \text{Éq. 2-43}$$

Où  $N$  est une matrice  $1 \times s$  de composantes  $N_i (i = 1, s)$  dépendantes de la position. Cette démarche vise à trouver la meilleure approximation de  $\psi$  en  $s$  points discrets : les nœuds. De cette façon, les intégrations des équations Éq. 2-32, Éq. 2-39, Éq. 2-40 et Éq. 2-41 peuvent se faire par morceaux, c'est-à-dire élément après élément.

3. Assemblage des équations élémentaires pour obtenir l'équation globale du problème.
  - a. Reconnaissance des conditions de continuité des équations d'équilibre entre les éléments c'est-à-dire l'établissement des relations entre les degrés de liberté locaux et les degrés de liberté globaux (connectivité des éléments), en reliant les nœuds d'élément aux nœuds globaux.
  - b. Reconnaissance des conditions « d'équilibre » des variables secondaires (relations entre la source locale des composantes de force et la source spécifiée globalement)
  - c. Assemblage des équations élémentaires dans l'équation globale en utilisant les étapes 3a et 3b.
4. Imposition des conditions aux limites du problème.

- a. Reconnaissance des degrés de liberté primaires, dans le cas de l'équation de Richards il s'agit d'une pression imposée sur les nœuds concernés (condition de Dirichlet) :

$$\psi(z, t) = \psi \quad \text{Éq. 2-44}$$

Ce type de restriction s'impose sur les matrices élémentaires des éléments ayant des nœuds sur une frontière.

- b. Reconnaissance des degrés de liberté secondaires, il s'agit d'un flux imposé (condition de Neumann) :

$$\frac{\partial \psi(z, t)}{\partial z} = q - 1 \quad \text{Éq. 2-45}$$

Si la limite est imperméable alors :  $q = 0$ .

On parle d'une condition mixte ou condition de Cauchy lorsque les deux types de conditions sont imposées. En ajoutant une condition aux limites du type de Neumann, l'équation Éq. 2-41 prend la forme :

$$\mathbf{F}_i = \int_{\Omega} K \frac{d\phi_i}{dz} dz - qN \quad \text{Éq. 2-46}$$

##### 5. Solution de l'équation globale.

Une fois assemblées les matrices élémentaires, et les conditions aux limites imposées, les coefficients dans les équations Éq. 2-39, Éq. 2-40 et Éq. 2-41, sont déterminés et les équations Éq. 2-38 et Éq. 2-42 sont résolus à l'aide d'une procédure numérique telle la méthode de Gauss.

##### 6. Post-traitement des résultats

- a. Calcul des quantités désirées à partir des degrés de liberté primaires calculés dans le pas 5.
- b. Représentation des résultats sous forme des tableaux ou graphiques.

Ces six étapes constituent la procédure générale de la méthode des éléments finis. En effet, pour chaque problème particulier les matrices élémentaires et les conditions aux limites peuvent se

réécrire en fonction des paramètres impliqués dans le problème. Tel est le cas des « logiciels commerciaux » qui adoptent des façons d'exprimer les fonctions pour que ses algorithmes soient plus efficaces et l'aspect du logiciel soit plus versatile pour les utilisateurs.

À ce propos, il est important d'ajouter une description de l'équation considérée par le logiciel SEEP/W (GEOSLOPE, 2020) qui sera utilisé dans la modélisation numérique des cellules. SEEP/W simule le mouvement de l'eau et du gaz à travers des milieux poreux saturés et non saturés. Il permet de simuler l'écoulement en régime permanent ainsi qu'en régime transitoire. L'équation de Richards (Éq. 2-26) est formulée dans le logiciel, en fonction de la pression de pores, de la façon suivante :

$$(\theta_w \beta_w + \beta) \frac{\partial u_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{K_w}{\rho_w g} \right) \frac{\partial u_w}{\partial y} + K_w \frac{\partial y}{\partial y} \right] \quad \text{Éq. 2-47}$$

Où  $\rho_w$  est la densité de l'eau,  $\theta_w$  est le teneur en eau volumique,  $\beta_w$  est la compressibilité isothermique de l'eau ( $4,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$  à  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $u_w$  est la pression de pores,  $\beta$  est la compressibilité du sol. La succion matricielle est définie comme la différence entre la pression de pores due à l'air et celle due à l'eau :  $\psi = u_a - u_w$  et calculée dans le post-traitement des résultats.

Les concepts théoriques qui ont fait l'objet d'un examen au long de ce chapitre permettent de comprendre le problème et la conception expérimentale, d'analyser les résultats suite de l'expérimentation dans les modèles sur le terrain, et la modélisation du problème à l'aide d'un modèle numérique. Le prochain chapitre présente la description du projet de recherche et les méthodes utilisés.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Dans la section 2.2.3 il a été mis en évidence que dans la région de l’Abitibi-Témiscamingue et dans le nord de l’Ontario, les matériaux argileux couvrent de très grandes étendues qui ont été formées par le dépôt de particules de sol au fond des lacs formés à la suite du retrait du glacier qui couvrait le Canada lors de la dernière glaciation. Malgré leur disponibilité, ces matériaux sont peu utilisés dans la restauration des sites miniers en raison des problèmes présentés dans la section 2.2.2, bien que leurs caractéristiques n’aient fait l’objet d’études dans ce sens.

Dans cette perspective, l’étude de Merzouk et al. (2022) a permis de déterminer au laboratoire la conductivité hydraulique saturée des argiles naturelles et amendées avec des matériaux granulaires. Leurs résultats ont montré qu’il est possible d’utiliser ces matériaux comme barrière hydraulique et que des amendements ont permis de minimiser les effets des cycles de gel-dégel. Ainsi, cette étude vise à évaluer, à l’échelle de cellule expérimentale de terrain, l’efficacité des argiles abitibiennes comme barrière hydraulique pour être utilisées dans la restauration des parcs à résidus miniers.

Le projet de recherche utilise une approche expérimentale. La validité des hypothèses de recherche sera évaluée à l’aide de quatre cellules expérimentales simulant différentes configurations de recouvrements à base d’argile. Ces cellules ont été soumises aux conditions météorologiques naturelles et leur comportement suivi au moyen de capteurs permettant de mesurer les teneurs en eau volumiques, les températures et les succion à l’intérieur des cellules. Le débit de sortie des cellules a été suivi à l’aide des débitmètres à bascule. Le suivi des cellules expérimentales a été complété avec des mesures *in situ* de la conductivité hydraulique saturée tout au long de l’année.

Pour éviter toute confusion avec les notations des matériaux et les niveaux d’instrumentation, dans ce chapitre on présente d’abord le plan d’expériences de la recherche et ensuite la caractérisation des matériaux. De cette manière, les matériaux utilisés sont associés et classés en fonction des cellules dans lesquelles ils sont placés.

Dans les sections suivantes on précise la configuration des cellules expérimentales et l'instrumentation installée, ainsi que les essais *in situ* qui ont été réalisés. Étant donné que les cellules sont exposées aux conditions météorologiques naturelles, les données météorologiques de la station Rouyn (N° 7086716, WUY du ministère des Transports), d'Environnement et Changement climatique Canada – Service météorologique du Canada (ECCC - SMC) sont également présentées.

Finalement, la démarche méthodologique est complétée par la construction des modèles numériques des cellules expérimentales. Des modèles numériques simulant les différents types de recouvrements ont été construits et calibrés à l'aide des données récoltées durant le suivi des cellules expérimentales. Les scénarios, les paramètres, les conditions aux limites et d'autres détails de la modélisation sont donnés à la fin du chapitre.

### **3.1 Plan d'expériences**

Dans cette section on commence par présenter la configuration des quatre cellules expérimentales construites sur le site Quémont 2 de la Fonderie Horne. Ensuite, le système de suivi installé pendant la construction des cellules est décrit en détail, par la suite les essais réalisés de façon périodique sur le terrain sont présentés et finalement on présente les données météorologiques nécessaires pour l'analyse des données collectées à l'aide du système de suivi.

#### **3.1.1 Configuration et construction des cellules expérimentales**

Quatre cellules expérimentales simulant différentes configurations de recouvrements à base d'argile ont été construites sur le terrain. La première cellule simule une couverture constituée uniquement de matériaux argileux non amendés, avec une épaisseur de 0,8 m; la deuxième cellule est constituée de matériaux argileux amendés avec des sols sableux, avec une proportion de 5:1 et une épaisseur de 0,6 m; la troisième cellule est constituée de matériaux argileux amendés avec des sols silteux, également avec une proportion de 5:1 et une épaisseur de 0,6 m. La quatrième cellule est composée de deux couches de matériaux argileux non amendés de 0,4 m d'épaisseur avec une couche intermédiaire de sol silteux de 0,4 m d'épaisseur. La configuration détaillée des cellules est présentée à la Figure 3–1 et le Tableau 3-1 résume les volumes des matériaux utilisés.

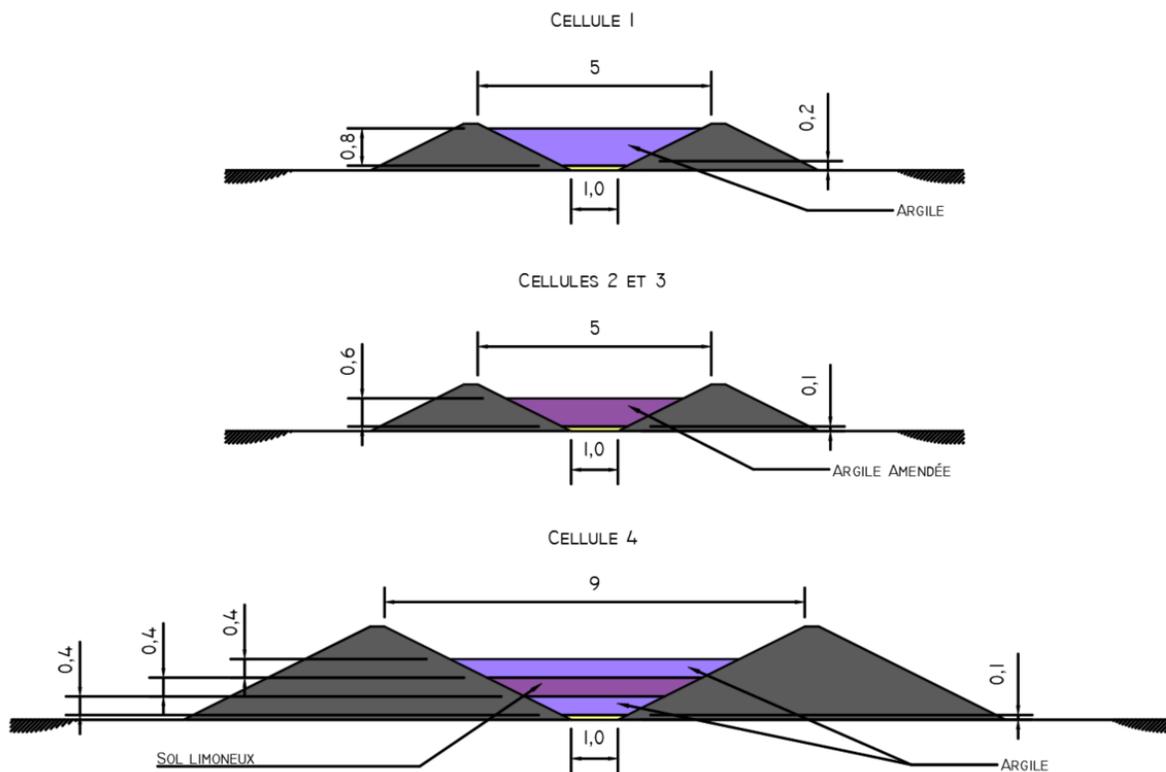


Figure 3-1 Configuration géométrique des cellules expérimentales.

Tableau 3-1 Quantités de matériaux utilisés dans la construction des cellules expérimentales.

Cellule	Volumes (m <sup>3</sup> )		
	Argile	Sable silteux	Sable fin
1	12,9	--	--
2	4,9	0,9	--
3	4,9	--	0,9
4	24,1	11,4	--
<b>Total</b>	<b>46,8</b>	<b>12,3</b>	<b>0,9</b>

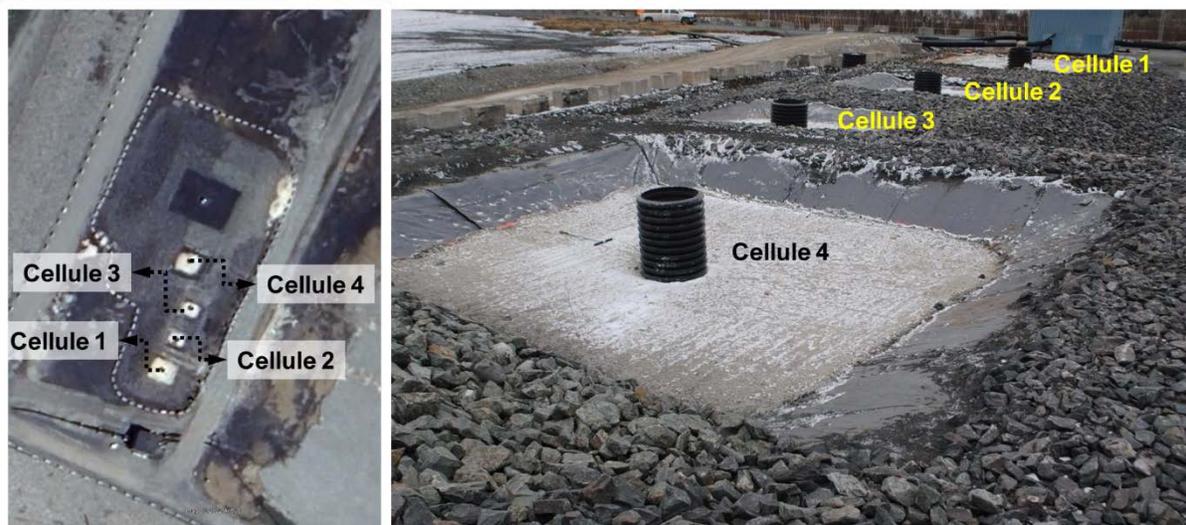


Figure 3–2 Apparence finale des cellules expérimentales. À gauche, imagerie Google Earth. À droite, photographie prise en novembre 2021.

La construction a été faite sur le site Quémont 2 de la Fonderie Horne à Rouyn-Noranda. Le processus de construction (voir Figure 3–3) a compris l’excavation de cellules préexistantes, afin de réutiliser l’enrochement de soutien ; la mise en place et réparation de la géomembrane ; l’installation du drain (composé par un tuyau perforé et un filtre de sable) ; la mise en place des matériaux (dépôt et compactage) en couches de 20 cm d’épaisseur et en même temps, l’installation des stations de mesures. À la fin de la mise en place des matériaux, la finition et l’installation des protections des dataloggers ont été faites, tel que présenté sur la Figure 3–3 et la Figure 3–2.

Tout au long du processus de remplissage des cellules, des échantillons ont été prélevés, tel qu’il sera décrit dans la section 3.2.1. Le contrôle du compactage a été fait à l’aide d’un nucleodensimètre qui a permis de mesurer la densité des couches après le compactage et des cylindres échantillonneurs qui ont été traités ultérieurement, comme cela a été mentionné précédemment.

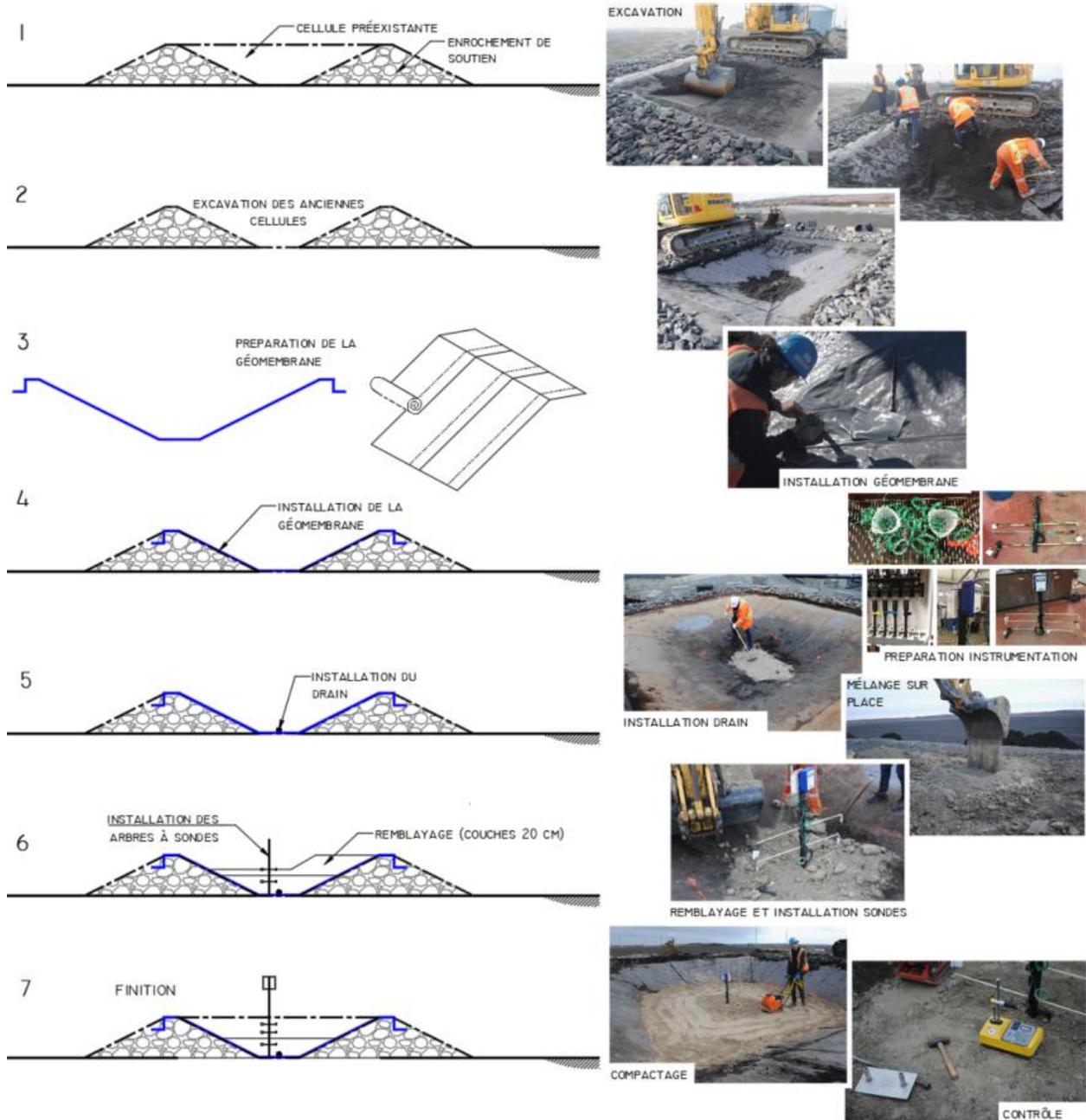


Figure 3–3 Processus de construction des cellules expérimentales.

### 3.1.2 Instrumentation

Chaque cellule expérimentale est équipée d'une station de mesure avec plusieurs niveaux d'instrumentation. Chaque niveau d'instrumentation est équipé d'un capteur pour la mesure de la teneur en eau volumique (Teros 11), d'une thermistance (capteur de température) pour mesurer la

température (Teros 11), d'un capteur pour mesurer les succions (Watermark) ainsi que d'un capteur pour les mesures des concentrations d'oxygène (Apogee). Ces capteurs sont connectés à des data loggers permettant d'enregistrer les données en continu. La Figure 3-4 montre la disposition des niveaux d'instrumentation dans chaque cellule, la Figure 3-5 montre une station de mesure typique avec ses composants, et le Tableau 3-2 présente le nombre d'instruments installé.

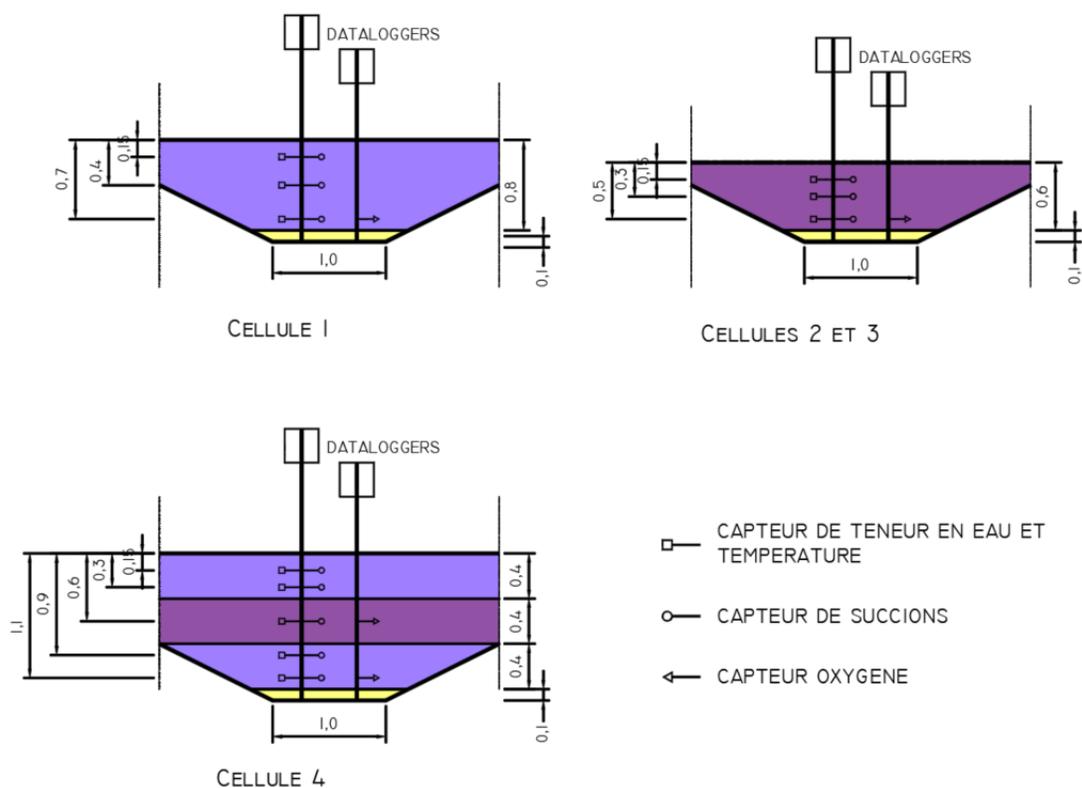


Figure 3-4 Système de suivi des cellules expérimentales.

Tableau 3-2 Nombre d'instruments installés dans les cellules expérimentales.

Item	Cellules 1, 2 et 3	Cellule 4	TOTAL
Capteur teneur en eau et température (TEROS 11)	9	5	14
Capteur de succion (WATERMARK)	9	5	14
Capteur d'oxygène (APOGEE SO 110)	3	2	5
Data logger (METER ZL6)	3	1	4
Data logger (IRROMETER 900M-O)	3	1	4
Datalogger (HOBO UX120)	3	1	4

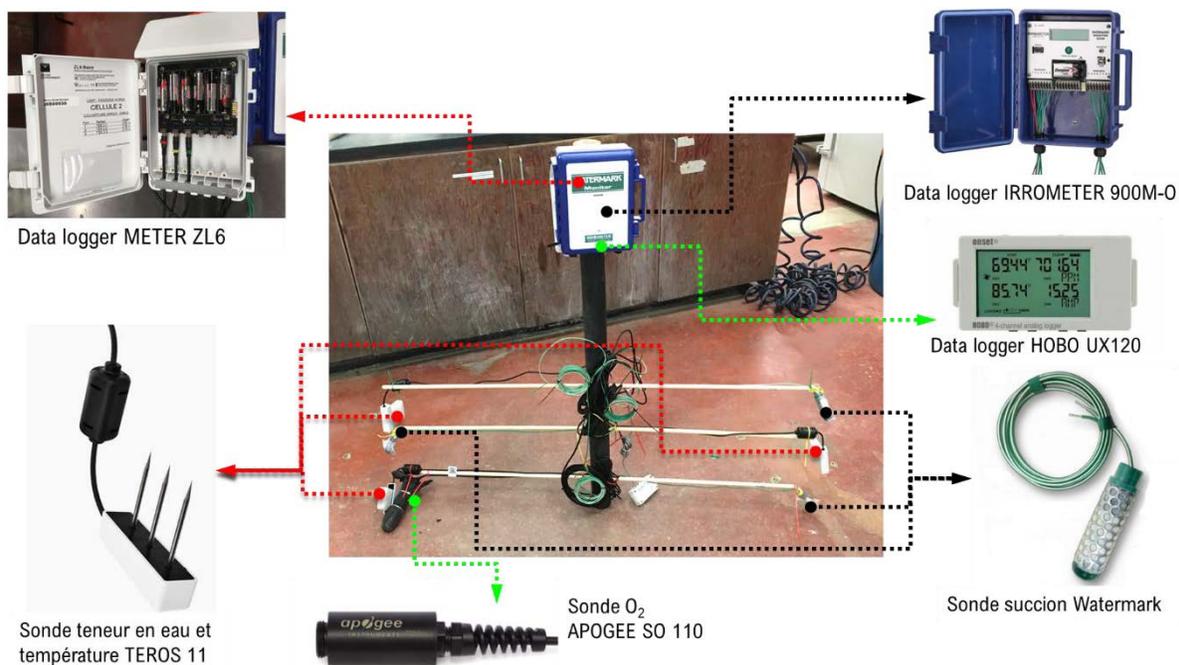


Figure 3–5 Composants de la station de suivi qui a été installée dans la cellule 1.

### 3.1.3 Essais sur le terrain

Le système de suivi est complété par des essais de conductivité hydraulique saturée (à l'aide d'un perméamètre de Guelph) qui seront réalisés périodiquement et des mesures de débit à la base des cellules au moyen des débitmètres à bascule, chaque débitmètre est connecté à un datalogger afin d'enregistrer les débits de sortie en continu. En bref, un capteur mesure le nombre de basculements que fait le godet du débitmètre ; lorsque le volume du godet est connu (500 ml), dans le traitement de données le nombre de bascules est transformé en débit en faisant le cumul sur une certaine période de temps (horaire, journalière). Les dispositifs utilisés dans ces tâches sont présentés dans la Figure 3–6. Ce système de suivi permettra d'évaluer l'évolution des paramètres hydrogéologiques (conductivité hydraulique saturée, CRE, débit de sortie) en fonction du temps et comparer les paramètres mesurés sur le terrain avec ceux du laboratoire.

Tableau 3-3 Dates de réalisation des essais de conductivité hydraulique sur le terrain.

Essai	Date	Session
1	04 novembre 2021	Automne 2021

Essai	Date	Session
2	16 juin 2022	Printemps 2022
3	04 août 2022	Été 2022
4	24 octobre 2022	Automne 2022



Figure 3–6 Assemblage du perméamètre de Guelph pour la mesure de la conductivité hydraulique in situ. Installation des débitmètres à la base des cellules.

Les débitmètres ont été installés au début de l'été, le 30 juin de 2022 et ont servi à faire le suivi durant l'été et l'automne, jusqu'au 15 novembre. Les essais de conductivité hydraulique saturée in situ ont été réalisés lors des périodes indiquées dans le Tableau 3-3. Les données récoltées et leur analyse sont présentées dans le chapitre présentant les résultats.

### 3.1.4 Données météorologiques

Le climat de l'Abitibi-Témiscamingue est classé comme Dfb : un climat continental, froid et humide (sans saison sèche), selon la classification de Köppen-Geiger (Ministère de l'Environnement, 2012). Il est amplement déterminé par sa position nordique, où des interactions entre les masses d'air polaire et tropical peuvent se produire. La température annuelle moyenne

pour la région est de 2.1 °C pour la période 1981 à 2010, avec une valeur maximale historique de 34,5 °C (mesurée en 1984) et minimal historique de -49,5 °C (mesurée en 1995), d'autres indices de température sont donnés dans le Tableau 3-4.

D'autre part, l'Abitibi-Témiscamingue est une région avec une pluviosité importante, les précipitations annuelles moyennes sont de 915 mm pour la période 1981 à 2010, dont presque 75% sont sous forme de précipitations liquides; ainsi, dans cette région il pleut en moyenne 157 jours par année. Les autres indices permettant de décrire le climat de l'Abitibi-Témiscamingue sont présentés dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 Synthèse des données climatiques pour l'Abitibi-Témiscamingue. Ouranos (2022) et Canada (2022).

Variables et indices climatiques		Normales 1981-2010	Observé 2021-2022
<b>Température</b>	Moyenne annuelle des températures (°C)	2,1	3,0
	Moyenne hivernale des températures (°C)	-13,9	-14,9
	Moyenne printanière des températures (°C)	1,4	7,5
	Moyenne estivale des températures (°C)	16,3	16,6
	Moyenne automnale des températures (°C)	4,2	3,9 <sup>†</sup> - 0,8 <sup>††</sup>
	Nombre annuel de jours >30°C (jours)	4	0
<b>Gel</b>	Nombre annuel d'événements de gel-dégel	88	66
	Nombre d'événements gel-dégel en hiver	12	7
	Nombre d'événements gel-dégel au printemps	43	32
	Nombre d'événements gel-dégel en automne	32	15 <sup>†</sup> - 23 <sup>††</sup>
	Nombre de jours > 0°C (jours)	166	194
	Nombre de jours < -25 °C (jours)	30	27
<b>Précipitations</b>	Total annuel des précipitations totales (mm)	915	1066
	Total hivernal des précipitations totales (mm)	168	181
	Total printanier des précipitations totales (mm)	188	335
	Total estival des précipitations totales (mm)	295	353
	Total automnal des précipitations totales (mm)	265	208 <sup>†</sup> - 165 <sup>††</sup>
	Total annuel des précipitations solides (mm)	242	248
	Total hivernal des précipitations solides (mm)	150	177
	Total printanier des précipitations solides (mm)	49	4
Total automnal des précipitations solides (mm)	42	34 <sup>†</sup> - 74 <sup>††</sup>	

Variables et indices climatiques		Normales 1981-2010	Observé 2021-2022
	Total annuel des précipitations liquides (mm)	675	953
	Total hivernal des précipitations liquides (mm)	19	4
	Total printanier des précipitations liquides (mm)	138	331
	Total estival des précipitations liquides (mm)	294	353
	Total automnal des précipitations liquides (mm)	222	174 <sup>†</sup> - 91 <sup>††</sup>
	Maximum annuel des précipitations cumulées sur cinq jours (mm)	61	82
	Jours de précipitations $\geq 1$ mm*	157	167
	Précipitation maximale moyenne durant 1 jour* (mm)	36	56
	Nombre maximal de jours secs consécutifs*	14	13
	Nombre de périodes de plus de 5 jours secs consécutifs*	9	9

\*Source de données: Environnement et Changement climatique et DonnéesClimatiques.ca (Canada, 2022)

<sup>†</sup>Automne 2022, <sup>††</sup>Automne 2021.

Le Tableau 3-4 présente aussi les indices climatiques calculés à partir des données mesurées à la station météorologique de Rouyn entre le 1<sup>er</sup> octobre 2021 et le 30 novembre 2022. La station de Rouyn est identifiée avec l’ID N° 7086716 (WUY du Ministère des Transports du Québec) et opérée par Environnement et Changement climatique Canada – Service météorologique du Canada (ECCC - SMC); elle est localisée à Rouyn-Noranda, au sommet de la colline du parc Chadbourne (48°14'45" N, 79°02'03" O et 318 m snm) à 4 km au sud-ouest du site d’emplacement des cellules expérimentales. Les données ont été extraites du site Web « Données climatiques historiques » d’Environnement et Changement climatique Canada ([https://climat.meteo.gc.ca/index\\_f.html](https://climat.meteo.gc.ca/index_f.html)) le 3 décembre 2022 et ensuite traitées dans le cadre de la présente recherche. Afin d’évaluer si les températures sur le site sont influencées par le vent qui souffle entre les deux lacs, un capteur de température additionnel a été installé au niveau de la cellule 2, au niveau des dataloggers. Les données du capteur seront comparées avec les données de la station.

Étant donné que la période observée inclut plus d’un an d’observations (425 jours), les variables climatiques cumulées ont été calculées pour l’ensemble des données et normalisées à une période de 365 jours. D’après le Tableau 3-4, la température moyenne pour la période observée est de 3,0 °C, soit 40% plus élevée que pour la période de référence; l’augmentation de la température est surtout importante dans la saison printanière, où l’on a observé une température moyenne de 7,4

°C tandis que pour la période de référence elle est de 1,4 °C. Le nombre de jours avec une température minimale supérieure à 0 °C, 194 jours (2021-2022), est aussi plus élevé que la moyenne, 166 (1981-2010) soit un 17% de plus. En revanche, pendant l'année observée, il n'y a pas eu de jours avec une température maximale supérieure à 30 °C contrairement à la moyenne de référence qui est de 4 jours.

Par rapport aux cycles de gel-dégel, l'année observée a compté moins de cycles que la moyenne de référence (66 contre 88), c'est-à-dire une diminution de 25%. Dans le cas des précipitations, l'année 2021-2022 a enregistré 1066 mm des précipitations totales, c'est-à-dire 17% de plus par rapport à la période de référence. On constate que les précipitations solides sont proches de la moyenne (248 contre 242 mm équivalents) et donc l'augmentation est due aux précipitations liquides qui passent de 675 à 953 mm, c'est-à-dire une augmentation de 41% par rapport à la période de référence (1980-2010). À nouveau, la différence est plus importante durant le printemps, avec 140% de plus dans la période 2021-2022. D'autres indices de précipitation sont aussi plus grands que la moyenne de référence : le nombre de jours avec précipitations (167 contre 157) et la précipitation maximale moyenne durant 1 jour (56 mm contre 36 mm). Finalement, le nombre maximal de jours secs consécutifs et le nombre de périodes de plus de 5 jours secs consécutifs, sont proches aux valeurs moyennes.

En résumé, l'année observée a été plus chaude et plus humide que la moyenne des années de référence décrivant les conditions climatiques de la région; les cycles de gel-dégel ont été moins fréquents et les intervalles de sécheresse ont été similaires aux conditions moyennes. La Figure 3–7 montre la distribution des températures et la Figure 3–8 celle des précipitations journalières durant l'année 2021-2022.

Afin de calculer le bilan hydrique avec l'outil Land Climate Interaction (interaction sol-climat), LCI, du logiciel SEEP/W (voir section 3.3), en plus des données de température et précipitation, il est nécessaire de connaître les valeurs d'humidité relative (Figure 3–9), de vitesse du vent (Figure 3–10), et de radiation solaire (Figure 3–11). Ces données seront utilisées dans le chapitre résultats pour les simulations numériques du comportement des recouvrements qui sera comparé aux

mesures réalisées sur le site. Dans la section 3.3, la méthode utilisée et la manière qu'elle est considérée dans le logiciel sont présentées.

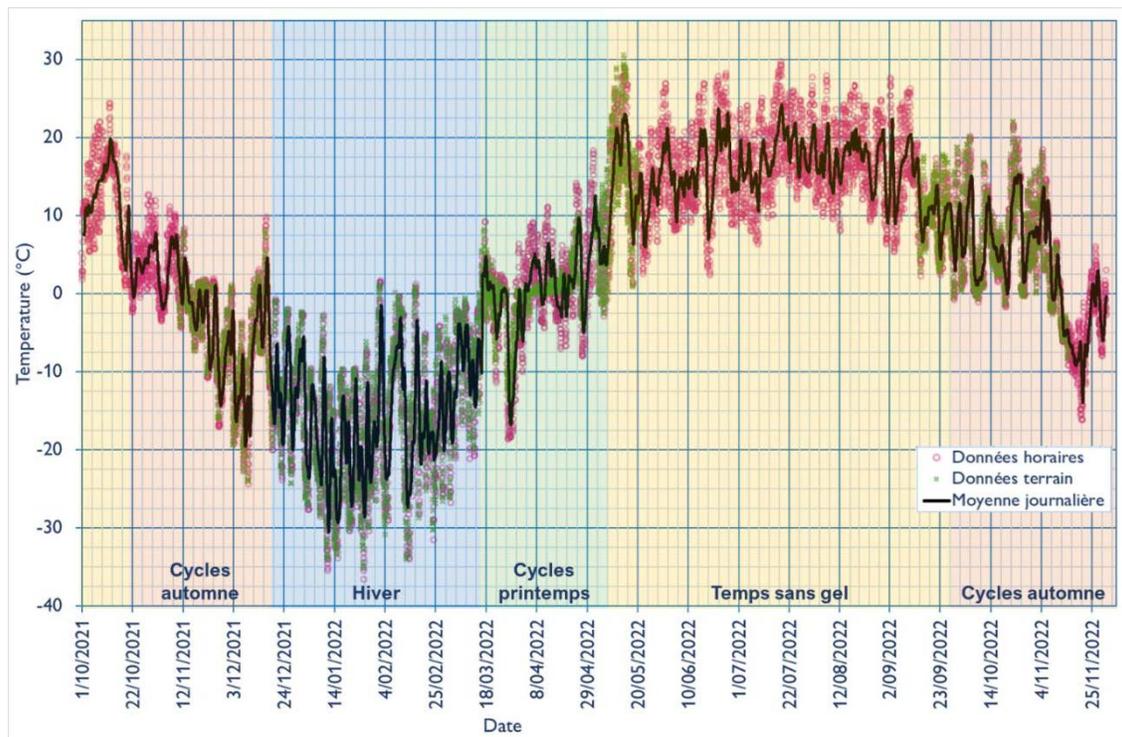


Figure 3–7 Chroniques des températures pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022).

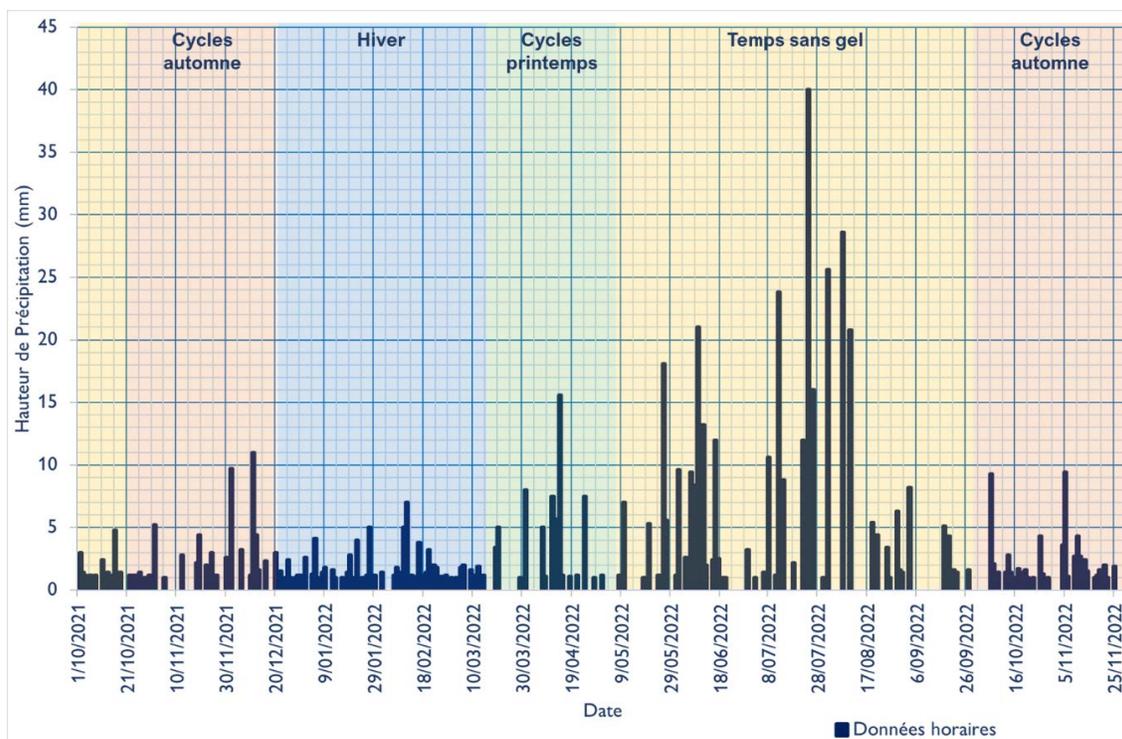


Figure 3–8 Précipitations horaires pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022).

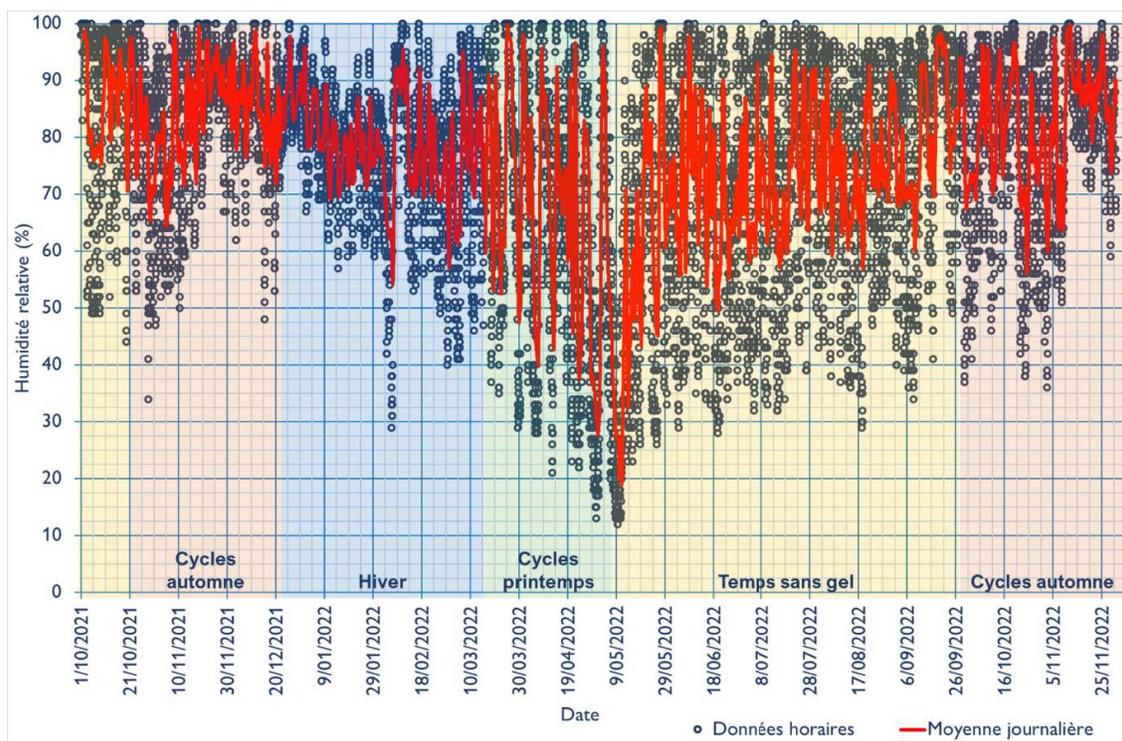


Figure 3–9 Variation de l'humidité relative horaire pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022).

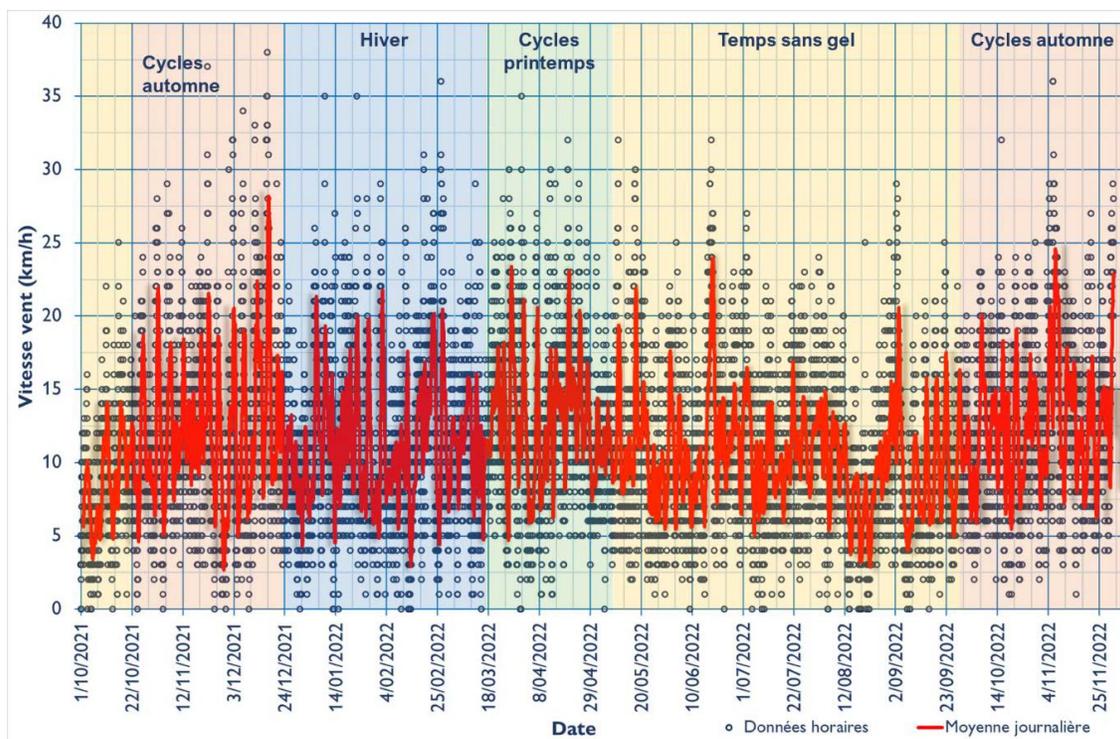


Figure 3-10 Vitesse du vent pour la période observée 2021-2022 (Canada, 2022).

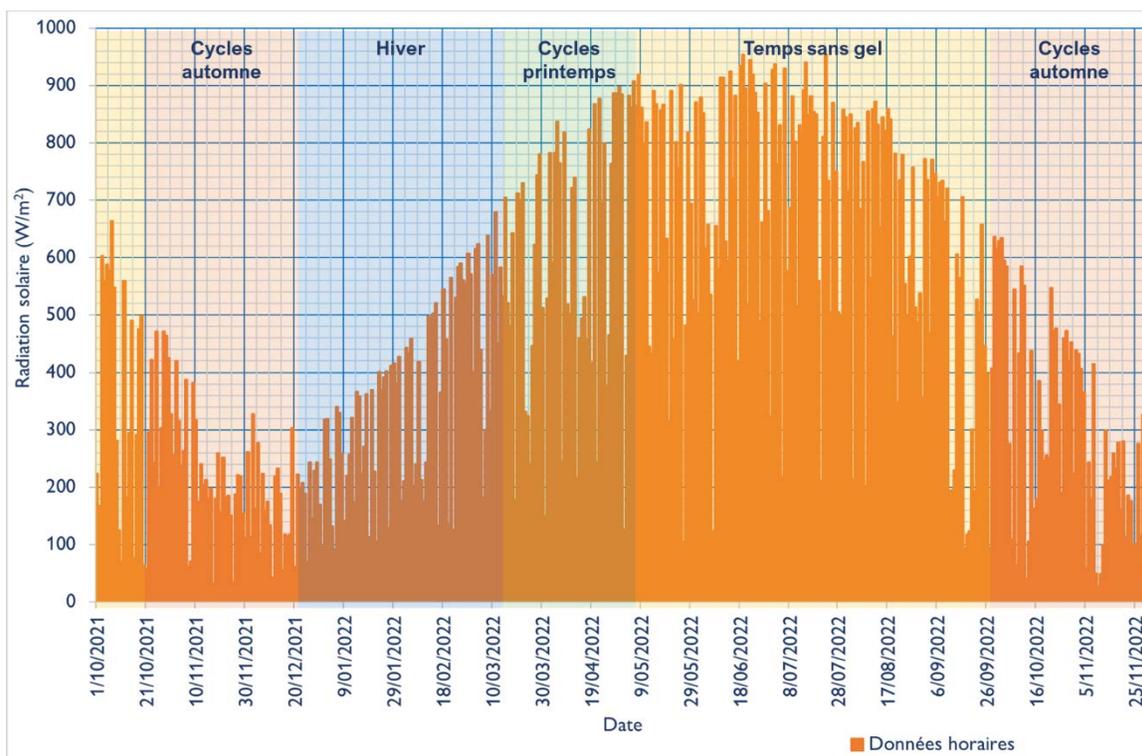


Figure 3-11 Radiation solaire journalière pour la période observée 2021-2022 (Solutions-Mesonet, 2023).

À partir des dates de début des saisons et les données de température enregistrées par la station météorologique de Rouyn, des intervalles d'analyse qui servent à décrire et à étudier la réponse des matériaux déposés dans les cellules expérimentales face aux conditions météorologiques ont été définis. Ces intervalles sont présentés dans le Tableau 3-5. En général, on distingue une période hivernale, qui sert à l'analyse de la réponse des recouvrements aux températures; des périodes (printemps et automne) qui permettent observer les cycles de gel-dégel; et les temps ordinaires de printemps, été et automne où l'on observe des cycles de mouillage-séchage en permettant d'analyser ce phénomène.

Tableau 3-5 Définition des intervalles d'analyse pour l'interprétation des résultats.

Saison	Intervalle d'analyse	Date début
<b>Automne 2021</b>	Temps d'automne	22/09/2021
	Cycles gel-dégel automne	21/10/2021
<b>Hiver 2022</b>	Temps hivernal	21/12/2021
	Cycles gel-dégel printemps	16/03/2022
<b>Printemps 2022</b>		20/03/2022
		8/05/2022
<b>Été 2022</b>	Temps sans gel (printemps, été, automne)	21/06/2022
		23/09/2022
<b>Automne 2022</b>	Cycles gel-dégel automne	29/09/2022

### 3.2 Caractérisation des matériaux

Cette section présente les méthodes utilisées dans les caractérisations des matériaux à l'étude. Étant donné que le présent travail est centré sur les recouvrements à base d'argile, les matériaux utilisés dans l'expérimentation incluent les argiles de l'Abitibi (provenant d'un ancien site minier à proximité de Rouyn-Noranda) et des matériaux granulaires (sable et silt) utilisés dans l'amendement des argiles. La Figure 3-12 résume les essais de caractérisation des matériaux.

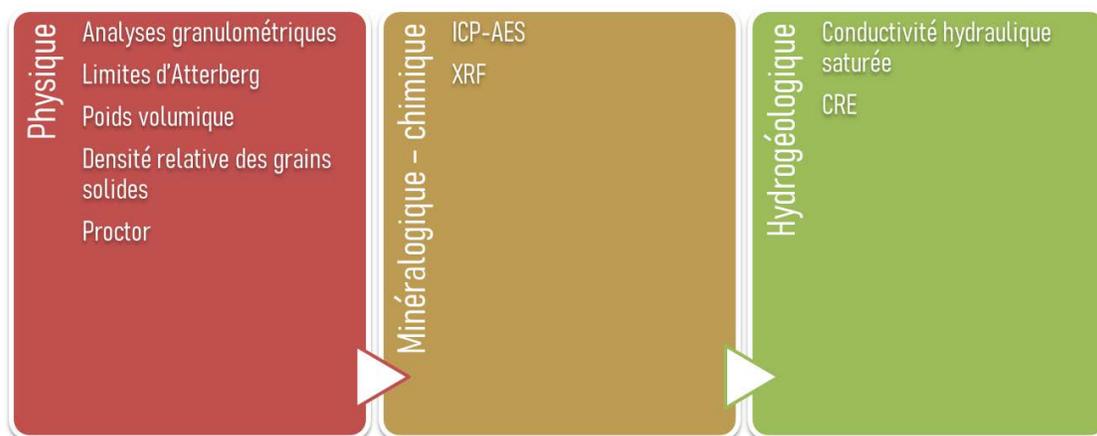


Figure 3–12 Essais de laboratoire pour la caractérisation des matériaux.

### 3.2.1 Échantillonnage et préparation des matériaux

L'échantillonnage a été fait en deux étapes : un échantillonnage initial afin d'identifier les matériaux et valider leur propriétés selon les critères présentés dans la section 2.2.1 et le Tableau 2-1 ; et l'échantillonnage principal, fait pendant la mise en place des cellules expérimentales avec l'objectif de faire le contrôle de qualité des matériaux utilisés et leur caractérisation détaillée.

Tableau 3-6 Échantillonnage initial des matériaux cibles.

Échantillon	Matériau	Site	Latitude	Longitude	Masse (kg)
1	Sable fin	Entrepôt Fonderie Horne	--	--	81,5
2	Argile	Noranda 3	48,235	-79,082	94,6
3	Sable grossier	Sablière Agrégat	48,361	-79,130	88,9
4	Silt 1	Sablière Agrégat	48,362	-79,144	47,8
5	Silt 2	Sablière Agrégat	48,362	-79,144	28,9

L'échantillonnage initial des matériaux a été réalisé au niveau d'une sablière (utilisée comme source d'agrégats), localisée au nord du lac Duprat (point 195 sur la Figure 3–13), et au niveau du site Noranda 3 localisé entre le boulevard Témiscamingue et le Boulevard Rideau à Rouyn-Noranda (voir point 193 sur la Figure 3–13). Le Tableau 3-6 résume les échantillons prélevés dans cette étape. D'après Rompré et Carrier (1997) dans la zone des prélèvements des matériaux argileux (Carte pédologique 32D03202), on y trouve des sols argileux du type *argiles et argiles limoneuses* : Ls-a (La Sarre à texture argileuse), Be (Bellecombe argile loameuse), Ld (Landrienne

argile à argile limoneuse) et Ce (Cléricy argile à argile limoneuse). Les noms des dépôts correspondent aux localités où les caractéristiques typiques ont été décrites.



Figure 3–13 Localisation des points de prélèvement des échantillons (Modifiée à partir de l'imagerie de Google Earth)

L'échantillonnage principal a été réalisé lors de la construction des cellules expérimentales. Deux types d'échantillons (voir la Figure 3–14) ont été prélevés pendant cette étape : des échantillons à grand volume (d'au moins 25 kg), pris lors de la mise en place des matériaux, et des échantillons à l'aide du cylindre échantillonneur à volume connu, prélevés après le compactage des couches. Ces derniers ont été utilisés pour évaluer la densité et la teneur en eau pendant la construction des cellules expérimentales. Sur les échantillons à grand volume, des caractérisations plus approfondies ont été réalisées. Le Tableau 3-7 présente les échantillons pris pendant la construction des cellules.



Figure 3-14 Types d'échantillon prélevés lors de la mise en place des cellules. À gauche les échantillons à grand volume et à droite les échantillons du cylindre échantillonneur.

Tableau 3-7 Échantillonnage principal pendant la mise en place.

Échantillon	Matériau	Type	Cellule	Couche	Masse (kg)
C1 – E1	Argile	Chaudière	1	2	25
C1 – E2	Argile	Chaudière	1	4	25
C2 – E1	Mélange	Chaudière	2	2	25
C2 – E2	Mélange	Chaudière	2	3	25
C2 – E3	Sable	Chaudière	2	Pile	25
C3 – E1	Mélange	Chaudière	3	2	25
C3 – E2	Mélange	Chaudière	3	3	25
C4 – E1	Argile	Chaudière	4	1	25
C4 – E2	Sable	Chaudière	4	3	25
C1 – A1	Argile	Cylindre	1	4	0,198
C2 – A1	Mélange	Cylindre	2	2	0,198
C2 – A2	Mélange	Cylindre	2	3	0,218
C3 – A1	Mélange	Cylindre	3	2	0,198
C3 – A2	Mélange	Cylindre	3	3	0,196
C4 – A1	Argile	Cylindre	4	2	0,182
C4 – A2	Sable	Cylindre	4	4	0,171
C4 – A3	Argile	Cylindre	4	5	0,194
C4 – A3D	Argile	Cylindre	4	5	0,187
C4 – A4	Argile	Cylindre	4	6	0,156

### 3.2.2 Caractérisation physique et classification des sols

La caractérisation géotechnique de base portait sur les essais de granulométrie, de limites d'Atterberg, de densité relative des grains et de l'essai Proctor. Le Tableau 3-8 présente les essais de laboratoire ainsi que les normes suivies pour compléter la caractérisation géotechnique de base des échantillons récoltés à l'étape préliminaire et lors de la mise en place.

Tableau 3-8 Liste d'essais de la caractérisation géotechnique de base.

Essai	Normes
Analyse granulométrique	ASTM C136-06, ASTM UOP856-07, NQ 2501-025
Détermination des limites d'Atterberg	ASTM D4318, BNQ 2501-090
Détermination de la limite de liquidité (Cône suédois)	BNQ 2501-092
Classification des sols	ASTM D 2487, ASTM D3282, Q-2, r.22, CNRC-NRC 42259
Densité relative (Pycnomètre à Hélium)	ASTM D5550-14
Essai Proctor	ASTM D1557-12, BNQ 2501-255

#### *Phase préliminaire*

Les deux phases (préliminaire et principal) de la caractérisation des matériaux se sont basées sur les mêmes types d'essai (voir le Tableau 3-8). Ensuite, on présente les résultats de la caractérisation des matériaux prélevés lors de la phase préliminaire d'échantillonnage (Tableau 3-6).

#### ▲ Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été faite au moyen d'un équipement de diffraction laser permettant de mesurer la taille des particules (ASTM, 2008). Pour les échantillons avec une taille maximale des particules au-dessus de 1500  $\mu m$  l'essai a été fait en utilisant des tamis afin de séparer la fraction grossière. Ensuite, la fraction fine est analysée à l'aide du diffractomètre laser. Le diffractomètre laser permet de mesurer la distribution granulométrique des particules en mesurant la variation angulaire d'un rayon laser qui traverse un liquide (généralement de l'eau) avec des particules en suspension. Lorsqu'un rayon laser illumine une particule, il est possible d'observer des bandes de diffraction. L'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont

fonction de la taille des particules; les grandes particules diffusent le rayon laser à des faibles angles tandis que les particules plus fines le diffusent aux grands angles. Les données prises par le diffractomètre sont ensuite analysées pour calculer la distribution granulométrique de l'échantillon.

Dans chaque essai, on prend plusieurs mesures (au moins 5) afin d'assurer une bonne dispersion de l'échantillon dans l'eau. On prend des lectures jusqu'à avoir des résultats similaires entre les mesures consécutives, c'est-à-dire une différence de l'ordre du 5% entre mesures. Par la suite, les mesures retenues sont utilisées dans le calcul des moyennes et l'analyse de l'essai. La Figure 3-15 présente les courbes granulométriques moyennes des matériaux caractérisés à la phase initiale et le Tableau 3-9 résume les résultats de l'analyse granulométrique, c'est-à-dire les fractions de sable (< 5 mm), silt (< 75  $\mu\text{m}$ ) et argile (< 2  $\mu\text{m}$ ); les diamètres effectifs ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ ) et les coefficients d'uniformité ( $C_U$ ) et de courbure ( $C_C$ ).

Tableau 3-9 Analyse granulométrique des sols (Phase initiale)

<b>Échantillon</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>% Argile</b>	0,8	25	0,0	0,05	1,5
<b>% Silt</b>	10,2	75	1,7	3,25	47,5
<b>% Sable</b>	89	0	98,3	96,7	51
<b><math>D_{10}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	84,0	1,0	165,2	118,1	24,7
<b><math>D_{30}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	158,6	2,3	303,4	180,0	55,0
<b><math>D_{60}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	261,0	6,0	1395,3	274,2	98,6
<b><math>C_U</math></b>	3,1	6,3	8,4	2,3	4,0
<b><math>C_C</math></b>	1,1	0,9	0,4	1,0	1,2

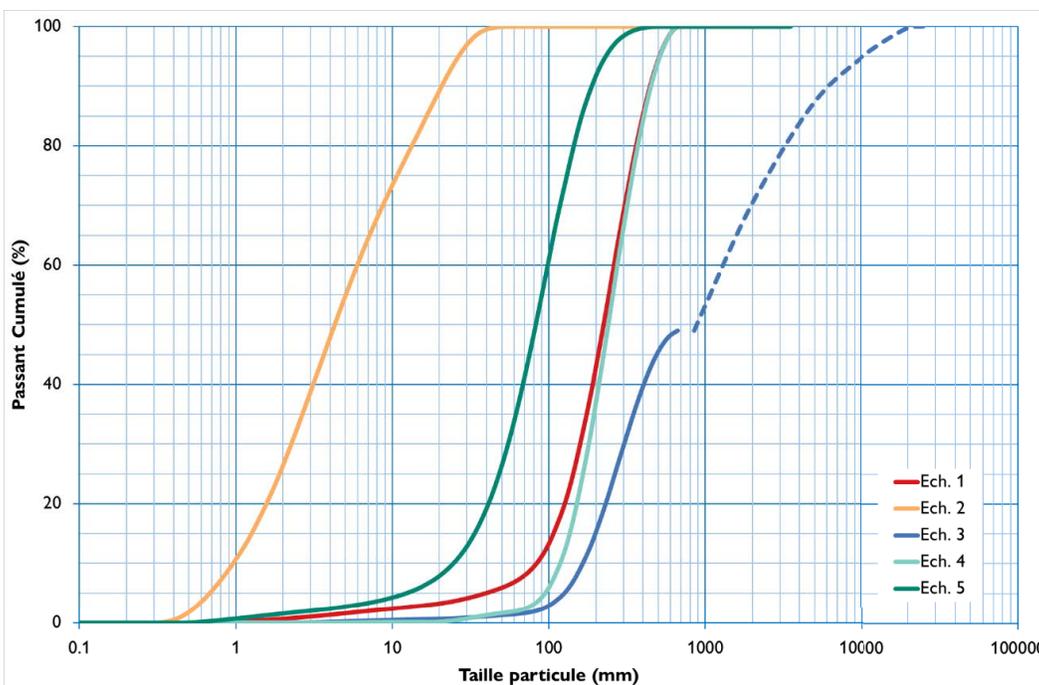


Figure 3–15 Courbe granulométrique (Phase initiale). La partie pointée de l'échantillon 3 correspond à la granulométrie réalisée au moyen des tamis.

Les résultats des analyses granulométriques (Tableau 3-9 et Figure 3–15) montrent des pourcentages de la fraction argileuse entre 0 et 1,5% dans les matériaux granulaires et de 25% dans l'échantillon 2 (Argile). La fraction de sable de l'échantillon 2 est de 0% tandis que dans les matériaux granulaires varie entre 51 et 98%. Par rapport à l'uniformité, les échantillons 1, 4 et 5 ont une granulométrie serrée et les échantillons 2 et 3 semi-étalée. Finalement, tous les échantillons ont une granulométrie mal graduée, c'est-à-dire que les échantillons ont une taille de particules assez uniforme.

#### ▲ Limites d'Atterberg

En ce qui concerne les limites d'Atterberg, les mesures de la limite de liquidité et la limite de plasticité ont été réalisés pour les matériaux ayant une proportion fine plus grande que 30%, c'est-à-dire pour les échantillons 2 et 5. L'essai a été réalisé à l'aide de l'appareil de Casagrande (limite de liquidité) et la méthode du rouleau de 3 mm (ASTM, 2017) pour la limite de plasticité. Les essais sur l'échantillon 5 n'ont pas donné de résultats (c.-à-d. sol non plastique) malgré la taille « fine » des particules de ce matériau. Les résultats des mesures pour l'argile sont présentés dans

le Tableau 3-10 qui montrent qu'il s'agit d'un sol à faible plasticité. Finalement, l'activité des argiles montre une activité électrochimique moyenne dans ce matériau.

Tableau 3-10 Limites d'Atterberg (Phase initiale)

Échantillon	Limite de plasticité	Limite de liquidité	Indice de plasticité	Activité
2	18	36	18	1,39

#### ▲ Classification des sols

À partir des données de l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg, les sols échantillonnés ont été classifiés selon le système unifié (ASTM, 2020), AASHTO (ASTM, 2016a), le système canadien de classification des sols (CEPP, 1998) et le Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées (Québec, 2022). Le Tableau 3-11 résume le résultat des différents systèmes de classification. En résumé, les échantillons 1, 3 et 4 ont été classifiés comme un sable mal gradué (SP), l'échantillon 2 comme une argile de faible plasticité (CL) et l'échantillon 5 comme un sable silteux (SM).

Tableau 3-11 Classification des sols. Phase initiale.

Échantillon	USCS	AASHTO	Système canadien	Règlement eaux usées
1	SP – SC <i>Sable mal gradué -sable argileux</i>	A-3 <i>Sable fin</i>	S <i>Sable</i>	Sable
2	CL <i>Argile de faible plasticité</i>	A-6 <i>Sol argileux</i>	L-Li <i>Loam silteux</i>	Silt
3	SP <i>Sable mal gradué</i>	A-1 <i>Sable</i>	S <i>Sable</i>	Sable
4	SP <i>Sable mal gradué</i>	A-3 <i>Sable fin</i>	S <i>Sable</i>	Sable
5	SM <i>Sable silteux</i>	A-4 <i>Sol silteux</i>	L-S <i>Loam sablonneux</i>	Silt sablonneux

La Figure 3–16 montre les classifications triangulaires du Système canadien de classification des sols et le Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées. On peut y voir que les échantillons 1, 3 et 4 ont été classifiés comme un sable, l'échantillon 2 comme un loam silteux ou un silt et l'échantillon 5 comme un loam sablonneux ou un silt sablonneux. La Figure 3–17 montre la carte de plasticité utilisée pour la classification de l'argile avec le système

unifié et le diagramme d'activité des argiles afin d'évaluer leur susceptibilité face aux changements volumiques. La plasticité mesurée permet de classifier l'échantillon comme une argile à faible plasticité et qu'il a une activité moyenne.

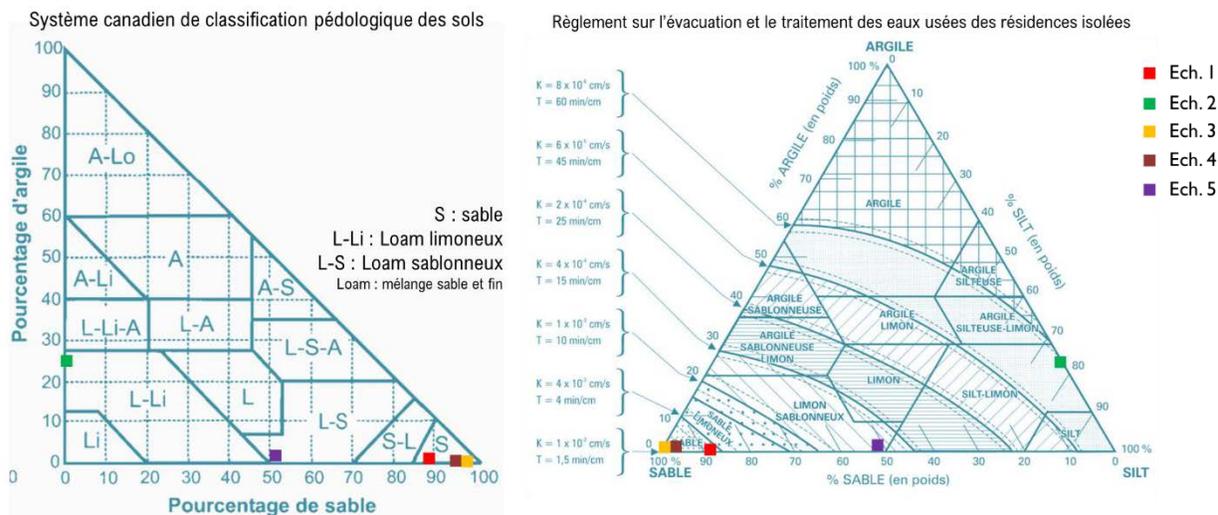


Figure 3–16 Classification triangulaire du système canadien (gauche) et le règlement des eaux usées de Québec (droite) (Phase initiale). Modifié à partir de CEPP (1998) et Québec (2022).

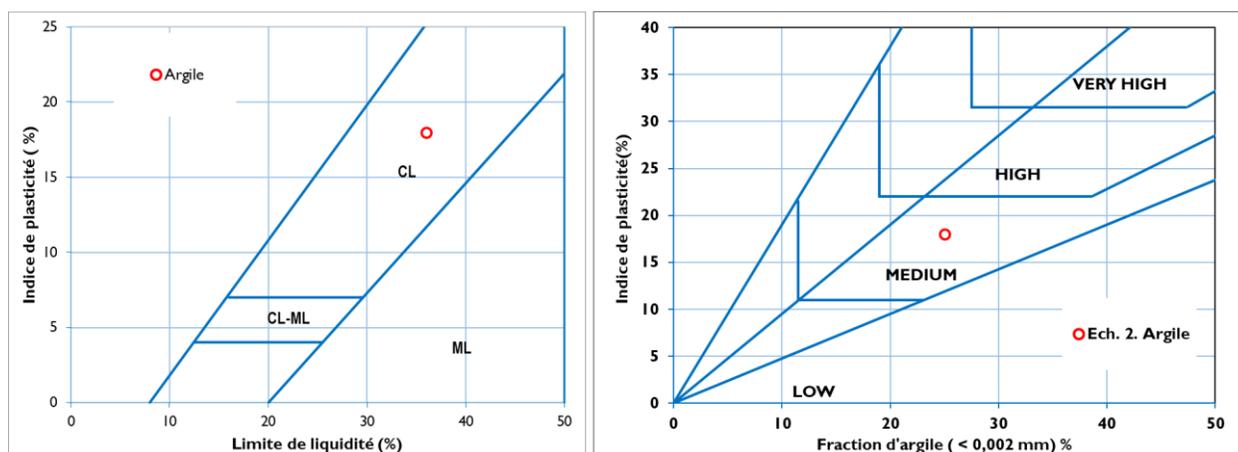


Figure 3–17 Carte de plasticité (gauche) et d'activité (droite) (Phase initiale)

### ▲ Densité relative

La densité relative a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à hélium (ASTM, 2016c). Le principe est de mesurer le changement de pression dans la chambre du pycnomètre une fois que le gaz est injecté dans la cellule de mesure contenant l'échantillon. L'hélium est un élément pouvant pénétrer

dans tous les pores et tous les vides. Le volume réellement occupé par le solide peut alors être déterminé à partir du changement de pression, et finalement le calcul de la densité relative est fait. Pour cela, l'échantillon est placé dans la cellule de mesure qui a été préalablement tarée, en mesurant la masse de l'échantillon. Ensuite, la cellule avec l'échantillon est placée dans le pycnomètre et le couvercle est fermé. On active le pycnomètre afin d'injecter le gaz et de mesurer le volume de l'échantillon, puis de calculer la masse volumique des grains solides et la densité relative.

Le Tableau 3-12 présente les valeurs mesurées avec cette méthode; avec une valeur de 2,61 pour l'argile (échantillon 2), tandis que pour les matériaux granulaires (échantillons 1, 3, 4 et 5) la densité relative varie entre 2,68 et 2,73.

Tableau 3-12 Densité relative des matériaux (Phase initiale).

Échantillon	$G_s$
1	2.71
2	2.61
3	2.73
4	2.70
5	2.68

#### ▲ Essai Proctor

Une série d'essais Proctor (ASTM, 2021) a été réalisée sur les échantillons afin d'établir les conditions optimales de teneur en eau et densité de compactage. L'essai consiste à mesurer la masse volumique sèche d'un échantillon placé et compacté dans un moule de volume connu. Le compactage est fait avec un marteau ayant une masse normalisée (2,49 kg) et une hauteur de chute contrôlée (305 mm). L'essai est répété plusieurs fois en faisant varier la teneur en eau de l'échantillon, ce qui permet tracer une courbe de compactage (Figure 3–18) et de déterminer la masse volumique sèche optimale ( $\rho_{d,opt}$ ) et la teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ ). Les valeurs optimales obtenues à partir des courbes de compactage sont résumées dans le Tableau 3-13. Les valeurs de l'indice des vides ( $e$ ) et porosité ( $n$ ) ont été calculées à partir des relations entre les caractéristiques physiques des sols à partir de la masse volumique sèche optimale et la densité relative des sols.

Tableau 3-13 Masse volumique sèche et teneur en eau optimales obtenues à partir de l'essai Proctor.

Échantillon	$\rho_{d, opt}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	$e_{\rho opt}$	$n_{\rho opt}$
1	1,76	15,3	0,54	0,35
2	1,75	3,6	0,49	0,33
4	1,63	16,8	0,66	0,40
5	1,70	11,3	0,58	0,37

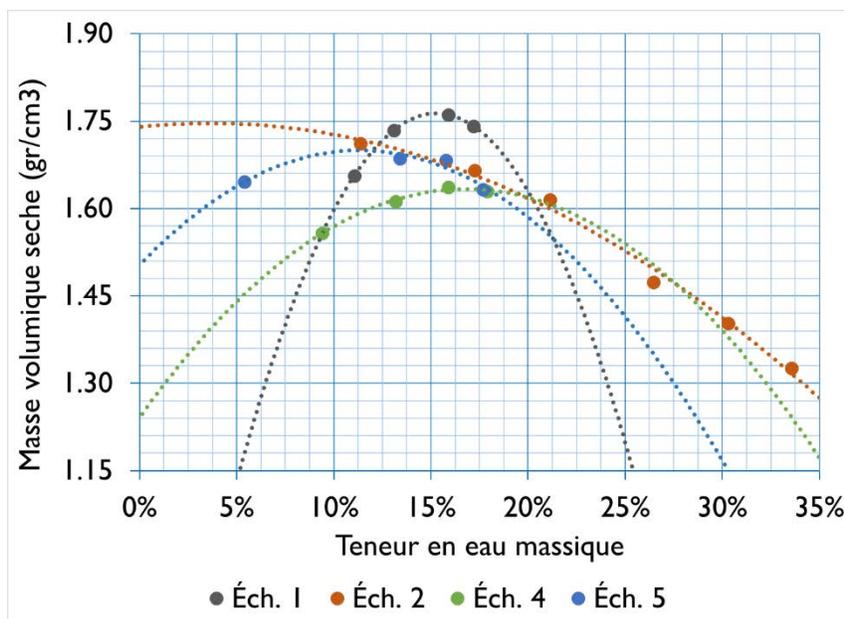


Figure 3–18 Courbes de compactage, essai Proctor (Phase initiale)

Les résultats montrent une masse volumique sèche optimale de 1,75 g/cm<sup>3</sup> pour l'argile, alors que dans les matériaux granulaires celle-ci varie entre 1,63 et 1,76 g/cm<sup>3</sup>. Quant à la teneur en eau optimale, elle correspond à 3,6% pour l'argile alors qu'elle varie entre 11,3 e 16,8% pour les matériaux granulaires. Il faut noter que cet essai n'a pas été fait sur l'échantillon 3.

### *Phase principale*

Dans ce qui suit, les résultats de la caractérisation des matériaux prélevés lors de la construction des cellules expérimentales de terrain sont présentés (Tableau 3-7).

### ▲ Analyse granulométrique

Pareillement à la phase initiale, pour chaque échantillon plusieurs mesures de la taille des particules ont été prises à l'aide du diffractomètre laser, jusqu'à l'obtention de résultats similaires entre les mesures consécutives (c.-à-d. une erreur de l'ordre du 5%). Afin de calculer les moyennes et faire l'analyse des résultats sur les échantillons présentés dans le Tableau 3-7, on a regroupé ces échantillons sont regroupés par rapport au type de matériau (voir Tableau 3-14).

Tableau 3-14 Regroupement des échantillons utilisés dans l'analyse granulométrique.

<b>Matériau</b>	<b>Échantillons</b>
<b>Argile</b>	C1-A1, C4-A1, C4-A3, C4-A3D, C4-A4
<b>Sable silteux</b>	C4-A2
<b>Sable fin</b>	C2-E3
<b>Mélange cellule 2</b>	C2-A1, C2-A2
<b>Mélange cellule 3</b>	C3-A1, C3-A2

La Figure 3–19 présente les courbes granulométriques moyennes des matériaux utilisés dans les cellules expérimentales et le Tableau 3-15 résume les résultats de l'analyse granulométrique. Ces résultats montrent que les pourcentages de la fraction argileuse sont très faibles dans les matériaux granulaires et de 17% dans l'argile et dans les mélanges préparés. La fraction de sable des matériaux argileux (argile et mélanges) varie entre 3 et 8% tandis que dans les matériaux granulaires elle varie entre 73 et 94%. Les matériaux argileux ont une granulométrie semi-étalée tandis que les matériaux granulaires ont une granulométrie serrée. Finalement, tous les échantillons ont une granulométrie mal graduée, c'est-à-dire que les échantillons ont une taille des particules assez uniforme.

Tableau 3-15 Analyse granulométrique des sols (Phase principale)

<b>Matériau</b>	<b>Argile</b>	<b>Sable silteux</b>	<b>Sable fin</b>	<b>Mélange cellule 2</b>	<b>Mélange cellule 3</b>
<b>% Argile</b>	17	1	1	16	18
<b>% Silt</b>	80	26	5	77	74
<b>% Sable</b>	3	73	94	7	8
<b><math>D_{10}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	1,3	42,9	115,9	1,4	1,3

Matériau	Argile	Sable silteux	Sable fin	Mélange cellule 2	Mélange cellule 3
$D_{30}$ ( $\mu\text{m}$ )	4	85,9	178,1	2,7	3,9
$D_{60}$ ( $\mu\text{m}$ )	12,4	140,4	262,3	13,6	12,3
$C_U$	9,2	3,3	2,3	9,4	9,1
$C_C$	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0

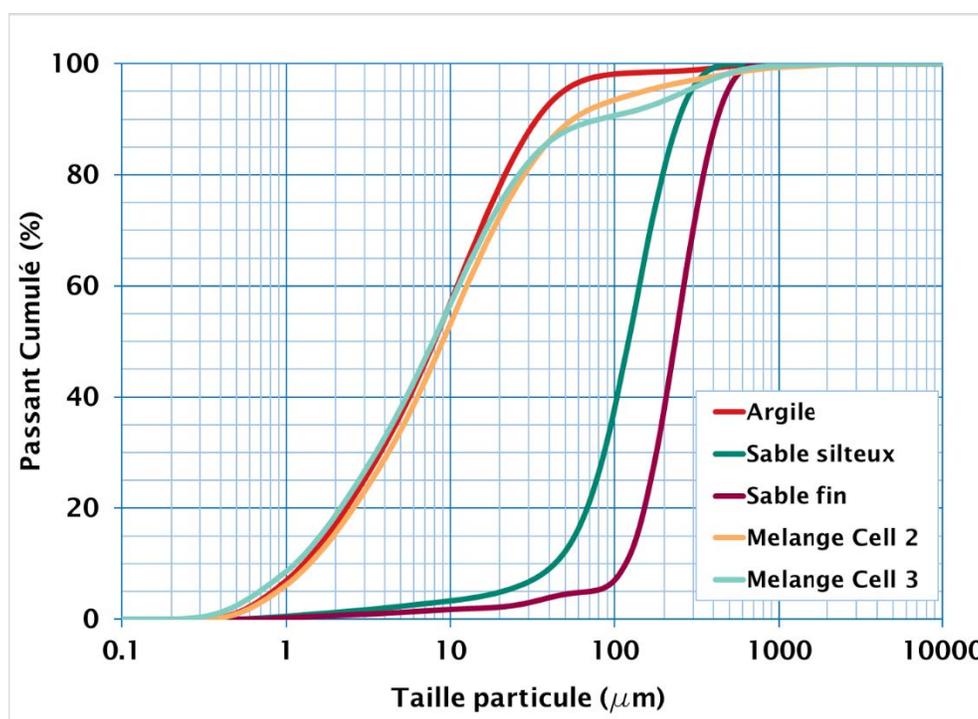


Figure 3–19 Courbe granulométrique (Phase principale)

#### ▲ Limites d'Atterberg

Dans cette phase, des essais pour mesurer les limites d'Atterberg ont été effectués sur des échantillons d'argile et des deux mélanges. Le Tableau 3-16 présente les résultats de ces essais; on peut y voir qu'il s'agit des matériaux à faible plasticité avec une activité des argiles moyenne. Il est important de noter que les amendements des argiles n'ont pas produit de changements importants au niveau de la plasticité ou l'activité des matériaux.

Tableau 3-16 Limites d'Atterberg (Phase principale)

Matériau	Limite de plasticité	Limite de liquidité	Indice de plasticité	Activité
----------	----------------------	---------------------	----------------------	----------

<b>Argile</b>	19	29	10	1,7
<b>Mélange cellule 2</b>	16	29	13	1,2
<b>Mélange cellule 3</b>	21	31	10	1,8

### ▲ Classification des sols

Les sols utilisés dans la construction des cellules expérimentales ont aussi été classifiés selon le système unifié, AASHTO, le système canadien de classification des sols et le Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées. Le Tableau 3-17 résume le résultat des différents systèmes de classification. La Figure 3–20 montre les classifications triangulaires du Système canadien de classification des sols et le Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées et la Figure 3–21 montre la carte de plasticité utilisée pour la classification de l'argile et la carte d'activité des argiles.

En résumé, les matériaux argileux ont été classifiés, selon le système unifié, comme argile de faible plasticité (CL), et les matériaux granulaires comme un sable silteux (SM) et un sable mal gradué (SP). Quant aux classifications texturales, les matériaux argileux ont été classifiés comme Loams silteux ou silts, et les matériaux granulaires comme sable et sable loameux/limoneux.

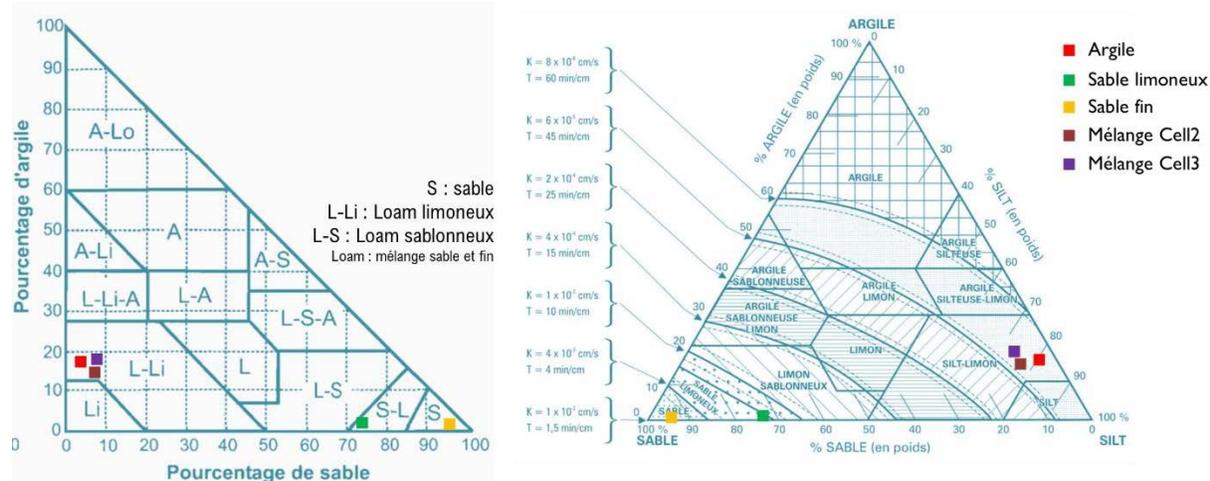


Figure 3–20 Classification triangulaire du système canadien (gauche) et le règlement des eaux usées de Québec (droite) (Phase principale) Modifié à partir de CEPP (1998) et Québec (2022).

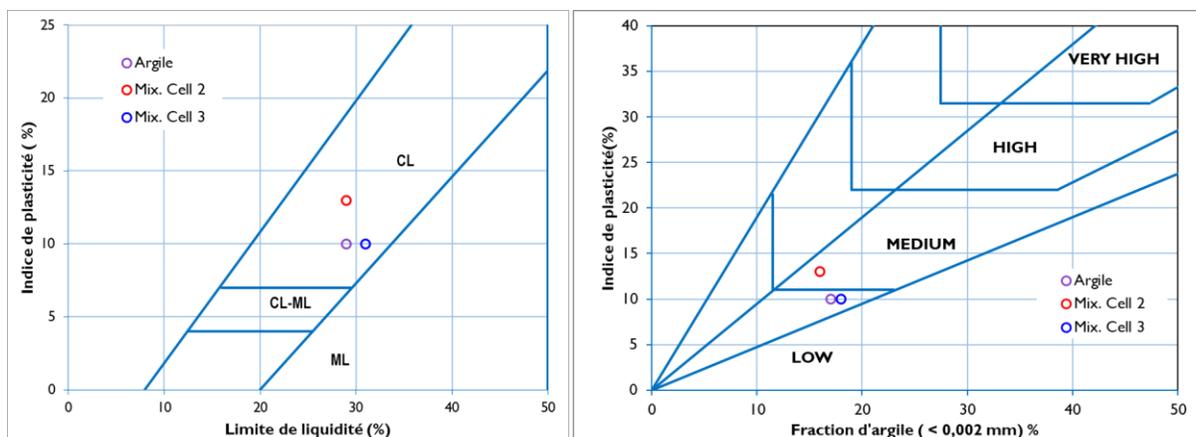


Figure 3–21 Carte de plasticité (gauche) et d'activité (droite) (Phase principale)

Tableau 3-17 Classification des sols. Phase principale.

Matériau	USCS	AASHTO	Système canadien	Règlement eaux usées
Argile	CL <i>Argile de faible plasticité</i>	A-4 <i>Sol silteux</i>	L-Li <i>Loam limoneux</i>	Silt
Sable silteux	SM <i>Sable silteux</i>	A-2 <i>Sable silteux ou argileux</i>	S-L <i>Sable loameux</i>	Sable silteux
Sable fin	SP <i>Sable mal gradué</i>	A-1 <i>Sable</i>	S <i>Sable</i>	Sable
Mélange cellule 2	CL <i>Argile de faible plasticité</i>	A-6 <i>Sol argileux</i>	L-Li <i>Loam limoneux</i>	Silt
Mélange cellule 3	CL <i>Argile de faible plasticité</i>	A-4 <i>Sol silteux</i>	L-Li <i>Loam limoneux</i>	Silt

#### ▲ Densité relative

La densité relative a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à l'hélium. Les valeurs mesurées avec cette méthode sont présentées dans le Tableau 3-18. En général, la densité relative des matériaux utilisés varie entre 2,66 et 2,72.

Tableau 3-18 Densité relative pycnomètre à l'hélium. Phase principale.

Matériau	Échantillon	$G_s$
Argile	C1-A1	2,66

Matériau	Échantillon	$G_s$
Argile	C4-A4	2,67
Sable silteux	C4-A2	2,69
Sable fin	C2-E3	2,72
Mélange cellule 2	C2-A1	2,66
Mélange cellule 3	C3-A2	2,66

▲ Masse volumique maximale

Les essais Proctor ont été faits seulement sur les échantillons de la phase préliminaire d'échantillonnage. Pour la phase principale, les conditions optimales de teneur en eau et densité de compactage des matériaux fins (sur lesquelles il est possible de mesurer les limites d'Atterberg) ont été calculées à l'aide des relations proposées par Maqsoud (2022) (Éq. 3-1 et Éq. 3-2) et Sivrikaya (2008) (Éq. 3-3 et Éq. 3-4), présentés en Maqsoud (2022).

$$\rho_{dmax} = 42,37(w_L w_P)^{-0,116} \quad \text{Éq. 3-1}$$

$$w_{opt} = \frac{w_L}{1,733 + 0,0091w_P} \quad \text{Éq. 3-2}$$

$$\rho_{dmax} = 0,22(96,32 - w_P) \quad \text{Éq. 3-3}$$

$$w_{opt} = 0,94w_L \quad \text{Éq. 3-4}$$

Afin de vérifier la validité de ces relations, la densité maximale sèche et la teneur en eau optimales ont été calculées pour l'échantillon d'argile prélevé lors de la phase préliminaire et sur lequel l'essai Proctor a été fait. Une valeur de 1,75 g/cm<sup>3</sup> a été trouvée pour la masse volumique sèche optimale et de 3,6% pour le teneur en eau (voir Tableau 3-13).

Tableau 3-19 Masse volumique sèche et teneur en eau optimales pour l'argile.

Reference	$\rho_{d\_opt}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	Erreur $\rho_d$
Maqsoud (2022)	2,04	19	16,5 %
Sivrikaya (2008)	1,76	17	0,4 %

D'après les valeurs calculées (présentés dans le Tableau 3-19), la relation pour la masse volumique sèche optimale proposée par Sivrikaya (2008) (Éq. 3-3) est la plus appropriée pour le type de sol

traité. Dans le cas de la teneur en eau optimale, les deux relations ont des différences très importantes pour être considérées. Dans ce qui suit, on utilise la valeur de la masse volumique sèche optimale calculée d'après Sivrikaya (2008), comme il est résumé au Tableau 3-20. Les valeurs de l'indice de vides et la porosité sont aussi calculées afin de comparer les conditions du montage des essais de caractérisation hydrogéologique.

Tableau 3-20 Masse volumique sèche et teneur en eau optimales calculées d'après Sivrikaya (2008).

Matériau	$\rho_{d\_opt}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{\rho opt}$	$n_{\rho opt}$
Argile	1,73	0,54	0,35
Mélange cellule 2	1,80	0,48	0,32
Mélange cellule 3	1,69	0,57	0,36

### *Analyse des résultats de la caractérisation physique*

Ci-dessous, les résultats de la caractérisation physique sont commentés. Tout d'abord, on commence par évaluer la pertinence des matériaux argileux par rapport aux critères présentés dans le Tableau 2-1 (Section 2.2.1) qui résume les caractéristiques souhaitables des sols pour être utilisés comme barrière imperméable. Le Tableau 3-21 contient la comparaison de ces critères avec les résultats de la caractérisation. Globalement, les matériaux argileux utilisés dans les essais expérimentaux sont conformes aux critères présentés dans le Chapitre 2; néanmoins, il est nécessaire de souligner que dans le cas des sols utilisés dans la construction des cellules expérimentales, les valeurs seuils du pourcentage d'argile et limite de liquidité sont à la limite des intervalles, voir insuffisantes à l'égard de certaines références (voir Tableau 2-1).

Tableau 3-21 Comparaison des caractéristiques souhaitables des matériaux agissant comme barrière imperméable.

Critère/Matériau	Fines (%)	Argile (%)	IP (%)	wL (%)	Gravier (%)	Taille max
<b>Enveloppe</b>			7-15 < IP	15 < wL		
<b>Références</b>	>20 - 50	> 15 – 25	< 20-40	< 80	< 10-50	25-50 mm
<b>Argile préliminaire</b>	100	25	18	36	0	< 75 $\mu$ m
<b>Argile construction</b>	97	17	10	29	0	< 5 mm

Critère/Matériau	Fines (%)	Argile (%)	IP (%)	wL (%)	Gravier (%)	Taille max
Mélange cellule 2	93	16	13	29	0	< 5 mm
Mélange cellule 3	92	18	10	31	0	< 5 mm

Les pourcentages d'argile mesurés sur les sols utilisés dans les cellules expérimentales sont plus faibles (variant entre 16 et 25%); en effet, dans le système canadien de classification des sols ces matériaux sont classifiés comme *Loams limoneux*, un type de sol qui selon Rompré et Carrier (1997) n'est pas très répandu dans la zone de prélèvement. D'après Rompré et Carrier (1997), les dépôts dans la zone de prélèvement sont plutôt des argiles et argiles silteuses avec un pourcentage de la fraction argileuse de l'ordre de 50% (variant entre 41 et 91%).

À cause de cette faible fraction d'argile, les matériaux argileux utilisés montrent une plasticité faible à moyenne avec des valeurs d'IP entre 10 et 18 (voir Figure 3-17 et Figure 3-21), ce qui permet de classifier ces matériaux comme argile à faible plasticité (CL) selon le système unifié. Les valeurs du coefficient d'uniformité,  $C_U$ , montrent que les sols sableux ont une granulométrie entre serrée et très serrée, c'est-à-dire sans une grande variation de la taille des particules; en ce qui concerne les argiles, il s'agit d'une granulométrie semi-étalée. Quant au coefficient de courbure,  $C_C$ , il révèle que la courbe de distribution granulométrique est assez régulière pour tous les matériaux. En ce qui concerne les cartes d'activité, les matériaux argileux utilisés présentent un potentiel de gonflement faible à moyen.

La classification des sols et les comportements de plasticité et de gonflement sont conservés dans les sols amendés. De façon générale, les amendements d'argile n'ont pas induit des changements importants dans les propriétés physiques mesurées, comme on peut l'observer dans les résultats présentés du Tableau 3-15 au Tableau 3-21.

### 3.2.3 Caractérisation chimique et minéralogique

Du côté des essais minéralogiques et chimiques, deux types d'essais ont été faits : des essais DRX (diffraction de rayons X) et FRX (fluorescence de rayons X). Les essais ont été faits uniquement sur les échantillons prélevés durant l'étape initiale (Tableau 3-6). Le Tableau 3-22 et le Tableau 3-23 présentent respectivement les résultats des analyses DRX et FRX.

Les analyses avec la méthode DRX montrent une composition majoritairement de tectosilicates (albite, quartz, feldspath) et des teneurs faibles de phyllosilicates (illite/muscovite, chlorite). Ainsi, seulement 4% des minéraux sont des minéraux argileux (illite). Le rapport du laboratoire indique aussi que dans l'échantillon 2 (argile) il a été détectée une toute petite quantité (pas mesurable) de minéraux argileux (vermiculite ou smectite). L'analyse DRX des matériaux granulaires montre qu'ils sont constitués de 55% de quartz, 30% d'albite et d'autres silicates dans une faible proportion. À propos de l'échantillon 2 (argile), il est important de signaler qu'on y trouve 28% de minéraux amorphes indistincts. D'autres analyses sont nécessaires afin d'établir quelle proportion correspond aux minéraux argileux.

Tableau 3-22 Minéraux identifiés dans les échantillons analysés par DRX.

Échantillon	1	2	3	4	5
<b>Matériau</b>	Sable fin	Argile	Sable grossier	Silt 1	Silt 2
<b>Quartz</b>	46,8	21,9	43,7	56,7	55,4
<b>Albite</b>	31,1	26,7	36,6	31,0	30,1
<b>K feldspath</b>	3,0	8,2	3,3	3,7	4,9
<b>Amphibole</b>	2,9	7,0	4,1	2,8	4,5
<b>Muscovite/Illite</b>	3,8	3,6	5,1	3,6	3,0
<b>Chlorite</b>	3,2	4,6	7,2	2,2	2,1
<b>Amorphes</b>	9,2	28,0	--	--	--

Tableau 3-23 Éléments identifiés dans les échantillons analysés par FRX.

Échantillon	1	2	3	4	5
<b>Matériau</b>	Sable fin	Argile	Sable grossier	Silt 1	Silt 2
<b>SiO<sub>2</sub></b>	75,0	61,2	69,4	77,6	73,6
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	11,8	15,7	13,6	11,2	11,3
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,1	5,9	5,4	3,3	3,7
<b>MgO</b>	1,3	2,8	2,1	0,9	1,0
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,5	3,1	3,7	3,4	3,4
<b>CaO</b>	2,7	2,5	3,2	2,1	2,6
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,3	2,6	1,2	1,4	1,5

Les analyses FRX montrent que le SiO<sub>2</sub> représente 61% et le Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 16% de la composition des argiles. Autres composants comme CaO, MgO, et Na<sub>2</sub>O sont présentes mais avec une faible proportion. Dans le cas des matériaux granulaires, le pourcentage de SiO<sub>2</sub> est supérieur à 70%.

La caractérisation chimique et minéralogique a permis de constater qu'il n'existe pas des minéraux expansifs dans les argiles prélevées, ou que sa proportion est si faible qu'ils ne sont pas facilement identifiables.

### 3.2.4 Caractérisation hydrogéologique

La caractérisation hydrogéologique comprend des essais de conductivité hydraulique saturée et des essais de détermination de la CRE. Le Tableau 3-24 présente les essais et les normes utilisés pour compléter la caractérisation hydrogéologique. Ces essais ont été faits sur les échantillons prélevés à l'étape principale lors de la construction (Tableau 3-7), regroupés et homogénéisés selon le Tableau 3-25.

Tableau 3-24 Liste d'essais de la caractérisation hydrogéologique.

Essai	Norme
Conductivité hydraulique saturée des sols à grains grossiers (charge constante)	ASTM D2434-22, 2022
Conductivité hydraulique saturée en perméamètre à parois rigide	ASTM D5856 - 15
Conductivité hydraulique saturée en perméamètre à parois flexible	ASTM D5084 - 16a
Détermination de la courbe de rétention en eau en utilisant un extracteur à pression	ASTM D6836 - 16

Tableau 3-25 Regroupement des échantillons utilisés dans la caractérisation hydrogéologique.

Matériau	Échantillons
Argile	C1-E1, C1-E2, C4-E1
Sable silteux	C4-E2
Sable fin	C2-E3
Mélange cellule 2	C2-E1, C2-E2
Mélange cellule 3	C3-E1, C3-E2

### ▲ Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à parois rigide à charge constante (ASTM, 2022) pour les sols sableux, au moyen d'un perméamètre à parois rigide à charge variable (ASTM, 2016b) pour les sols silteux, et à l'aide d'un perméamètre à parois flexible (ASTM, 2016e) pour les sols argileux. Dans l'essai, on place un échantillon de sol dans un contenant rigide ou dans une membrane flexible. L'échantillon est placé et compacté en couches pour atteindre les conditions de porosité et densité visés; dans le cas d'utilisation d'une membrane, l'échantillon est formé dans un moule et après placé dans la membrane. Ensuite l'échantillon est saturé afin d'éliminer les bulles d'air. Par la suite, l'échantillon est soumis à une charge hydraulique différentielle qui provoque l'écoulement de l'eau à travers celui-ci. Le débit d'eau est mesuré en recueillant un volume d'eau dans un temps donnée dans le cas d'une charge constante, ou en mesurant le changement de niveau dans les manomètres installés au contenant rigide pour un essai à charge variable. Connaissant la géométrie de l'échantillon on peut calculer la conductivité hydraulique en utilisant la loi de Darcy (voir section 2.3.1).

L'essai à parois flexible est similaires à l'essai à charge variable, sauf que pour arriver à faire écouler l'eau à travers l'échantillon une haute charge (sous forme de pression) doit être imposée ce qui oblige à utiliser une chambre triaxiale et à appliquer une pression de confinement sur l'échantillon afin de contrôler ses déformations. La Figure 3–22 présente les différents équipements et les montages des essais réalisés afin de faire la caractérisation hydrogéologique.

Le Tableau 3-26 résume les valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées au laboratoire sur les échantillons prélevés lors de la mise en place des cellules expérimentales. Les valeurs mesurées sur les matériaux argileux des cellules 1, 2 et 4 sont plus faibles que le seuil établi dans les sections 2.1 et 2.2 ( $10^{-9}$  m/s), tandis que celle mesurée sur les matériaux amendés utilisés dans la cellule 3 est dans la limite de la valeur requise. Par rapport aux conditions de compactage, l'indice des vides mesuré au début de l'essai permet d'évaluer le niveau de compactage comparé aux valeurs calculées à partir des limites d'Atterberg (Tableau 3-20). À cet égard, l'échantillon d'argile a eu un niveau de compactage de 96% alors que les deux amendements ont atteint 100% du compactage.



Figure 3–22 Montage des différents essais utilisés dans la caractérisation hydrogéologique.

La conductivité hydraulique saturée normalisée à une porosité de 0,40 a été calculée à partir de l'équation de Taylor (1948) tirée de Zeng et al. (2011) :

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad \text{Éq. 3-5}$$

Avec,  $C_k = 0,5 e_0$  l'indice de normalisation de la conductivité hydraulique définie par Leroueil (1990) dans Zeng et al. (2011).

Tableau 3-26 Conductivité hydraulique saturée mesurée au laboratoire.

Matériau	$k_{sat}$ (m/s)	$n$	$e$	$k_{sat}$ (m/s) pour $n = 0,4$
Argile	$2,2 \times 10^{-10}$	0,37	0,60	$3,5 \times 10^{-10}$
Sable silteux	$6,7 \times 10^{-6}$	0,40	0,66	$6,7 \times 10^{-6}$
Sable fin	$8,5 \times 10^{-4}$	0,40	0,66	$8,5 \times 10^{-4}$
Mélange cellule 2	$1,8 \times 10^{-10}$	0,31	0,46	$1,3 \times 10^{-9}$
Mélange cellule 3	$1,7 \times 10^{-9}$	0,36	0,57	$3,5 \times 10^{-9}$

Les valeurs de la conductivité hydraulique saturée normalisées permettent de voir une augmentation d'un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique des argiles amendées; néanmoins, l'amendement avec le sable fin permet d'atteindre une porosité plus faible (avec une

diminution de la conductivité hydraulique) grâce à un meilleur compactage (indice de vides plus faible). Cet aspect sera traité plus en détail dans le chapitre sur les résultats.

Freeze et Cherry (1979) rapportent des valeurs de conductivité hydraulique saturée entre  $1 \times 10^{-6}$  et  $1 \times 10^{-12}$  m/s pour des matériaux provenant des dépôts glaciolacustres (Till); pour leur part, Gonzalez De Vallejo et Ferrer (2011) rendent compte des valeurs de conductivité hydraulique saturée entre  $10^{-7}$  et  $10^{-10}$  m/s pour des argiles à faible plasticité (CL). Finalement, GSI (2000) a mesuré des valeurs de conductivité hydraulique saturée au laboratoire entre  $2,14 \times 10^{-9}$  et  $2,72 \times 10^{-9}$  m/s sur des échantillons d'argiles prélevés à Rouyn-Noranda. Ces argiles possèdent un pourcentage de passant  $2 \mu\text{m}$  entre 43 et 66%, avec une limite de liquidité entre 38 et 68%, une limite de plasticité entre 18 et 26 et classifié comme CH, CL et ML. Les valeurs mesurées dans le présent travail sont en concordance avec les valeurs reportées dans ces références.

De leur côté, Merzouk et al. (2022) ont mesuré une conductivité hydraulique saturée de  $4,4 \times 10^{-11}$  m/s pour l'argile, de  $7,41 \times 10^{-11}$  m/s pour l'amendement 85% argile – 15% sable (similaire à celui de la cellule 2) et de  $5,0 \times 10^{-11}$  m/s pour l'amendement 85% argile – 15% silt (similaire à la cellule 3) fait avec les matériaux prélevés dans l'échantillonnage initial. Les valeurs obtenues par Merzouk et al. (2022) sont plus faibles que les valeurs mesurées dans le présent travail, néanmoins, il faut noter que les argiles utilisées dans leur étude ont une fraction d'argile et une plasticité plus importantes (voir Tableau 3-21).

#### ▲ Courbes caractéristiques de rétention d'eau (CRE)

Les courbes de rétention d'eau ont été déterminées à l'aide des cellules de pression et d'un extracteur. Il existe différents extracteurs en fonction de la pression visée; dans ce manuscrit on utilise un extracteur à plaque poreuse (*Tempe pressure cell*) pour les sols granulaires et des chambres à membranes sous pression (*Pressure plate*) pour le cas des sols fins (ASTM, 2016d). L'essai consiste à créer une succion matricielle dans un échantillon de sol par l'application d'une pression dans la cellule ou dans la chambre d'extraction. Pour cela, on place un échantillon saturé dans l'extracteur ou une série d'échantillons sur la membrane dans la chambre d'extraction de la *pressure plate*. Ensuite, on commence à appliquer des paliers de pression d'air; on attend que la pression de l'air soit en équilibre avec la pression dans l'eau et que l'évacuation d'eau se termine

(deux ou trois jours) pour après mesurer la masse de l'échantillon pour cette pression appliquée, et la pression est augmentée au palier suivant. On répète cette procédure jusqu'à ce que le sol soit désaturé totalement ou jusqu'à l'atteinte des pressions limites des équipements.

Ces essais ont été faits sur les matériaux prélevés pendant la construction des cellules expérimentales (Tableau 3-25), tous les matériaux argileux ont été caractérisés alors que seul le sable silteux a été le matériau granulaire qui a été caractérisé, car une couche de ce matériau a été incluse dans une des cellules expérimentales. La Figure 3–23 montre les CRE issues des essais réalisés.

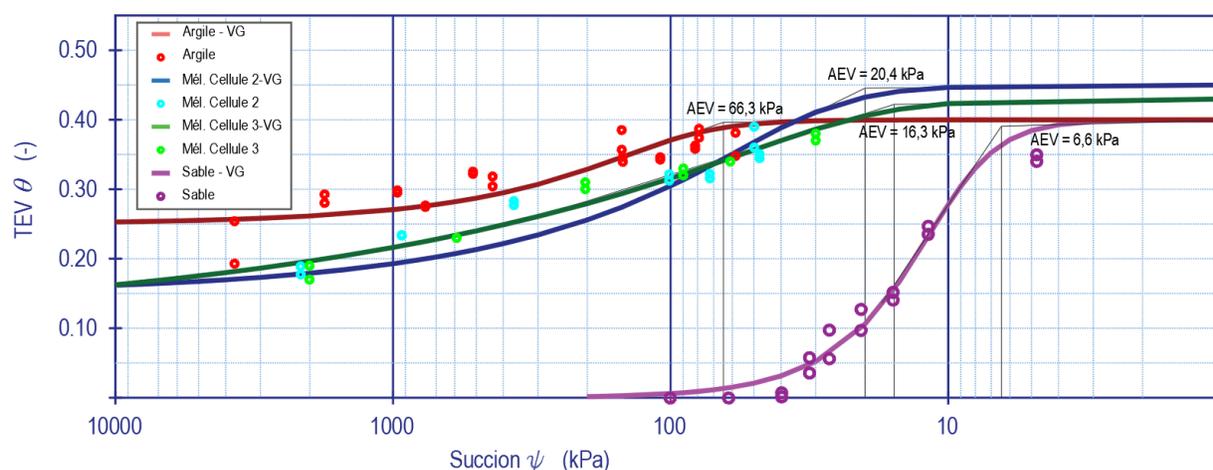


Figure 3–23 Courbes de rétention d'eau (Phase principale)

Le Tableau 3-27 résume les paramètres décrivant les CRE des matériaux prélevés lors de la phase de mise en place des cellules expérimentales. Les courbes obtenues ont été ajustées à l'aide du modèle de van Genuchten comme le Tableau 3-27 le montre. La pression d'entrée de l'air a été calculée graphiquement avec la méthode des tangentes. L'AEV de l'argile est influencée par le pourcentage de silt élevé et présente une valeur faible. Les valeurs de l'AEV des amendements mettent en évidence qu'il y a une diminution, par rapport à l'AEV de l'argile, en raison des ajouts de sable et de silt.

Tableau 3-27 Paramètres de la courbe de rétention d'eau (Phase principale)

Matériau	AEV (kPa)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n_{VG}$	$\theta_S$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Argile	66,3	0,001	2,853	0,40	0,25
Sable silteux	6,6	0,010	3,778	0,40	0,0001

Matériau	AEV (kPa)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n_{VG}$	$\theta_S$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Mélange cellule 2	20,4	0,003	2,562	0,45	0,15
Mélange cellule 3	16,3	0,005	2,269	0,43	0,10

Concernant les conditions de compactage, pareillement à l'essai de conductivité hydraulique, le niveau de compactage a été déterminé en comparant la densité calculée à partir de l'indice des vides aux valeurs calculées à partir des limites d'Atterberg (Tableau 3-20). Les niveaux de compactage atteint sur les échantillons utilisés dans la *pressure plate* sont présentés dans le Tableau 3-28. En général, des niveaux de compactage plus faibles que dans les essais de conductivité hydraulique sont constatés en raison de la saturation des matériaux lors de leur mise en place dans le moule, ce qui implique un compactage avec une teneur en eau élevée qui conduit à une masse volumique plus faible que l'optimale.

Tableau 3-28 Conditions de compactage des échantillons lors des essais dans la *pressure plate*.

Matériau	$n$	$e$	Compactage
Argile	0,44	0,78	87 %
Mélange cellule 2	0,46	0,85	80 %
Mélange cellule 3	0,44	0,77	89 %

### 3.3 Modélisation numérique

Des modèles numériques simulant les différents types de recouvrements ont été construits et calibrés à l'aide des données récoltées durant le suivi des cellules expérimentales.

L'objectif des modèles numériques construits est de simuler l'écoulement de l'eau à travers des recouvrements installés dans les cellules et de cette façon évaluer le bilan hydrique pour chaque scénario simulé afin de calibrer et valider les modèles avec les mesures faites sur le terrain. L'analyse de sensibilité réalisé a consisté à calculer le débit horaire percolé en changeant la conductivité hydraulique saturée du modèle numérique et par la suite de comparer les résultats avec le débit mesuré à l'aide des débitmètres à bascule sur le terrain.

Pour cela, des modèles unidimensionnels comme celui présenté à la Figure 3-24 et ayant les mêmes épaisseurs que celles utilisées lors des mises en place des cellules expérimentales (voir section

3.1.1) ont été construits. Ainsi les cellules utilisées ont 0,80 m d'argile pour le modèle de la cellule 1; 0,60 m d'argile amendée pour les modèles des cellules 2 et 3; et une couche de 0,40 m de sable silteux placée entre deux couches d'argile de 0,40 m, soit une épaisseur totale de 1,2 m, pour la cellule 4.

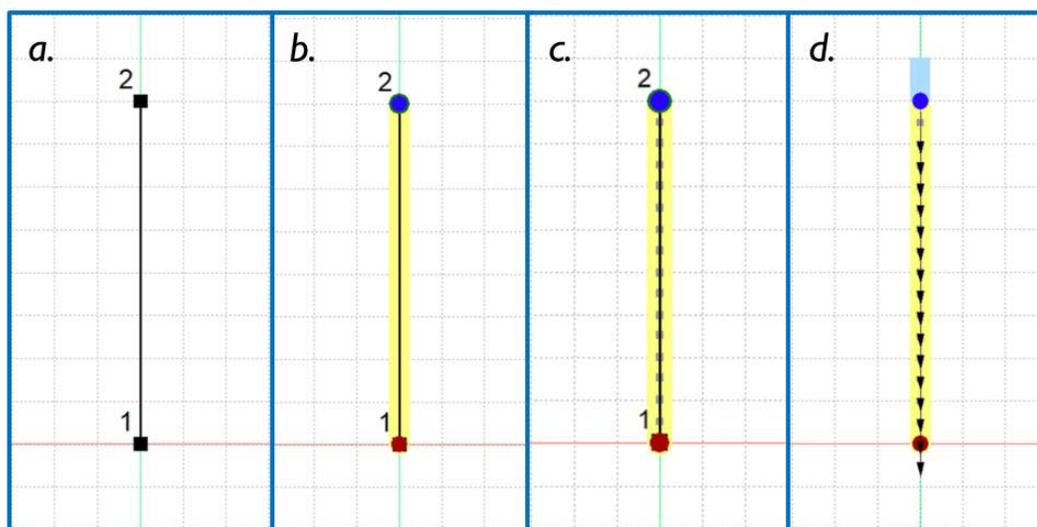


Figure 3–24 Modèle unidimensionnel d'un recouvrement monocouche dans le logiciel SEEP/W.  
 a) définition de la géométrie; b) attribution des propriétés; c) discrétisation et imposition des conditions aux limites; d) interprétation des résultats.

Le modèle numérique exige l'attribution des propriétés hydrogéologiques aux matériaux considérés, c'est-à-dire d'associer une courbe de rétention d'eau et une fonction de perméabilité comme il est présenté dans la section 2.3.2. Pour cela, les modèles de van Genuchten (1980) pour décrire les CRE et le modèle de Burdine (1953) pour prédire les fonctions de conductivité hydraulique non saturée ont été choisis. Les paramètres décrivant ces modèles ont été choisis à partir de la caractérisation hydrogéologique (présentée dans la section 3.2.4) et les mesures sur le terrain. Concernant la conductivité hydraulique saturée, il ne s'agit pas de valeurs uniques, mais des intervalles de variation qui permettent de faire les analyses de sensibilité de ce paramètre afin de tenir compte des valeurs mesurées au laboratoire et sur le terrain. Les paramètres utilisés dans les modèles numériques sont résumés dans le Tableau 3-29.

Tableau 3-29 Paramètres des matériaux utilisés dans les simulations numériques.

Matériau	$k_{sat}$ (m/s)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n_{VG}$	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Argile	$2,2 \times 10^{-10} - 8,8 \times 10^{-7}$	0,001	2,853	0,40	0,25
Sable silteux	$6,7 \times 10^{-6}$	0,010	3,778	0,40	0,0001
Mélange cellule 2	$1,8 \times 10^{-10} - 1,1 \times 10^{-8}$	0,003	2,562	0,45	0,15
Mélange cellule 3	$1,7 \times 10^{-9} - 1,2 \times 10^{-6}$	0,005	2,269	0,43	0,10

Quant aux conditions aux limites, sur la frontière (nœud) inférieure, une condition aux limites du type charge constante (avec  $z = 0$  m) et une condition de « surface d'infiltration potentielle » (*Potential Seepage Face*) est imposée afin de simuler le drain installé. Ce type de condition permet de simuler une surface libre (avec une pression égale à zéro), comme c'est le cas d'un drain non pressurisé. Sur la frontière (nœud) supérieure, une condition aux limites du type « interaction sol-climat (*Land-Climate Interaction, LCI*) » a été imposé. Ce type de condition permet de calculer le bilan hydrique et la percolation nette à travers les recouvrements simulés (GEOSLOPE, 2020). Il s'agit d'une condition du type Neumann, c'est-à-dire un flux imposé. Pour cela, le logiciel calcule le flux qui va être imposé sur la frontière à partir des interactions qui se passent à la surface au moyen des équations du bilan de masse à la surface pour calculer le débit d'infiltration. Pour certaines analyses on a inclus une couche « artificiel » composée d'un matériau avec une conductivité hydraulique saturée de 1 m/s et une porosité de 100% afin de simuler l'accumulation d'eau sur la cellule expérimentale.

Le LCI peut prendre en considération les précipitations, la fonte des neiges, l'évaporation (en fonction du déficit de la pression de vapeur et la vitesse du vent et la végétation) avec la méthode de Penman-Wilson ou Penman-Monteith et l'absorption des racines. Dans cette étude, on utilise la méthode de Penman-Wilson du fait que c'est la méthode la plus appropriée pour un sol nu. Avec cette méthode, le LCI a besoin des données relatives à température de l'air, aux précipitations, à l'humidité relative, aux vitesses du vent, aux radiation solaires nettes, telles que définies dans la section 3.1.4. La méthode permet aussi de tenir compte de la fonte des neiges, mais cette fonction ne sera pas prise en compte dans cette étude.

Dans les modèles numériques des cellules expérimentales, on utilise les données enregistrées à la station météorologique de Rouyn (voir section 3.1.4) et les débits de sortie mesurés en continu à l'aide des débitmètres à bascule, qui seront présentés dans le chapitre suivant. Les modèles construits simulent la période comprise entre le 29 juin jusqu'au 11 novembre 2022 (période durant laquelle les débitmètres à bascule ont été installés).

La convergence du modèle numérique a lieu lorsque la différence entre deux solutions consécutives est égale à un intervalle de tolérance spécifié. Afin d'atteindre la convergence des modèles, une tolérance dans la charge de pression maximale de 0,005 m et une égalité de deux chiffres significatifs est fixée. Également, le nombre d'itérations maximum pour arriver à cette tolérance est fixé à 500. Le pas de temps de calcul équivaut à une heure et varie linéairement, les résultats sont sauvegardés pour chaque heure de modélisation.

## CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Dans ce chapitre les résultats des mesures réalisées sur le terrain permettant d'évaluer le comportement hydrogéologique des recouvrements à base d'argile sont présentés. De même qu'on présente les résultats et les interprétations des simulations numériques du comportement hydrogéologique des cellules expérimentales à l'aide du logiciel SEEP/W.

### 4.1 Présentation des données collectées

Dans cette section, les données mesurées depuis la mise en place des cellules expérimentales ainsi que les résultats des essais *in situ* sont présentés. Pour chaque ensemble de données une description statistique est également présentée et les données sont illustrés sous forme de figures afin de voir l'évolution dans le temps et dans l'espace des différents paramètres analysés.

#### 4.1.1 Données collectées lors de la mise en place des cellules

Le contrôle de la mise en place des matériaux a été réalisé, d'une part, à l'aide d'un nucléodensimètre et d'autre part à l'aide des échantillons prélevés au moyen d'un cylindre à volume connu. À cet égard, le Tableau 4-1 présente la densité relative ( $G_s$ ), la masse volumique totale ( $\rho$ ), la masse volumique sèche ( $\rho_d$ ), la porosité ( $n$ ), l'indice des vides ( $e$ ), la teneur en eau massique ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) des sols qui ont été mesurés et estimés au moyen des échantillons prélevés lors de la construction des cellules. Le Tableau 4-2 présente les mêmes propriétés déterminées à partir des mesures faites à l'aide du nucléodensimètre. Également, dans la Figure 4-1 et la Figure 4-2 une comparaison des résultats obtenus avec ces méthodes est présentée. Dans cette analyse les premières lectures des instruments de suivi après la mise en place des couches qui recouvrent chaque capteur sont incluses. Les résultats des mesures de température ( $T$ ), teneur en eau volumique ( $\theta$ ), succion ( $\psi$ ), porosité ( $n$ ), masse volumique sèche ( $\rho_d$ ), teneur en eau massique ( $\omega$ ) et degré de saturation ( $S_r$ ) faits lors de l'installation des cellules au moyen des instruments de suivi, sont présentés au Tableau 4-3.

Tableau 4-1 Caractéristiques de base déterminées à partir des échantillons prélevés avec le cylindre à volume connu.

Cellule	Matériau	Couche*	G <sub>s</sub>	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	n	e	$\omega$	S <sub>r</sub>	$\theta$
1	Argile	4	2,66	1,85	1,49	0,44	0,78	0,24	0,83	0,36
2	Mélange cellule 2	2	2,66	1,85	1,50	0,43	0,76	0,23	0,79	0,34
		3	2,66	2,04	1,69	0,36	0,57	0,20	0,96	0,35
3	Mélange cellule 3	2	2,66	1,84	1,49	0,44	0,78	0,24	0,82	0,36
		3	2,66	1,83	1,49	0,44	0,78	0,23	0,79	0,35
4	Argile	2	2,67	1,70	1,35	0,49	0,97	0,26	0,72	0,35
	Sable silteux	4	2,69	1,60	1,47	0,45	0,83	0,09	0,30	0,13
		5	2,67	1,81	1,44	0,46	0,85	0,26	0,81	0,37
	Argile	5	2,67	1,74	1,38	0,48	0,93	0,26	0,75	0,36
		6	2,67	1,46	1,15	0,57	1,32	0,27	0,54	0,31

\*Les matériaux ont été placés en couches de 20 cm d'épaisseur.

Tableau 4-2 Caractéristiques de base déterminées à partir des lectures du nucléo densimètre.

Cellule	Matériau	Couche*	G <sub>s</sub>	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	n	e	$\omega$	S <sub>r</sub>	$\theta$
1	Argile	1	2,66	1,40	1,09	0,59	1,44	0,29	0,53	0,31
		2	2,66	1,66	1,30	0,51	1,04	0,27	0,70	0,36
		3	2,66	1,68	1,31	0,50	1,02	0,28	0,72	0,36
2	Mélange cellule 2	2	2,66	1,66	1,33	0,50	0,99	0,25	0,66	0,33
		3	2,66	1,96	1,42	0,47	0,87	0,24	0,74	0,34
3	Mélange cellule 3	3	2,66	1,60	1,25	0,53	1,12	0,26	0,62	0,33
		3	2,66	1,57	1,25	0,53	1,12	0,26	0,62	0,32
4	Argile	2	2,67	1,45	1,12	0,58	1,37	0,29	0,57	0,33
	Sable silteux	3	2,69	1,48	1,38	0,49	0,94	0,08	0,21	0,10
		5	2,67	1,70	1,35	0,49	0,97	0,26	0,71	0,35
	Argile	6	2,67	1,54	1,24	0,54	1,16	0,24	0,56	0,30
		6	2,67	1,45	1,15	0,57	1,31	0,26	0,53	0,30
		6	2,67	1,68	1,34	0,50	0,99	0,25	0,68	0,34

\*Les matériaux ont été placés en couches de 20 cm d'épaisseur.

Tableau 4-3 Conditions d'installation des cellules d'après les instruments de suivi.

Cellule	Profondeur	Matériau	$T$ (°C)	$\theta$	$\psi$ (kPa)	$n_{anneau}$	$\rho_d$	$\omega$	$S_r$
1	70 cm	Argile	6,4	0,34	0,4			0,23	0,77
	40 cm		6,0	0,34	0,4	0,44	1,49	0,23	0,77
	15 cm		6,6	0,31	0,4			0,21	0,70
2	50 cm	Mélange cellule 2	4,7	0,35	0,5	0,36	1,70	0,21	0,97
	30 cm		4,7	0,35	0,7	0,43	1,52	0,23	0,81
	15 cm		4,5	0,35	0,5	0,40*	1,60	0,22	0,88
3	50 cm	Mélange cellule 3	5,9	0,28	0,5		1,49	0,19	0,63
	30 cm		5,4	0,34	0,5	0,44	1,49	0,23	0,77
	15 cm		5,3	0,31	0,5		1,49	0,21	0,70
4	60 cm	Sable silteux	8,0	0,22	1,0	0,45	1,48	0,15	0,48
	110 cm	Argile	7,0	0,31	0,4	0,47	1,42	0,23	0,66
	90 cm		7,2	0,19	0,4	0,57	1,15	0,14	0,33
	30 cm		6,4	0,35	0,4	0,49	1,36	0,25	0,61
	15 cm		4,2	0,33	0,6	0,49	1,36	0,29	0,67

\*Moyenne cellule 2

La Figure 4–1 et Figure 4–2 montrent les distributions statistiques et les valeurs centrales des données prises lors de la mise en place des cellules à partir des contrôles sur le terrain et les premières lectures du système de suivi. La Figure 4–1.a montre les valeurs de la masse volumique sèche mesurées avec les différentes méthodes. La valeur maximale mesurée est de  $1,70 \text{ g/cm}^3$  dans la cellule 2; dans les autres cellules les valeurs obtenus sont toujours inférieures à  $1,50 \text{ g/cm}^3$ . Ainsi, au niveau de la cellule 2 on a mesuré une valeur moyenne de  $1,60 \text{ g/cm}^3$  avec le cylindre,  $1,38 \text{ g/cm}^3$  avec le nucléo densimètre et  $1,60 \text{ g/cm}^3$  à partir des instruments. De sa part, la masse volumique sèche au niveau de la cellule 1 est la plus faible mesurée à l'aide du nucléo densimètre avec une moyenne de  $1,23 \text{ g/cm}^3$  tandis qu'au niveau de la cellule 4 on trouve les valeurs plus faibles mesurées avec le cylindre et calculées à partir des instruments et qui correspond à  $1,49 \text{ g/cm}^3$  dans les deux cas.

D'après le Tableau 3-20, la valeur moyenne de la masse volumique sèche optimale est de  $1,74 \text{ g/cm}^3$  pour les matériaux argileux et de  $1,67 \text{ g/cm}^3$  pour les matériaux sableux (Tableau 3-13).

Pour la porosité, les valeurs les plus faibles ont été mesurées au niveau de la cellule 2 avec une moyenne de 0,40 mesurée à l'aide du cylindre et 0,48 avec le nucléodensimètre. En revanche, les porosités les plus élevées ont été mesurées au niveau de la cellule 1 (0,53) à l'aide du nucléodensimètre, et au niveau de la cellule 4 (0,50), qui a été mesurée avec le cylindre. Les valeurs de porosité optimales, calculées à partir de l'essai Proctor, varient entre 0,32 et 0,40 (Tableau 3-13 et Tableau 3-20). Seulement la cellule 2 a atteint une valeur de 0,36 (mesurée avec le cylindre), les autres cellules ont des valeurs de porosité supérieures ou égales à 0,44.

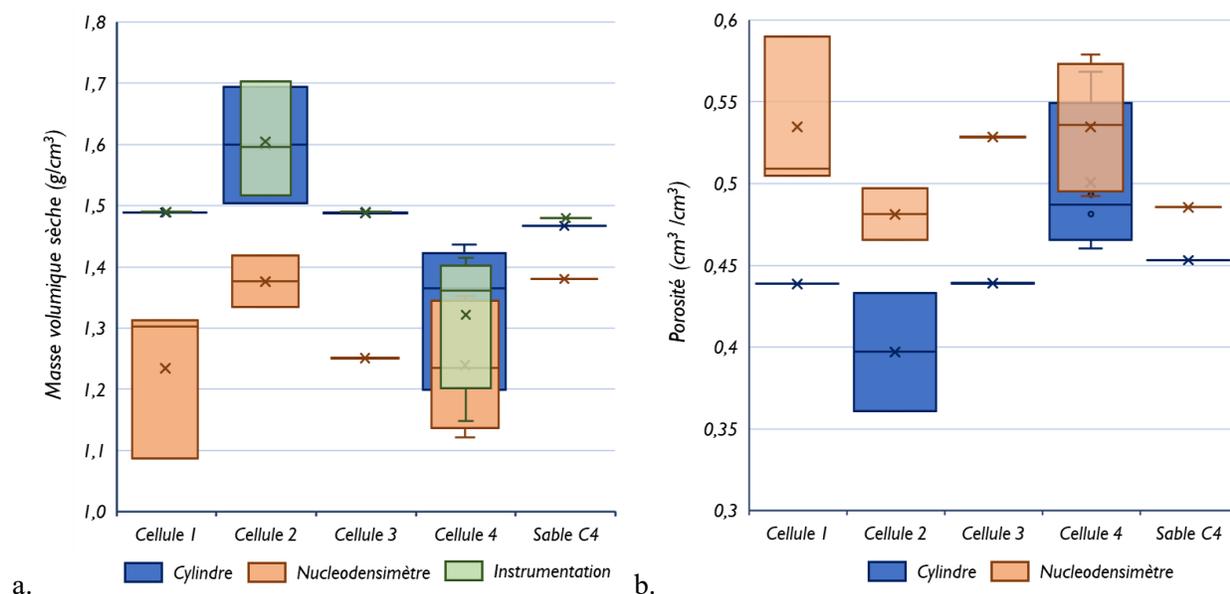


Figure 4–1 a. Masse volumique sèche mesurée en utilisant les échantillons (bleu), le nucléodensimètre (orange) et le système de suivi (vert). b. Porosité mesurée lors de la mise en place des cellules.

Quant à la teneur en eau massique et volumique, dans la Figure 4–2, on observe une variabilité plus importante au niveau de la cellule 4, où la teneur en eau volumique varie entre 0,19 et 0,37 pour les matériaux argileux et entre 0,10 et 0,22 pour le sable silteux. La teneur en eau volumique mesurée au niveau des cellules 1, 2 et 3, varie entre 0,28 et 0,36 respectivement dans les cellules 3 et 1.

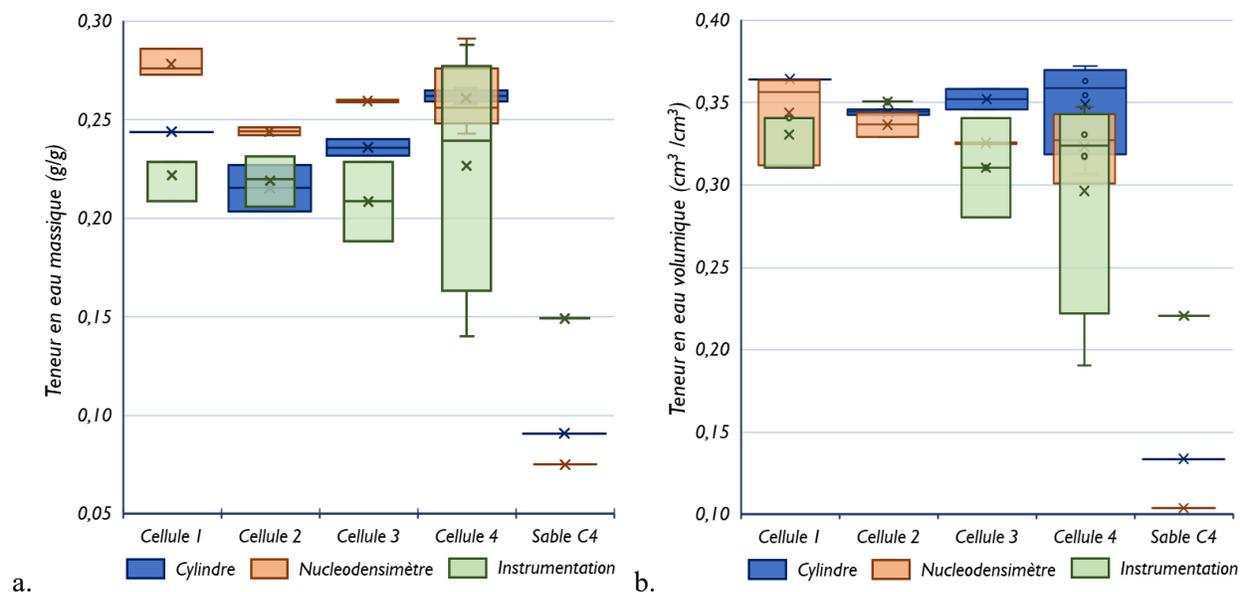


Figure 4–2 a. Teneur en eau massique mesurée depuis les échantillons (bleu), le nucléodensimètre (orange) et le système de suivi (vert). b. Teneur en eau volumique lors de la mise en place.

La Figure 4–3 et la Figure 4–4 montrent la variation en profondeur des paramètres mesurés lors de la mise en place. Dans ces figures on trouve également les limites relatives aux valeurs optimales établies au moyen de l'essai Proctor (voir section 3.2.2). Ces figures révèlent une faible variation en profondeur des teneurs en eau (entre 0,28 et 0,36 pour les teneurs en eau volumiques et entre 0,19 et 0,29 pour les teneurs en eau massiques), sauf pour la cellule 4, qui varie entre 0,10 et 0,37 (volumique) et entre 0,08 et 0,29 (massique) en raison des couches avec des matériaux différents. Dans les matériaux argileux les teneurs en eau massiques varient entre 0,14 et 0,29 dans les matériaux argileux et entre 0,08 et 0,15 dans les matériaux sableux.

Concernant la densité, la Figure 4–3 permet observer une très faible variation au niveau de la cellule 3 et des variations importantes dans les autres cellules, de ce fait on peut conclure que la compaction des couches n'a pas été faite de la même façon. Pour illustrer cet aspect la couche supérieure et inférieure de la cellule 2 sont utilisées comme exemple. Ainsi la masse volumique mesurée en haut et en bas correspond à 1,70 g/cm<sup>3</sup> alors qu'au centre et à 20 cm de la surface elle correspond à 1,33 g/cm<sup>3</sup>.

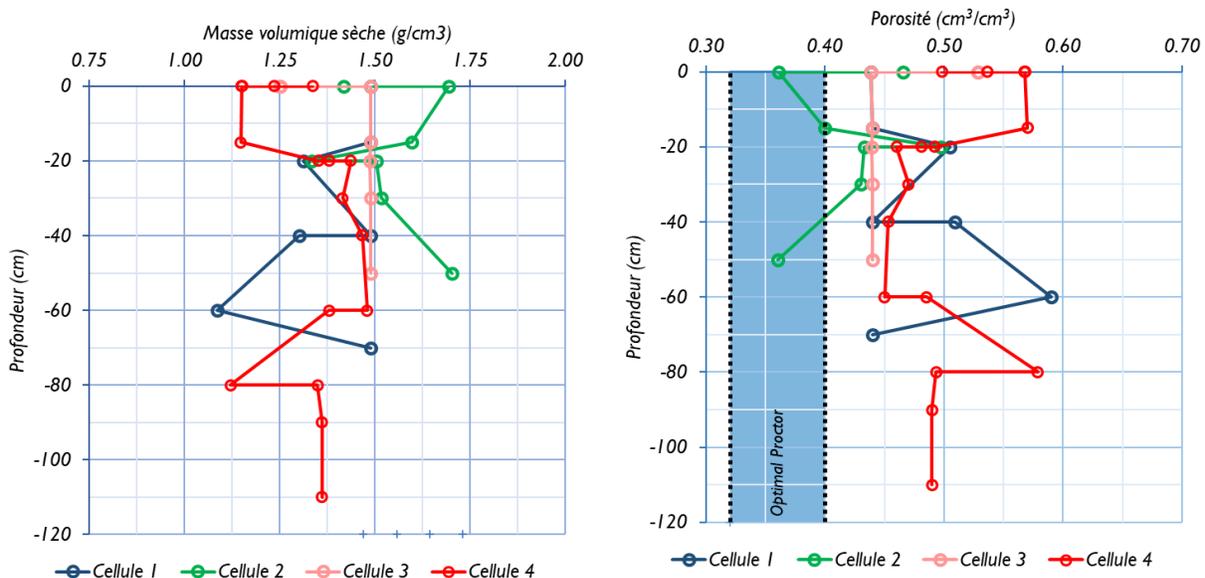


Figure 4–3 Variation en profondeur de la densité volumique sèche (gauche) et la porosité (droite) lors de la mise en place.

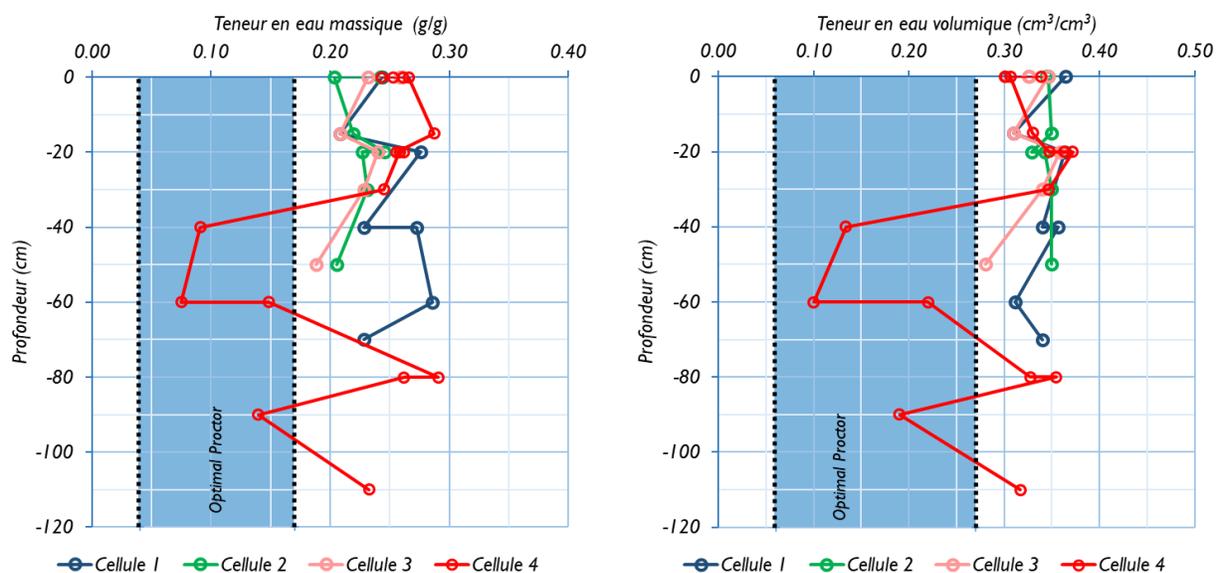


Figure 4–4 Variation en profondeur de la saturation (gauche) et le teneur en eau volumique (droite) lors de la mise en place.

En résumé, on peut constater que les meilleures conditions de compactage sont celles qui ont été rencontrées au niveau de la cellule 2. Les valeurs de la masse volumique sont plus faibles que les valeurs optimales, sauf pour les valeurs mesurées au niveau de la cellule 2. Concernant la porosité

on trouve que les valeurs mesurées sont plus élevées que les valeurs optimales à l'exception de la cellule 2. C'est-à-dire que le compactage des sols placés a été insuffisant.

Le compactage insuffisant est le résultat d'une faible énergie de compactage et une teneur en eau élevée. À cause de la géométrie des cellules et les conditions de construction, le compactage a été fait au moyen d'une plaque vibrante avec une force de compactage de 1030 kgf (10,1 kN); les résultats du control sur chantier (Figure 4-1 et Figure 4-5) montrent que cette énergie de compactage a été précaire. Un autre aspect pourrait également expliquer les résultats obtenus et qui est lié à la teneur en eau des matériaux lors du compactage qui étaient plus élevées que la teneur en eau optimale (les teneurs en eau massiques optimales déterminées au laboratoire varient entre 4 et 17%). Ainsi comme on peut le constater les valeurs mesurées au laboratoire et au moyen du nucleodensimètre sont toujours supérieures à 20%; ces teneurs en eau élevées sont liées aux conditions de terrain où les travaux ont été réalisés sous une faible pluie durant toute la période de construction des cellules.

La Figure 4-5 met en contraste les courbes de compactage à l'aide des essais Proctor réalisés au laboratoire et les mesures de masse volumique sèche et des teneurs en eau massiques réalisées lors de la mise en place des cellules. Sur cette figure, les zones de teneur en eau-masse volumique acceptables pour le silt ont été tracées selon la démarche proposée par Daniel et Benson (1990). Le silt est utilisé du fait qu'il présente une teneur en eau proche de la valeur moyenne des sols utilisés au laboratoire. La Figure 4-5 permet également de constater que même si les teneurs en eau sont au-dessus de la valeur optimale (comme souhaité afin d'avoir une faible conductivité hydraulique), les masses volumiques ne sont pas adéquates et de ce fait aucune valeur ne se trouve dans la zone acceptable du 95% du Proctor; toutefois une seule valeur se trouve dans la zone acceptable de 90% du Proctor et trois valeurs se trouvent dans la zone acceptable de 85% du Proctor. On peut observer également que les teneurs en eau massiques sont beaucoup plus élevées que les valeurs qui correspondent aux zones d'acceptabilité.

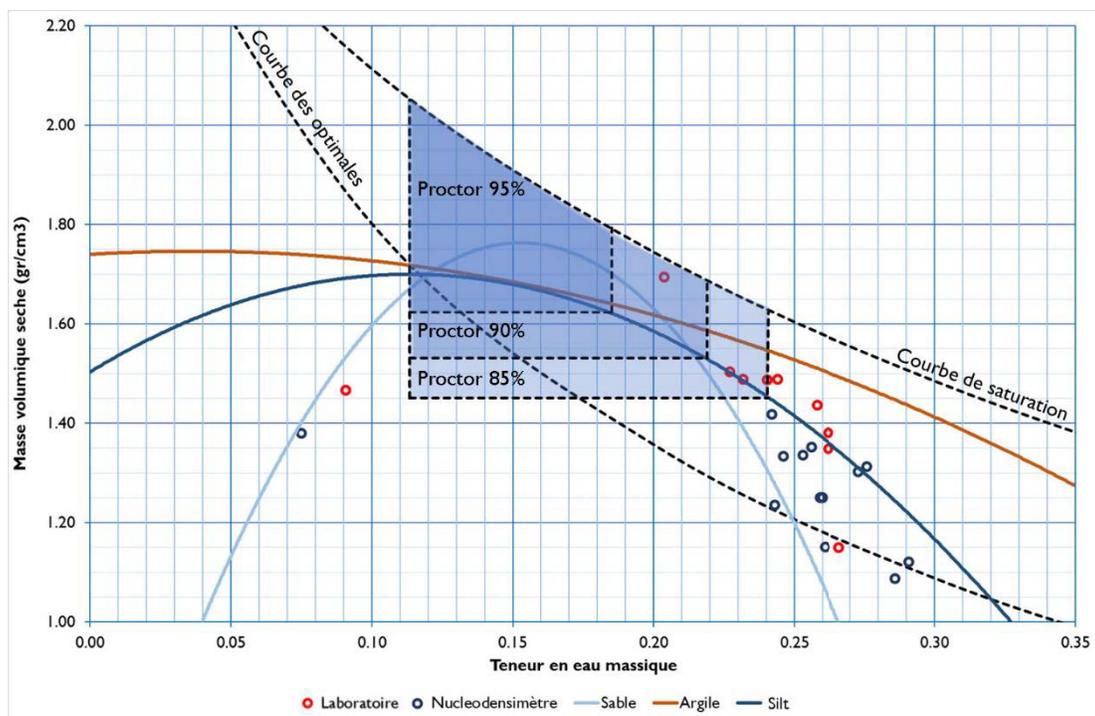


Figure 4–5 Comparaison des masses volumiques sèches des essais Proctor et celles mesurées sur le terrain.

En résumé, les conditions de mise en place des cellules montrent un mauvais compactage en raison de la mise en place des matériaux avec des teneurs en eau élevées en raison des conditions de pluie durant la période de construction. On observe aussi une variation importante au niveau des conditions de compactage pour les différentes couches et de ce fait les cellules peuvent montrer une hétérogénéité au niveau des différents paramètres mesurés ainsi qu’au niveau de leur comportement. Finalement, on constate que la cellule 2 présente des meilleures conditions de compactage et qui sont probablement liées à l’amendement avec du sable qui améliore la malléabilité des argiles. La discussion au sujet de ces aspects sera élargie dans les sections suivantes.

#### 4.1.2 Suivi des paramètres mesurés au niveau des stations de mesure

Dans cette section on présente les résultats des mesures réalisées au niveau des différentes stations de mesure et qui sont la température, les teneurs en eau volumiques, les succions et les débits de sortie. Également on présente les résultats des analyses statistiques permettant une meilleure description des différents paramètres mesurés.

Il est important de mentionner qu'entre le 12 avril et le 10 juin de 2022 et à la suite d'une défektivité du système d'acquisition liée à la fonte des neiges, les données relatives à la température et aux teneurs en eau volumiques n'ont pas été récupérées au niveau de la cellule 3. Également, une perte de données au niveau du datalogger des capteurs de succion a engendré une série de données manquantes dans la cellule 1 entre le 3 décembre de 2021 et le 10 juin de 2022.

#### 4.1.2.1 Température

Les données de température ont été mesurées avec des capteurs TEROS 11 et enregistrées en continu à l'aide des dataloggers. Les résultats des mesures réalisées au niveau des cellules 1 à 4 sont présentés respectivement de la Figure 4–6 à la Figure 4–9. Dans ces Figures on présente également les données de température de l'air enregistrées au niveau de la station météorologique de Rouyn (7086716) ainsi que celles mesurées sur le site. On peut y noter que les températures mesurées dans les recouvrements ont des oscillations qui suivent les cycles naturels de la température de l'air, c'est-à-dire que sa valeur minimale a été enregistrée en hiver et sa valeur maximale en été. Il est important de noter que les températures mesurées au niveau de la station météorologique ont une différence négligeable avec les températures enregistrées sur le terrain, ce qui montre qu'il n'existe pas une influence du vent qui souffle entre les lacs Osisko et Dufault sur la température mesurée.

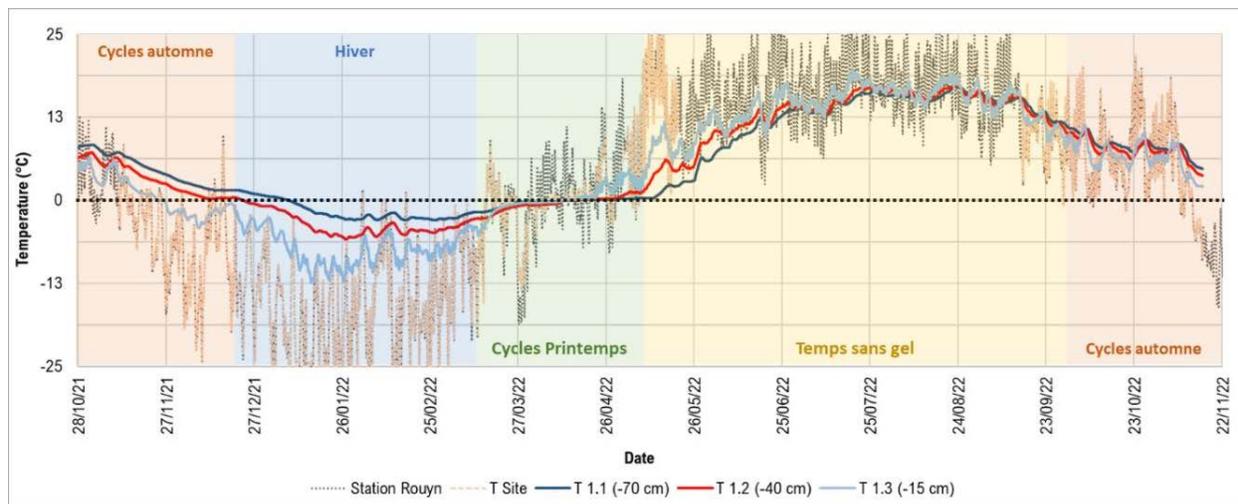


Figure 4–6 Variation de la température du sols au niveau de la cellule 1.

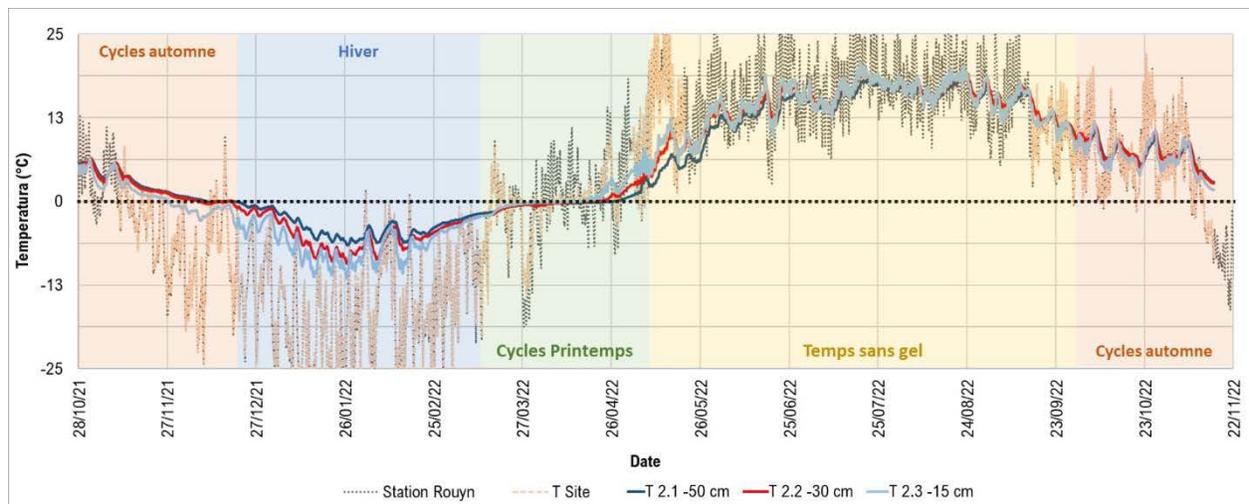


Figure 4-7 Variation de la température du sols au niveau de la cellule 2.

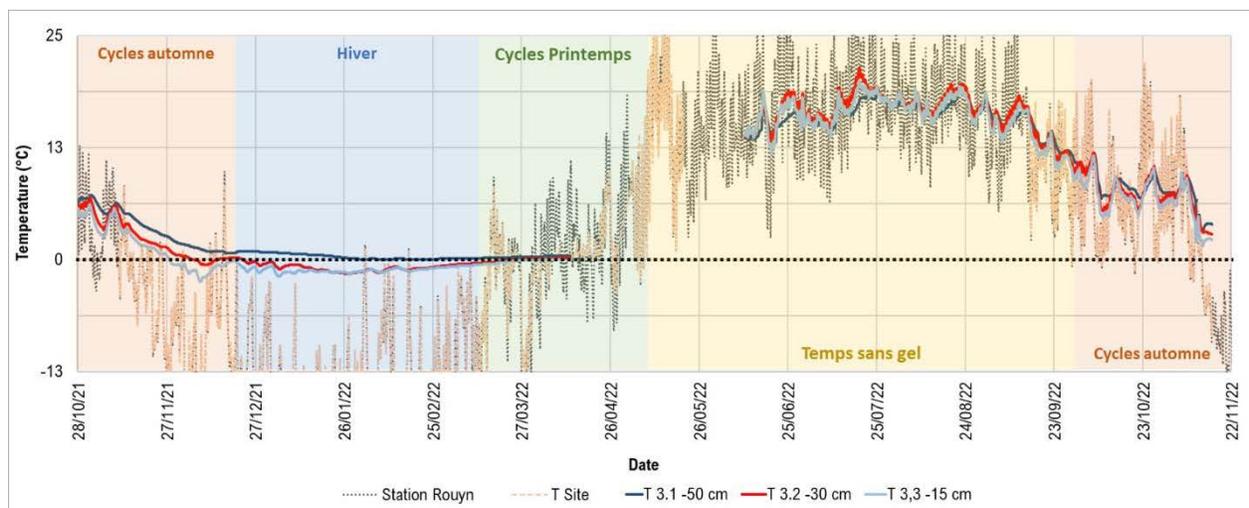


Figure 4-8 Variation de la température du sol au niveau de la cellule 3.

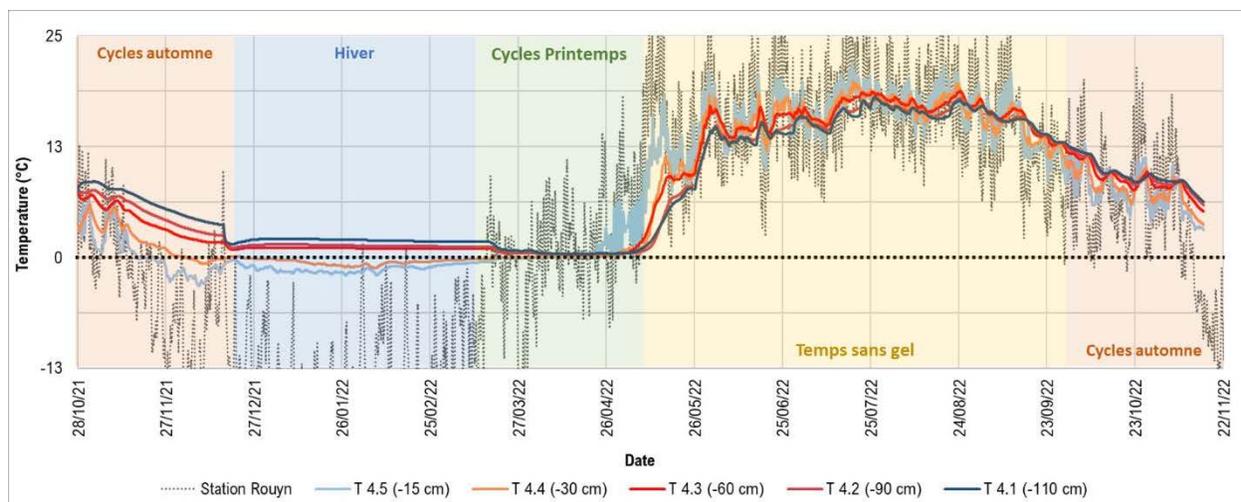


Figure 4–9 Variation de la température du sol au niveau de la cellule 4.

Également, la Figure 4–10 et Figure 4–11 montrent la distribution des données de température sous forme de diagramme de boîtes. Ces diagrammes sont présentés pour chacun des intervalles d'analyse (Tableau 3-5) et chaque niveau instrumenté. La Figure 4–10.a montre que les températures au niveau de la cellule 1 varient entre  $-12,4\text{ °C}$  et  $19,8\text{ °C}$ . Ces températures extrêmes ont été mesurées au niveau plus superficiel ( $-15\text{ cm}$ ) en hiver et été, respectivement. La moyenne annuelle pour l'ensemble de températures au niveau de la cellule 1 est de  $5,2\text{ °C}$ , qui est supérieur à la température moyenne annuelle dans l'air ( $3,0\text{ °C}$ , voir Tableau 3-4) durant la période observée.

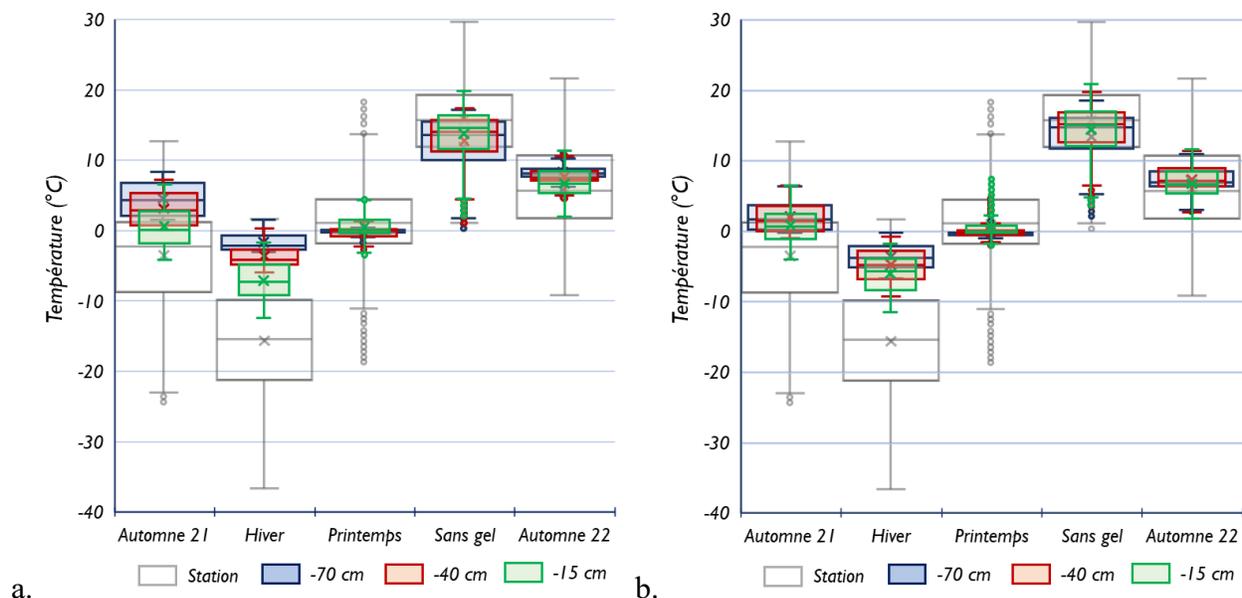


Figure 4–10 Distribution des données de température collectées dans la cellule 1 (a) et la cellule 2 (b) comparées avec les données de la station météorologique de référence.

Au niveau de la cellule 2, la moyenne annuelle des températures pour l'ensemble de la période est de 5,4 °C. Les températures mesurées varient entre -11,5 °C et 20,8 °C. Au niveau de la cellule 3 on a mesuré des températures entre -2,5 °C et 21,4 °C, avec une moyenne annuelle de 6,8 °C. Finalement au niveau de la cellule 4, les températures ont varié entre -3,2 °C et 22,0 °C, avec une valeur moyenne annuelle de 7,2 °C. Dans tous les cas les températures extrêmes ont été enregistrées aux niveaux les plus superficiels de suivi (-15 cm) en hiver et été, respectivement.

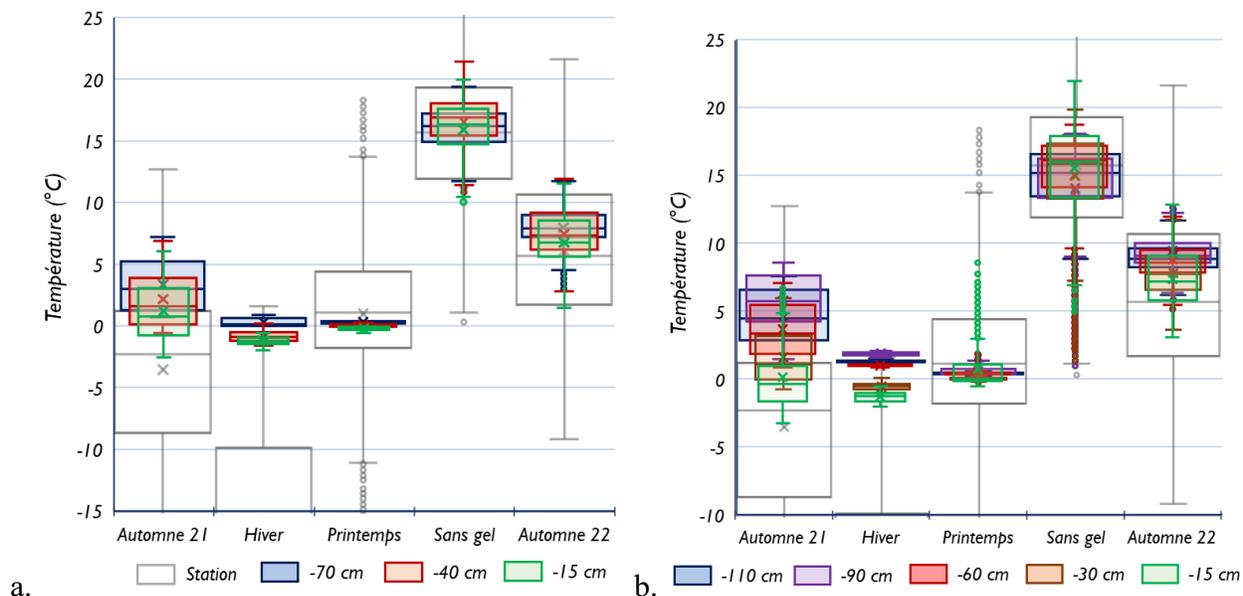


Figure 4–11 Distribution des données de température collectées dans la cellule 3 (a) et la cellule 4 (b) comparées avec les données de la station météorologique de référence.

La Figure 4–10 et la Figure 4–11 montrent aussi que la variation de la température est plus importante dans l'air qu'au niveau des cellules expérimentales. La plage de variation des températures dans l'air est de 66,3 °C (variant entre -36,6 et 29,7 °C) tandis qu'au niveau de la cellule 1 la plage est de 32,2 °C, au niveau de la cellule 2 de 32,3 °C, au niveau de la cellule 3 de 23,9 °C et au niveau de la cellule 4 est de 25,2 °C. Tel que prévu, les variations les plus importantes se trouvent aux niveaux de suivi les plus superficiels dans toutes les cellules et les amplitudes des plages sont reliés à la profondeur maximale du gel : plus le niveau du gel est profond, plus de variation est observée.

Afin d'illustrer les variations de la température en fonction de la profondeur et en fonction du temps les Figure 4–12 à la Figure 4–15 ont été préparées. L'axe des ordonnées représente la profondeur tandis que l'axe des abscisses représente le temps d'observation (du 27 octobre 2021 jusqu'à 15 novembre de 2022) et la valeur (couleur) des pixels, les températures spatialisés. La spatialisations faite sur l'axe des ordonnées est le résultat de l'interpolation des données mesurées par les capteurs installés à différentes profondeurs dans les cellules expérimentales. Ces figures ont également été utilisées pour évaluer l'étendue de la profondeur du front de gel au sein de chaque cellule expérimentale.

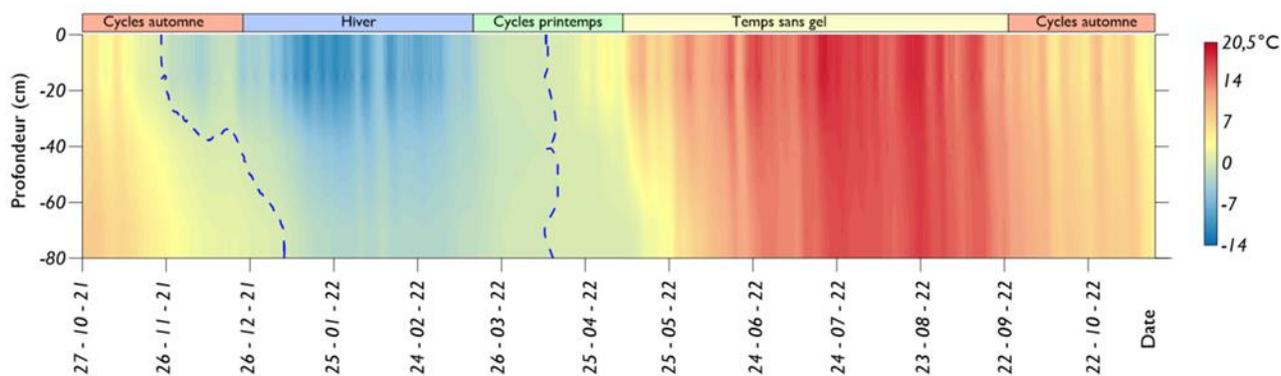


Figure 4–12 Cellule 1. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C.

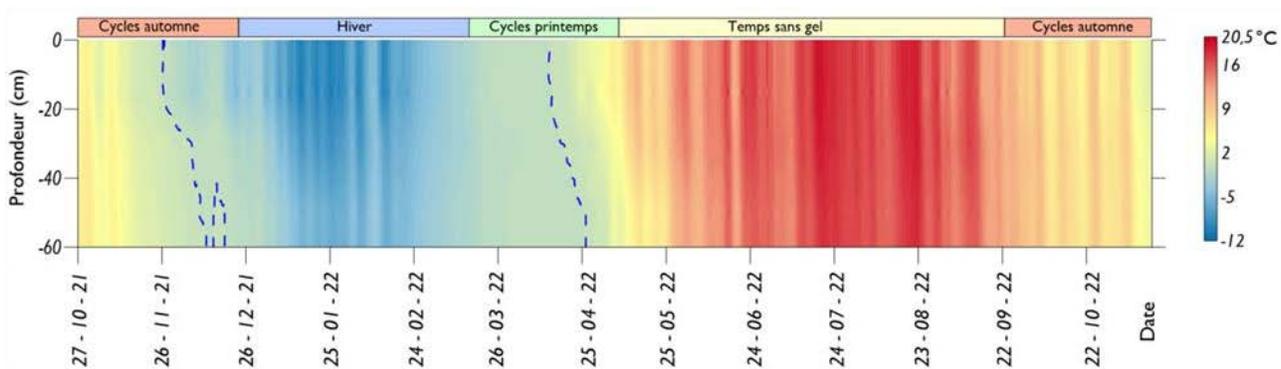


Figure 4–13 Cellule 2. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C.

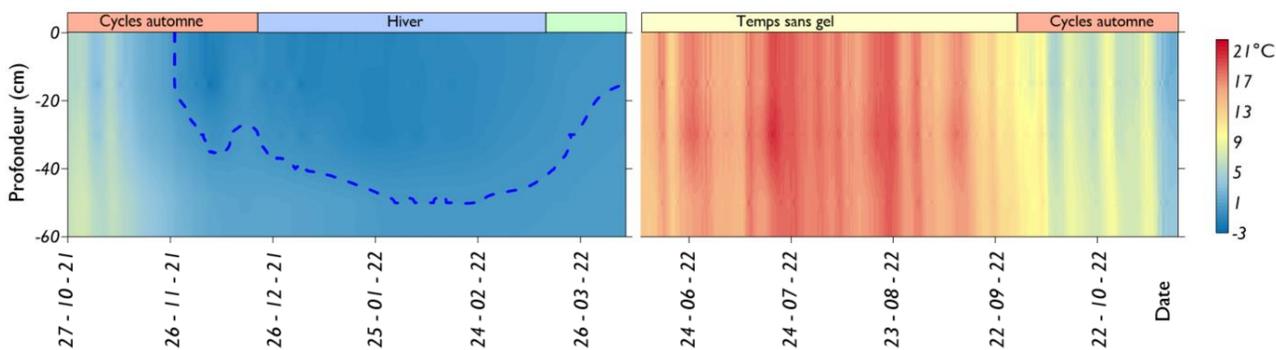


Figure 4–14 Cellule 3. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C.

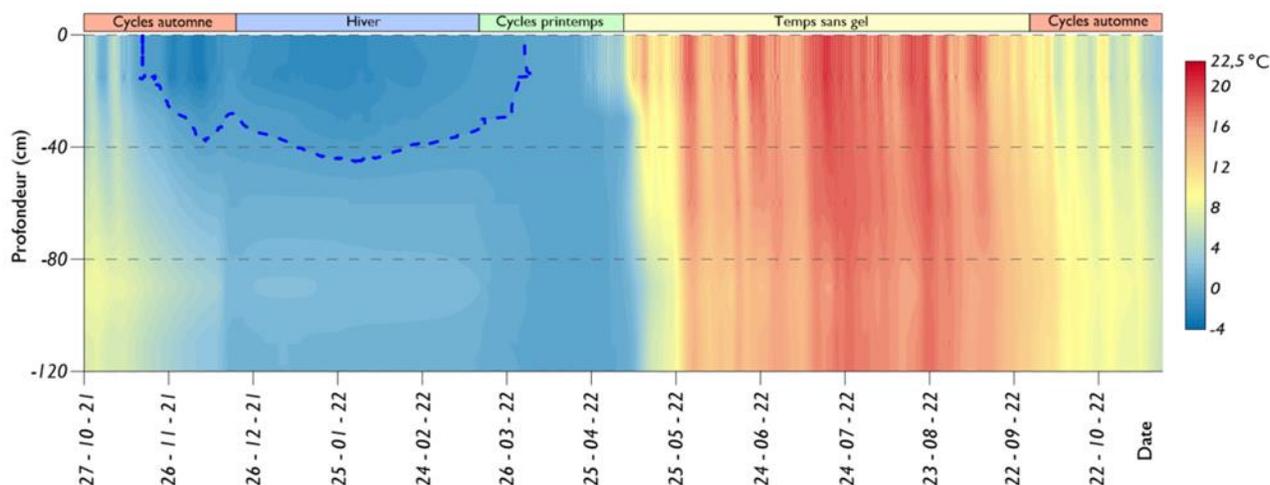


Figure 4–15 Cellule 4. Données spatialisées de la température du sol. La ligne bleu en pointillé représente la température de 0 °C

La spatialisation montrée dans la Figure 4–12 et la Figure 4–13 permet d’identifier que dans les cellules 1 et 2 le gel a atteint toute la profondeur du recouvrement simulé. La Figure 4–14 montre que d’après l’interpolation faite, le gel atteint une profondeur maximale de 50 cm, tandis que dans la Figure 4–15 on observe que la profondeur maximale correspond à 45 cm. Dans ces derniers cas, une partie du recouvrement est resté en dehors du front du gel. L’analyse minutieuse de ces données sera présentée dans la section 4.2.

#### 4.1.2.2 Teneurs en eau volumiques

Les teneurs en eau volumiques ont été mesurées au moyen de capteurs TEROs 11 et enregistrées en continu à l’aide des dataloggers. Toutes les données présentées dans cette section ont été corrigées à l’aide d’une courbe de calibration déterminée au laboratoire pour chaque matériau, les courbes de calibration utilisés sont présentés aux annexes. Les résultats de ces mesures réalisées au cours de la période d’observation sont présentés aux Figure 4–16 à la Figure 4–19 pour la cellule 1, 2, 3 et 4.

De façon général, les valeurs minimales des teneurs en eau volumiques ont été mesurées durant la période d’hiver; à cause des basses températures, l’eau n’est plus disponible (sous forme liquide) et les capteurs enregistrent des faibles valeurs. Ce comportement permet aussi de confirmer que les cellules 1 et 2 ont été sous des conditions de gel tandis que certains niveaux des cellules 3 et 4 n’ont

pas atteint une telle condition. Au contraire, les valeurs maximales ont été mesurées en printemps lors de la fonte des neiges où les sols atteignent une saturation complète.

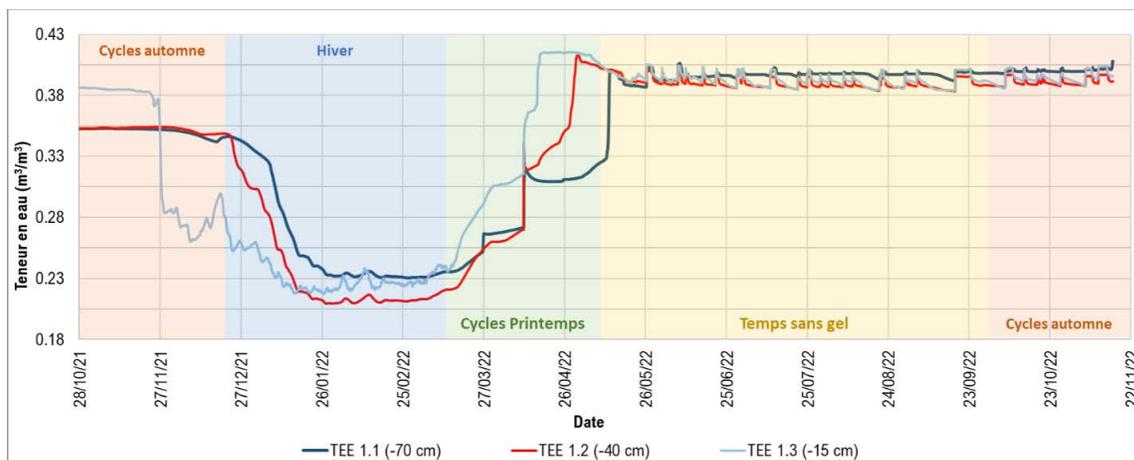


Figure 4–16 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 1.

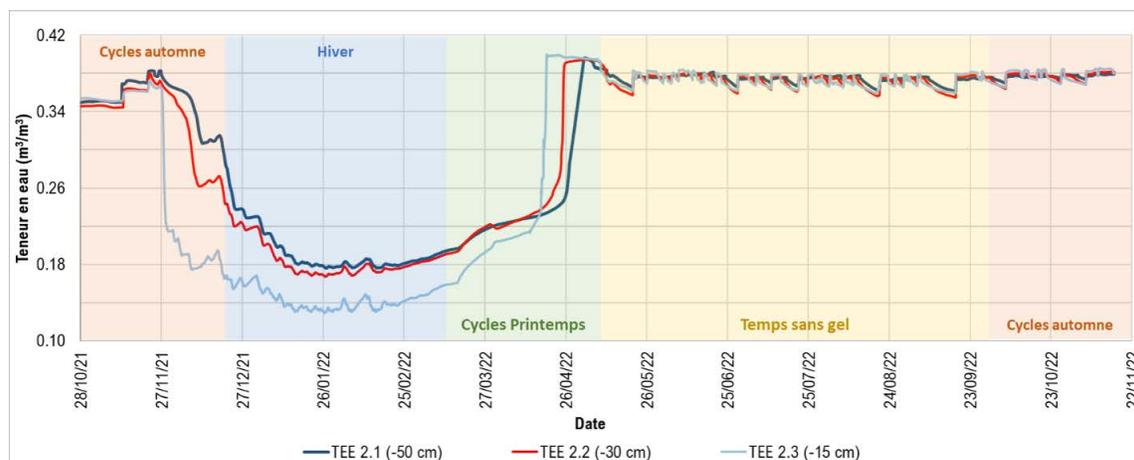


Figure 4–17 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 2.

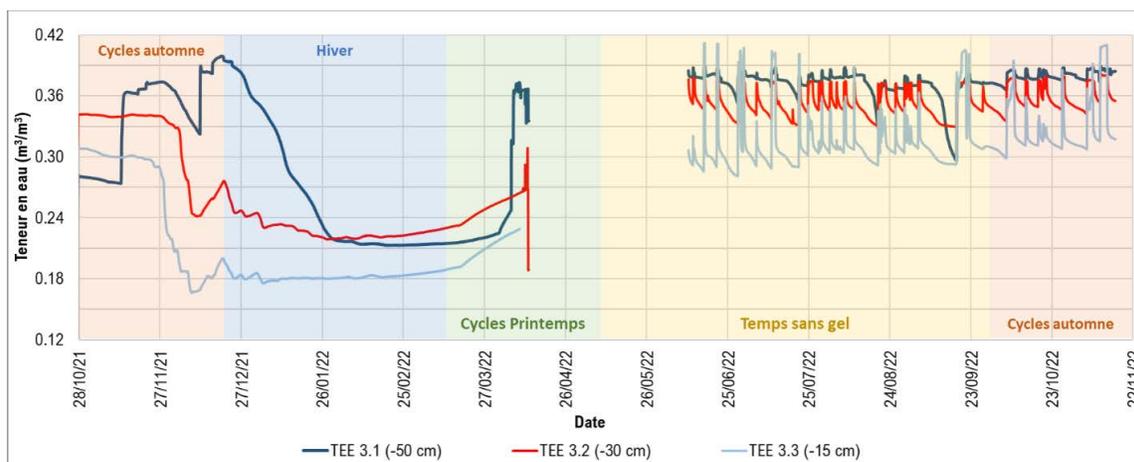


Figure 4–18 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 3.

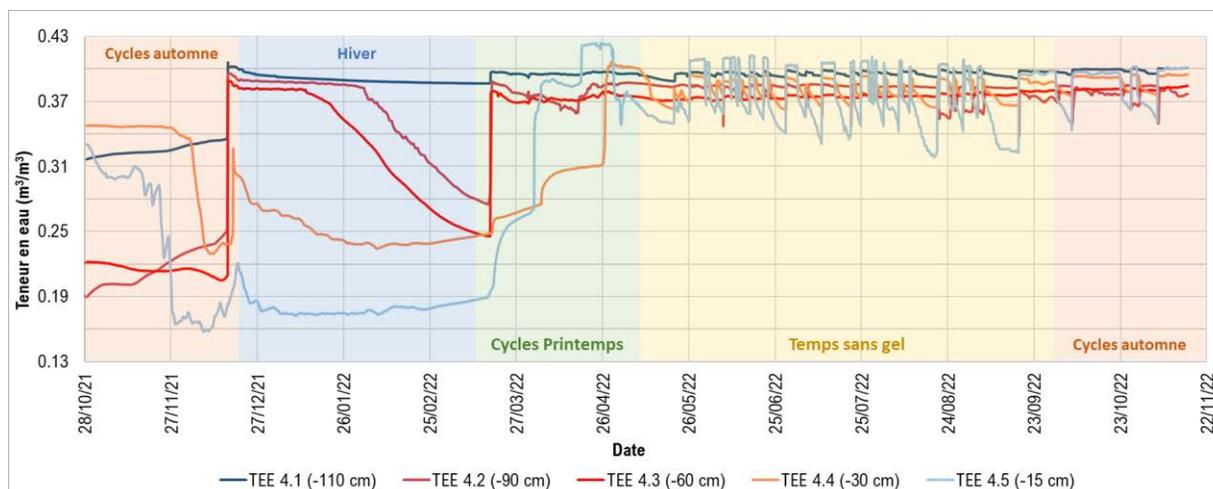


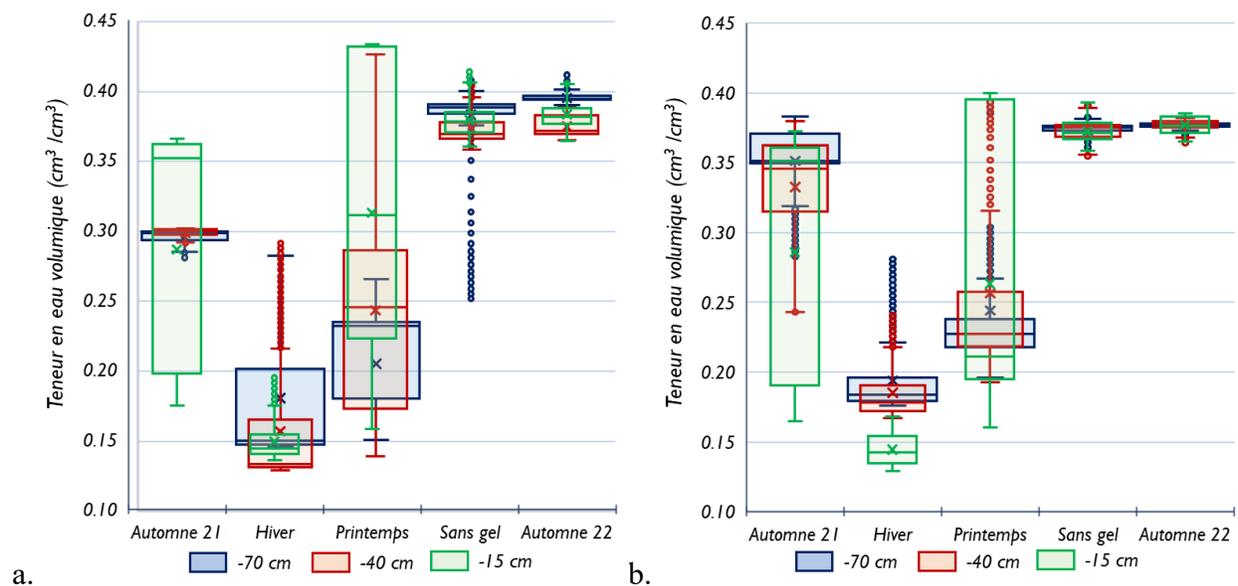
Figure 4–19 Variation des teneurs en eau volumiques au niveau de la cellule 4.

Au niveau de la cellule 1, la Figure 4–16 permet aussi identifier qu’il existe un décalage de deux semaines approximativement entre l’atteinte de la saturation complète entre deux niveaux instrumentés successifs : le niveau de 15 cm de profondeur l’atteint le 16 avril, le niveau de 40 cm de profondeur le 30 avril et le niveau à 70 cm de profondeur atteint le teneur en eau maximal le 12 mai. Au niveau de la cellule 2, le décalage pour atteindre la pleine saturation entre les niveaux instrumentés a été d’une semaine : la profondeur de 15 cm l’a atteint le 18 avril, la profondeur de 30 cm le 25 avril et le niveau à 50 cm de profondeur le 2 mai, tel qu’illustré dans la Figure 4–17. Au niveau de la cellule 4 (Figure 4–19), on observe que la saturation complète a été atteinte en deux moments : à la fin de l’automne, à la suite d’une fonte partielle de la neige le 16 décembre, pour la couche inférieure d’argile et la couche sableuse intermédiaire, et au printemps pour la couche supérieure d’argile.

Également, la Figure 4–20 et la Figure 4–21 montrent la distribution des données des teneurs en eau volumiques sous forme de diagramme de boîtes. Ces diagrammes sont présentés pour chacun des intervalles d’analyse et chaque niveau instrumenté.

Au niveau de la cellule 1 (Figure 4–20), les teneurs en eau volumiques varient entre 0,13 et 0,43. Les valeurs extrêmes ont été observés en hiver et en printemps (fonte des neiges), respectivement. La variation la plus importante a été enregistrée dans la période des cycles de printemps avec une plage de 0,29, tandis que la variation la plus faible correspond aux cycles d’automne 2022 avec une plage de 0,05.

Au niveau de la cellule 2 (Figure 4–20), les teneurs en eau volumiques varient entre 0,27 et 0,40, la plage de variation la plus importante a été enregistrée au printemps avec une valeur de 0,24 et la plage la plus faible aux cycles d’automne 2022 avec une valeur de 0,02, comme présenté dans la Figure 4–20.



a. b.  
Figure 4–20 Distribution des données des teneurs en eau volumiques collectées dans la cellule 1 (a) et la cellule 2 (b).

Au niveau de la cellule 3, la variation va de 0,17 jusqu’à 0,41 (voir Figure 4–21). Étant donné que le capteur n’a pas enregistré des données dans la saison de printemps, la plage la plus importante a été enregistrée pour la période d’automne 2021 qui correspond à 0,23; la plage la plus faible a été mesurée en automne 2022 avec une valeur de 0,11.

Finalement, au niveau de la cellule 4, les teneurs en eau volumiques varient entre 0,16 et 0,42. La plage de variation la plus importante a été enregistrée pour la période d’automne 2021 avec une valeur de 0,25 et la plage la plus faible aux cycles d’automne 2022 avec une valeur de 0,06, comme présenté dans la Figure 4–21.

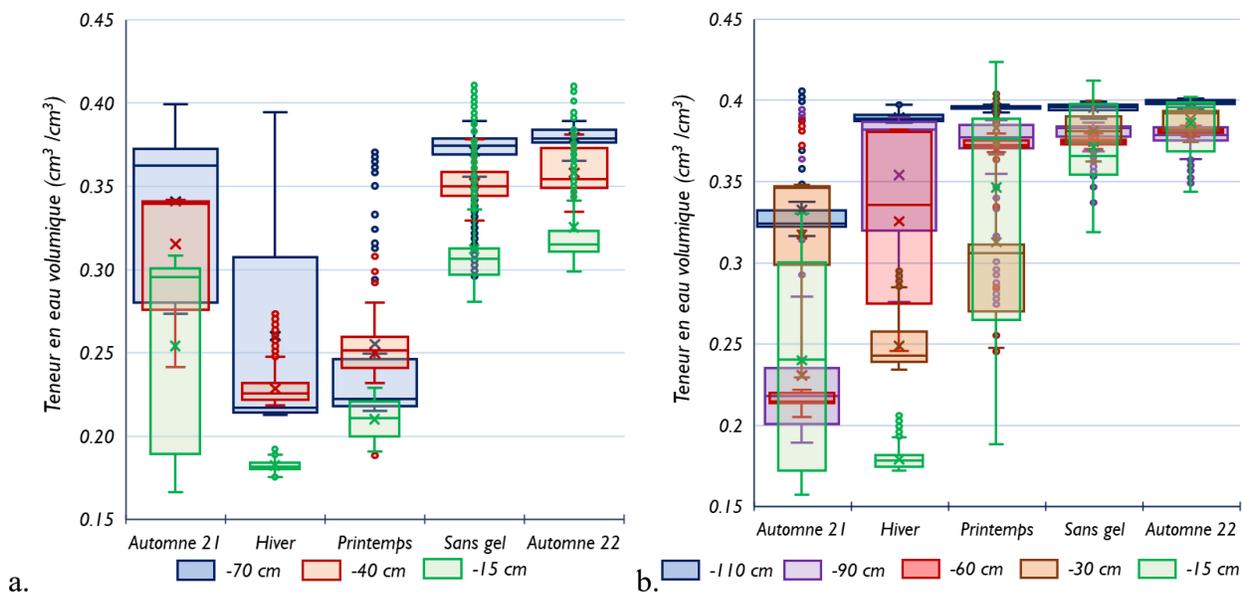


Figure 4–21 Distribution des données de teneurs en eau volumiques collectées dans la cellule 3 (a) et la cellule 4 (b).

Finalement, de la Figure 4–22 à la Figure 4–25 on présente les données spatialisées des cellules 1 à 4, respectivement. Sur l'axe des ordonnées, on trouve la profondeur, et sur l'axe des abscisses le temps. La spatialisation faite sur l'axe de la profondeur est le résultat de l'interpolation des données mesurées par les capteurs installés à chaque niveau de suivi.

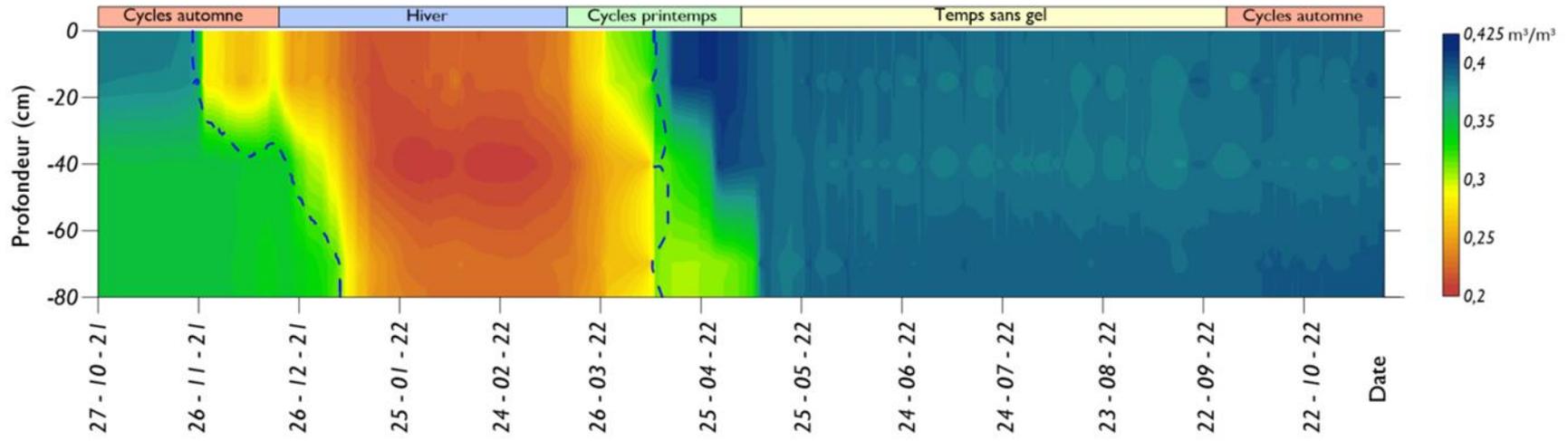


Figure 4-22 Cellule 1. Données spatialisées des teneurs en eau volumiques. La ligne bleu représente la température de 0 °C.

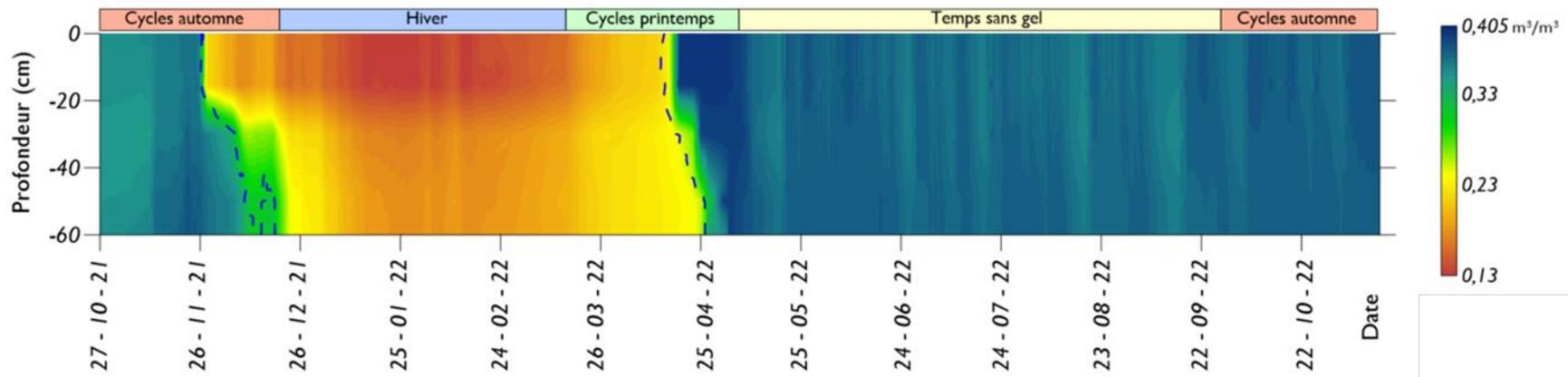
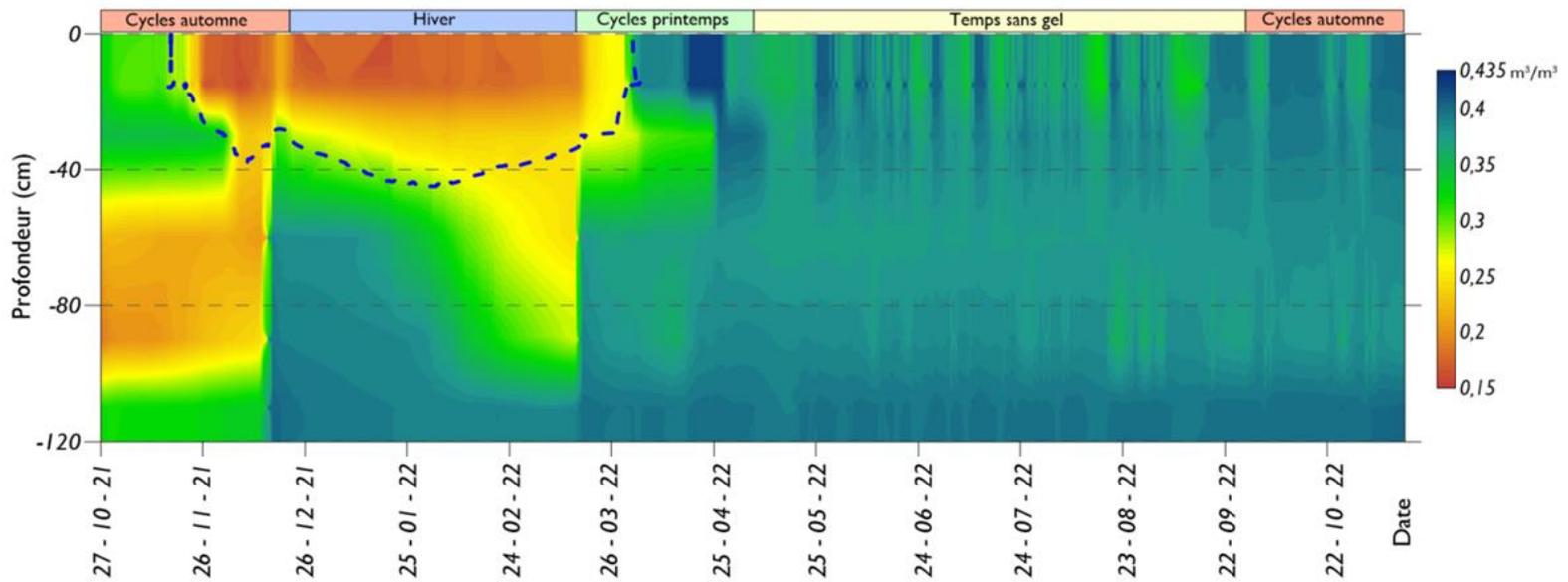
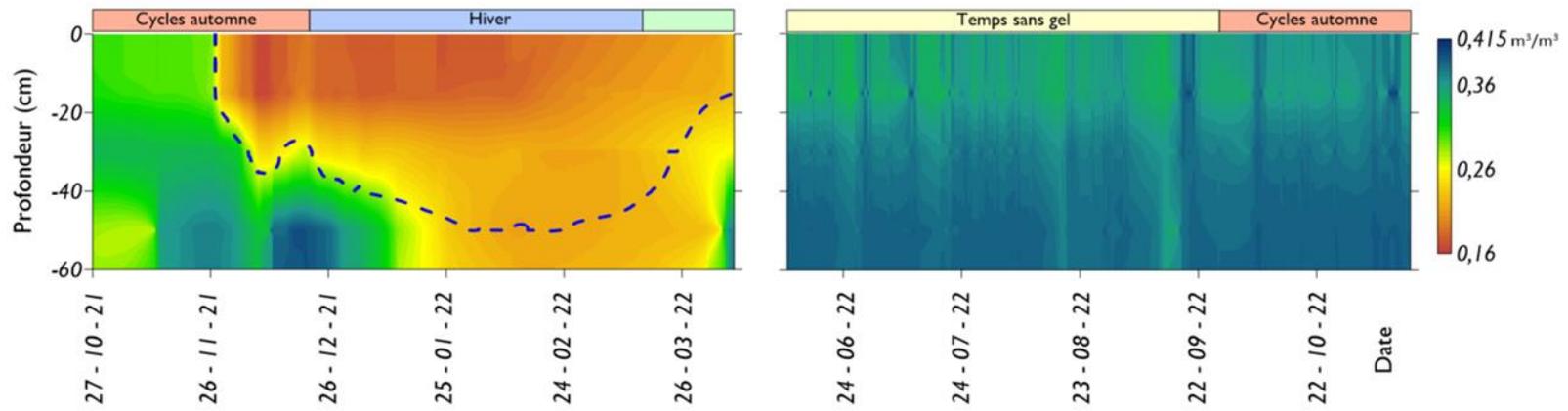


Figure 4-23 Cellule 2. Données spatialisées des teneurs en eau volumiques. La ligne bleu représente la température de 0 °C.



De façon générale, la Figure 4–22 à la Figure 4–25 permettent voir que les valeurs les plus faibles dans toutes les cellules ont été mesurées durant la saison d’hiver, comme conséquence du gel de l’eau. Les figures permettent voir aussi l’impact de la fonte des neiges sur les teneurs en eau volumiques augmentent à la suite de la fonte des neiges, en commençant par les niveaux plus élevés vers les niveaux plus profondes. Également, sur les quatre figures on observe une variation plus faible des teneurs en eau volumiques pour les périodes « sans gel » et « automne 2022 ».

#### 4.1.2.3 Succion matricielle

Les succions ont été mesurées au moyen des capteurs Watermark et enregistrées en continue à l’aide des dataloggers. Les résultats des mesures sont présentées aux Figure 4–26 à la Figure 4–29 respectivement pour les cellules 1, 2, 3 et 4.

Comme pour les capteurs de teneur en eau, durant la période d’hiver à cause des basses températures l’eau n’est plus disponible sous forme liquide et les capteurs de succion enregistrent de fortes valeurs. Ainsi, les valeurs maximales dans les quatre cellules correspondent à la limite du capteur, soit 254 kPa. Quant aux valeurs minimales, elles correspondent à 0 kPa, qui est la valeur mesurée lorsque l’état de saturation du sol est atteint. De façon général, les données des succions permettent de confirmer les niveaux qui ont été affectés par le gel et les moments où la saturation est atteinte (voir Figure 4–32 à Figure 4–35).

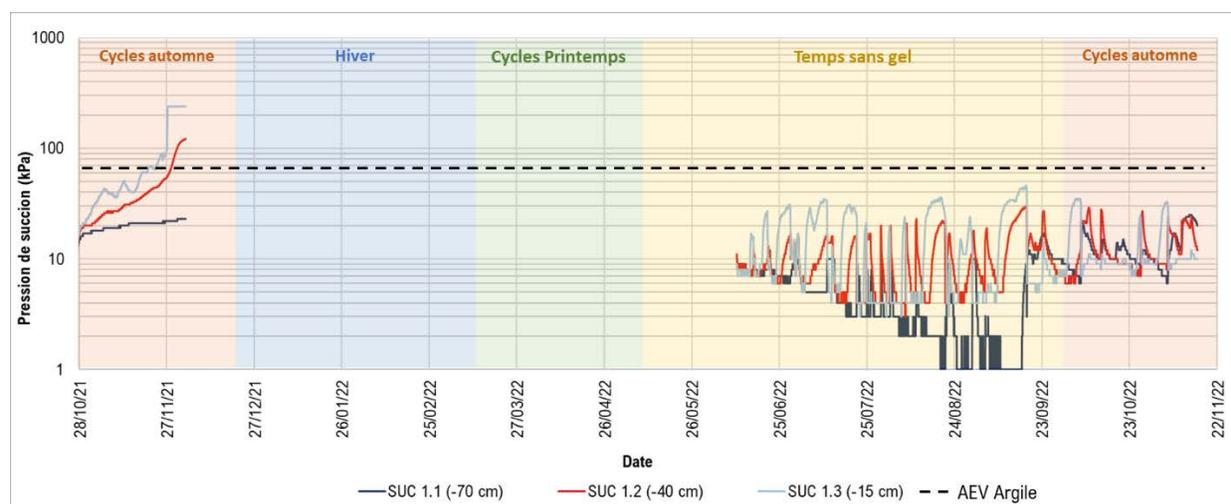


Figure 4–26 Variation de la succion au niveau de la cellule 1 durant la période d’observation.

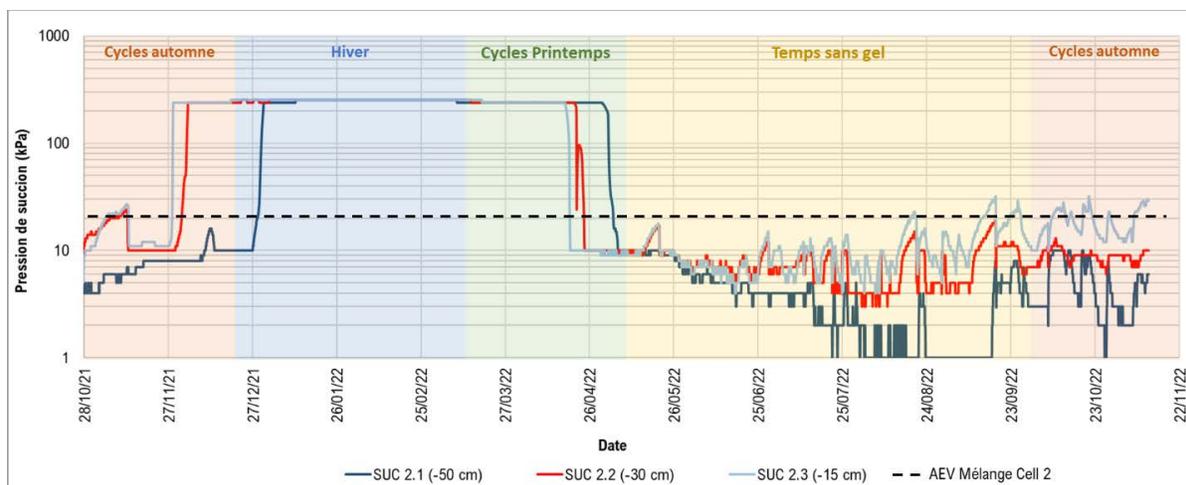


Figure 4-27 Variation de la succion au niveau de la cellule 2 durant la période d'observation.

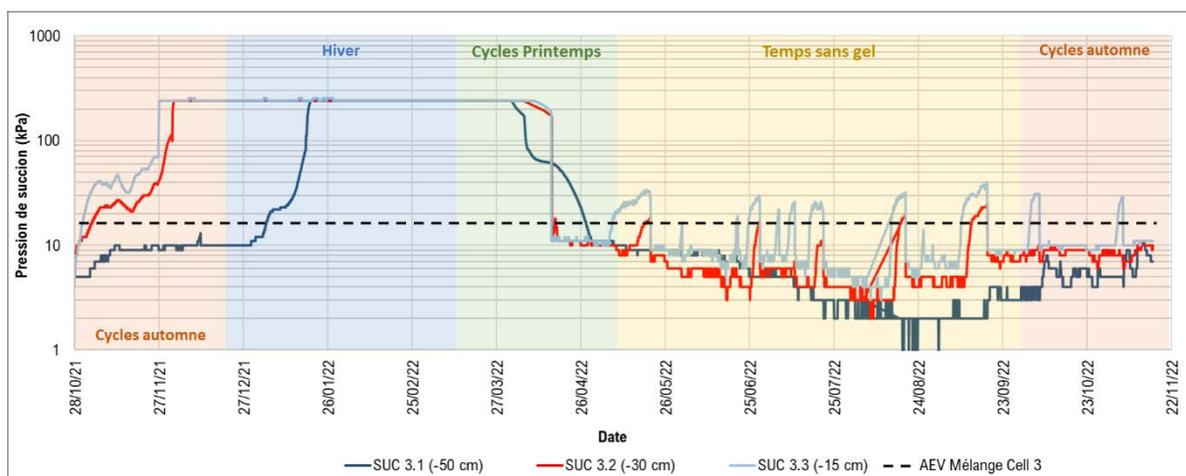


Figure 4-28 Variation de la succion au niveau de la cellule 3 durant la période d'observation.

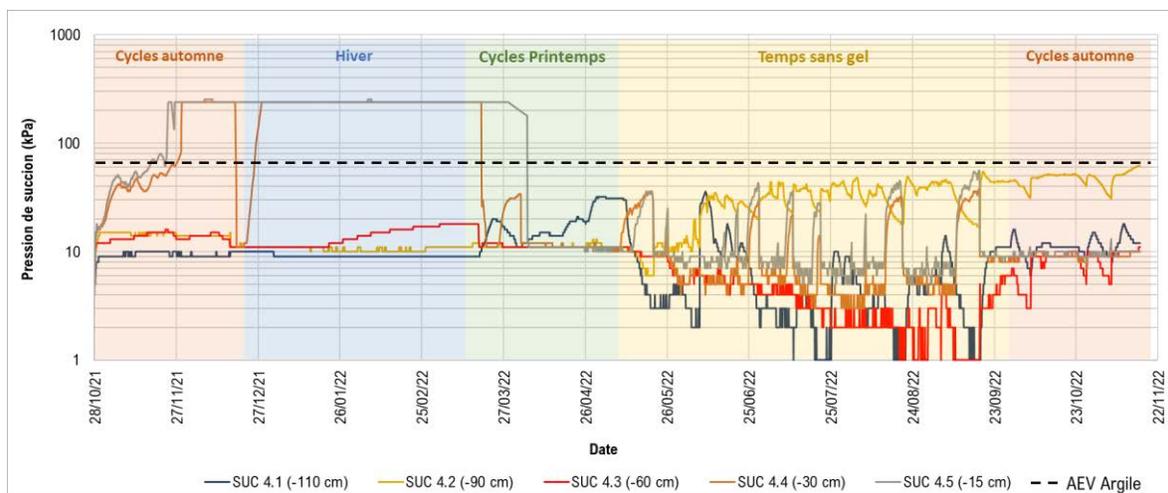


Figure 4-29 Variation de la succion au niveau de la cellule 4 durant la période d'observation.

La Figure 4–26 et la Figure 4–30 montrent que la variation des succions au niveau de la cellule 1 sont importantes durant la saison d’automne 2021, tandis que durant la période « sans gel » la plage de variation est de 46 kPa et 29 kPa en automne. On peut noter que la valeur d’entrée d’air de l’argile, qui correspond à 66 kPa, n’a été atteinte que durant l’automne 2021 (à cause du gel de l’eau dans le sol), confirmant ainsi que la désaturation du recouvrement n’a pas eu lieu. La succion maximale mesurée (sans inclure les périodes de gel) correspond à 46 kPa en été et 35 kPa en automne 2022.

Au niveau de la cellule 2, la succion maximale mesurée correspond à 32 kPa, tant en été comme en automne 2022 (voir Figure 4–30), en variant jusqu’à atteindre la saturation (0 kPa). Pour ce matériau, la valeur d’entrée d’air correspond à 20 kPa, étant dépassé plusieurs fois dans le niveau situé à 15 cm de profondeur depuis la fin de l’été (voir Figure 4–27), de ce fait, la partie superficielle du recouvrement a connu une désaturation dans ces périodes. Les succions aux niveaux les plus profonds n’ont pas atteint l’AEV, et de ce fait ils sont restés saturés de façon permanent.

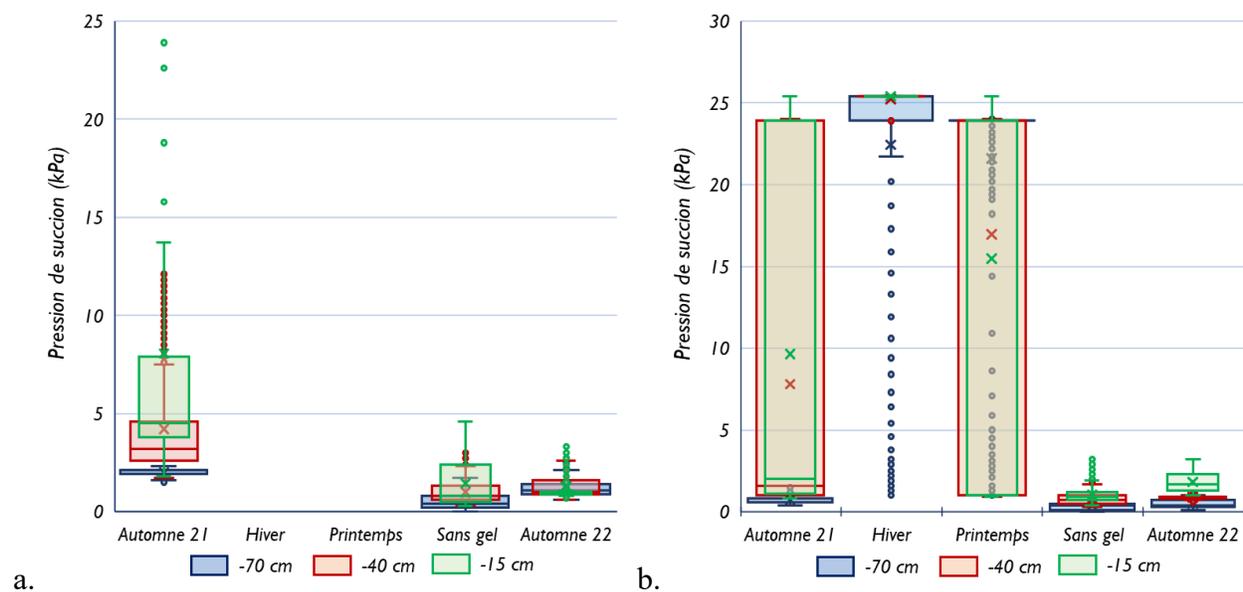


Figure 4–30 Distribution des succions mesurées dans la cellule 1 (a) et la cellule 2 (b).

Au niveau de la cellule 3, la succion maximale mesurée correspond à 40 kPa en été et 31 en automne 2022 (voir Figure 4–31), en variant jusqu’à des succions de 1 kPa et 3 kPa, respectivement. La valeur d’entrée d’air de l’argile amendée dans la cellule 3 est de 16 kPa; cette valeur a été dépassée fréquemment à proximité de la surface (-15 cm) et sporadiquement au niveau

de centre du recouvrement (Figure 4–28). Ces périodes de désaturation ne sont pas continus et sont liés aux conditions météorologiques qui favorisent l'évaporation. Les succions au niveau le plus profond n'ont pas atteint l'AEV, et de ce fait il est resté saturé.

Au niveau de la cellule 4, la succion maximale mesurée durant la période « sans gel » est de 56 kPa et de 62 durant l'automne de 2022 (Figure 4–31), de ce fait les argiles ont demeuré saturées durant la période d'observation (au-dessous de 66 kPa) après la fonte des neiges. Quant à la couche de sable silteux (AEV = 7 kPa), sa désaturation a été observée comme désirée afin de créer l'effet de barrière capillaire.

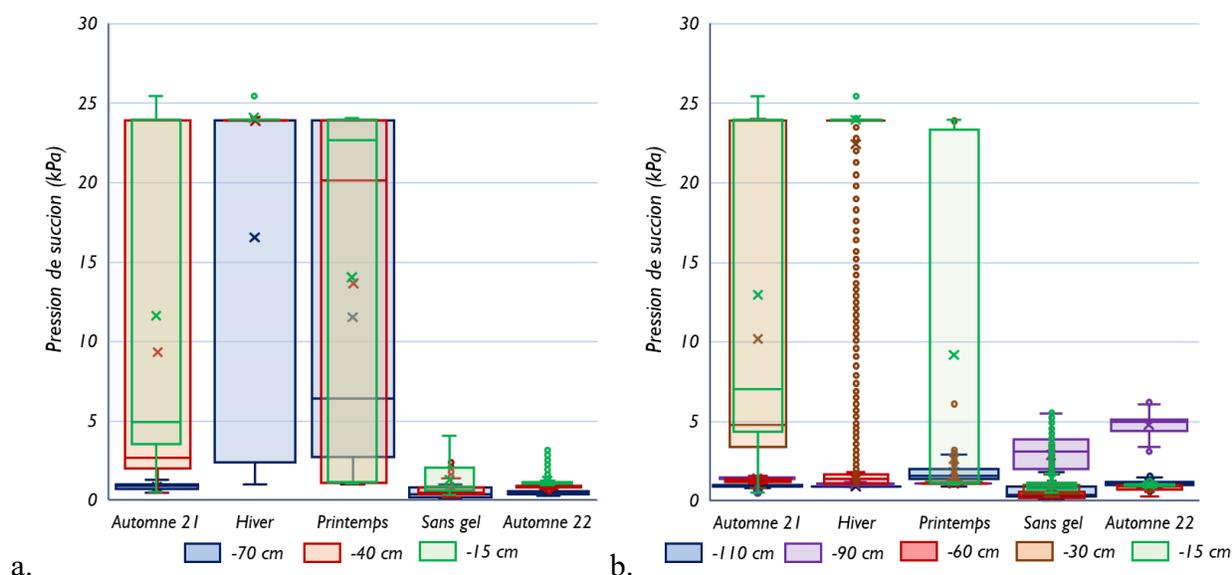


Figure 4–31 Distribution des données de la pression de succion collectées dans la cellule 3 (a) et la cellule 4 (b).

Finalement, de la Figure 4–32 à la Figure 4–35 on présente les données des succions au niveau des cellules 1, 2, 3 et 4 spatialisées, respectivement. La Figure 4–33 montre qu'il existe une correspondance entre les zones identifiées pour la cellule 2, à partir des données de température et des succions. Cependant, la Figure 4–34, montre que les capteurs de succion installés dans la cellule 3 mesurent des valeurs élevés ( $> 200$  kPa) dans toute l'épaisseur du recouvrement même si la température mesurée en profondeur (-50 cm) reste supérieure à  $0$  °C. c'est-à-dire que d'après les données des succions tout le recouvrement a été affecté par le gel.

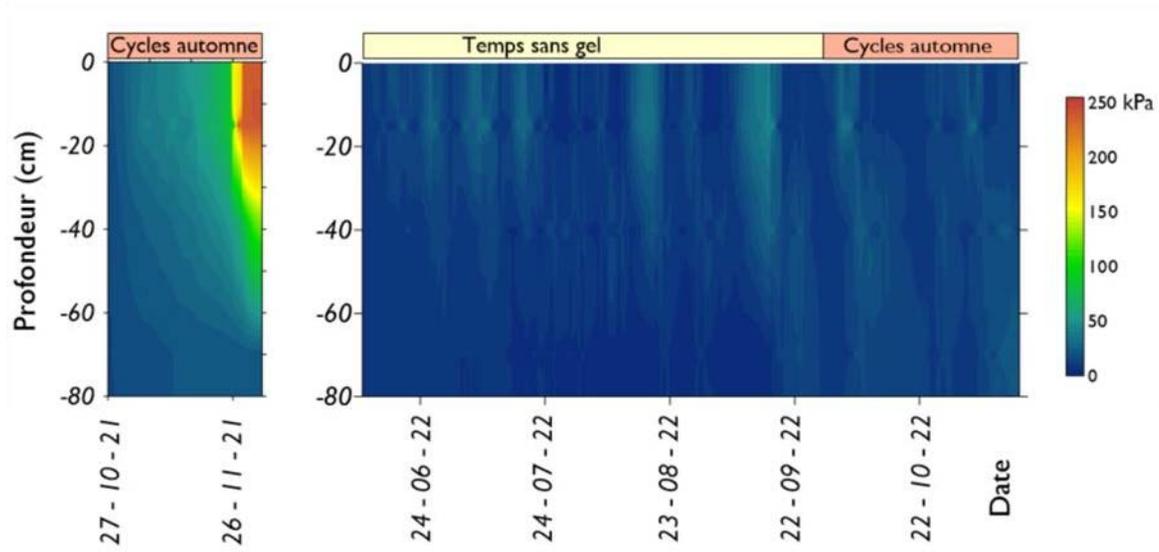


Figure 4-32 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 1.

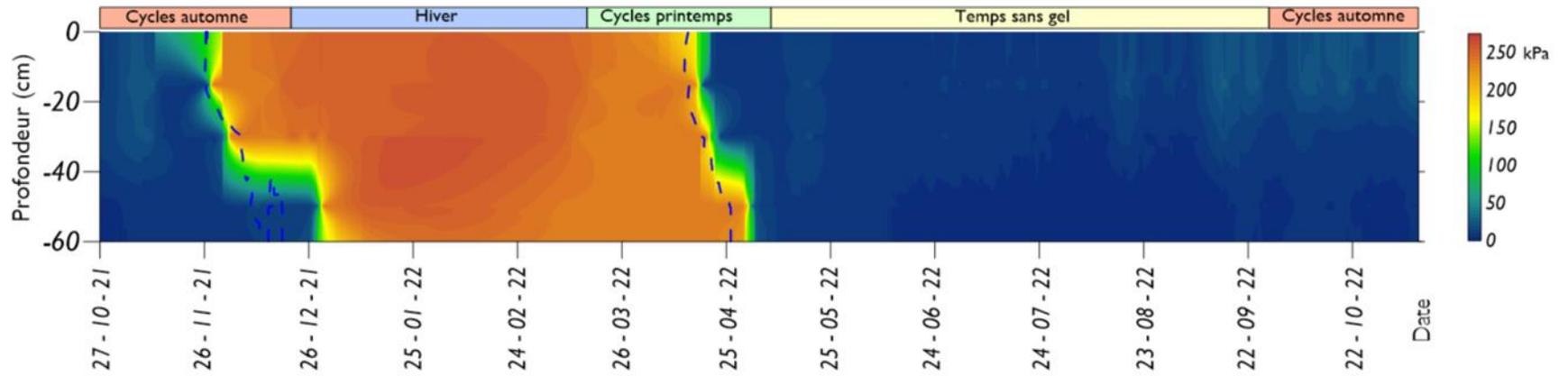


Figure 4-33 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 2. La ligne bleu représente la température de 0 °C.

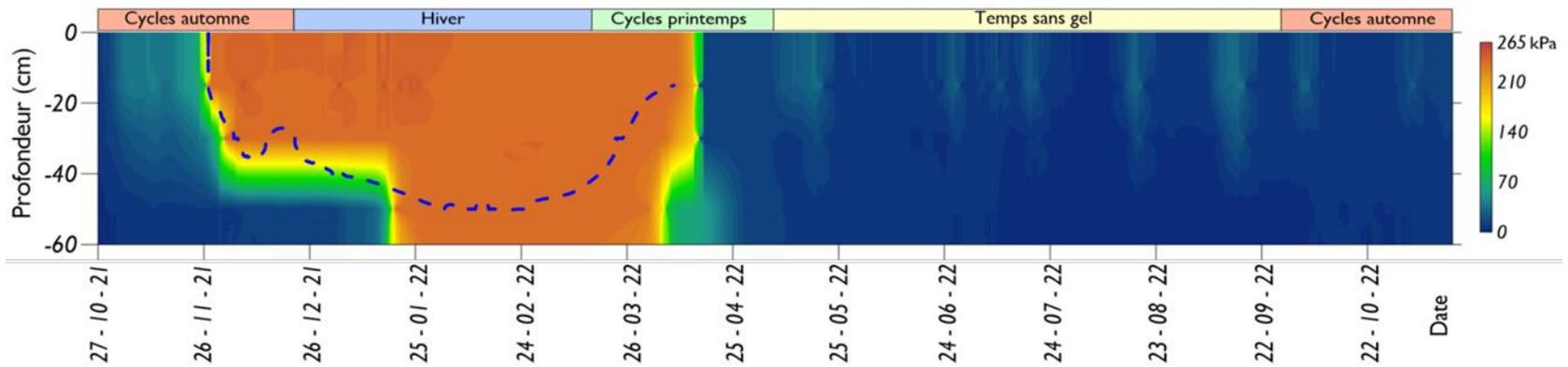


Figure 4–34 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 3. La ligne bleu représente la température de 0 °C

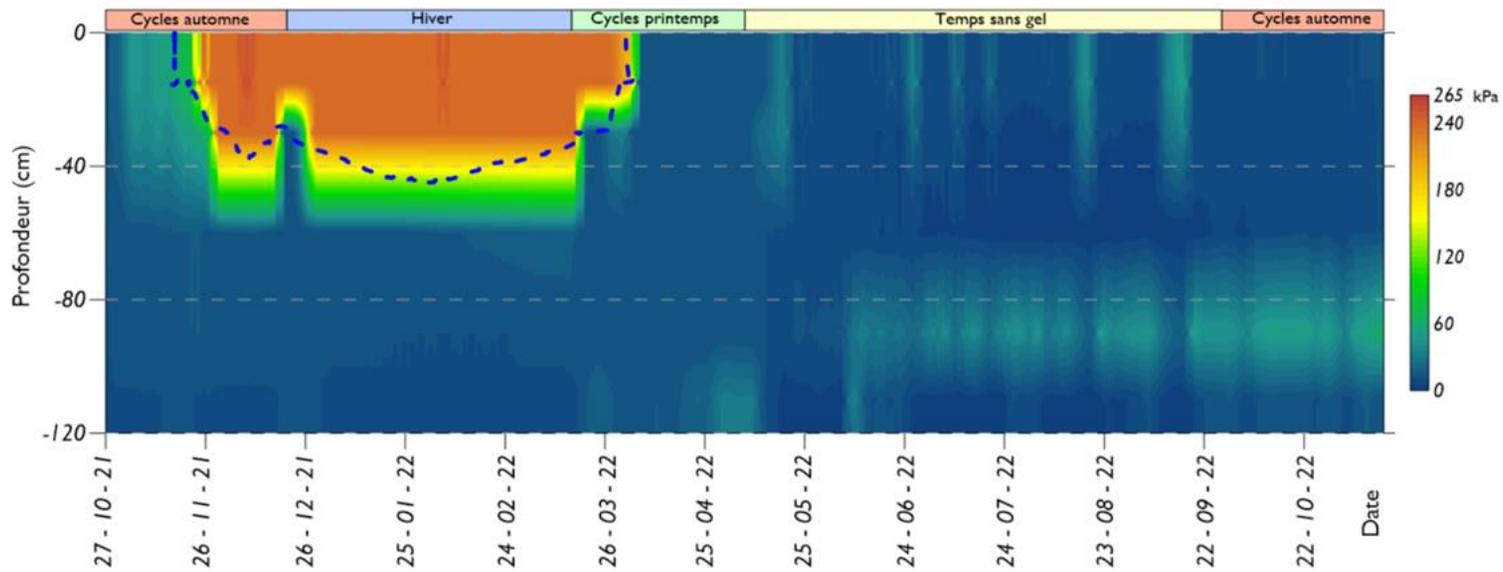


Figure 4–35 Données spatialisées des succions au sein de la cellule 4. La ligne bleu représente la température de 0 °C

Au niveau de la cellule 4, la Figure 4–35 montre que les capteurs de succion n’ont pas été affectés par le gel à l’exception de la couche supérieure d’argile. Dans ce cas les observations sont cohérentes avec les zones définies à partir de la température de 0 °C.

#### 4.1.2.4 Débits à la sortie des cellules

Tel que décrit dans la section 3.1.3, le débit à la base des cellules expérimentales a été mesuré à l’aide des débitmètres à bascule. Les données mesurées avec cet équipement ont été enregistrées de façon continue au moyen de dataloggers. Les débitmètres ont été installés au début de l’été, le 30 juin de 2022 et ont servi à faire le suivi jusqu’au 11 novembre.

Il est important de signaler que l’emplacement des débitmètres installés au niveau des cellules 3 et 4 ne permettait pas un drainage adéquat des eaux sortant des débitmètres. Même après certaines adaptations et lors des fortes pluies, le niveau de l’eau dans le bassin de sortie dépassait le niveau de fonctionnement des débitmètres (avec liberté de basculer) (voir Figure 4–36). De ce fait, les débits au niveau des cellules 3 et 4 peuvent être sous-estimés; malgré cela, les valeurs mesurées permettent de tirer les conclusions par rapport au fonctionnement et à la performance des recouvrements qui font l’objet de cette étude.



Figure 4–36 Conditions de drainage en aval des débitmètres de la cellule 1 (gauche) et la cellule 3 (droite) le 30 juin 2022.

L’évolution des débits journalières de sortie au cours de la période observée dans la cellule 1, 2, 3 et 4 sont présentées respectivement aux Figure 4–37 jusqu’à la Figure 4–40. Afin d’avoir des débits comparables aux précipitations, les débits sont présentés comme une hauteur d’eau équivalente. Étant donné que la hauteur de 1 mm représente un volume de 1 litre par mètre carré, la hauteur

équivalente est calculée en normalisant le volume mesuré par rapport à la surface de la zone d'apport de chacune des cellules, dont 40 m<sup>2</sup> pour les cellules 1, 2 et 3 et 70 m<sup>2</sup> pour la cellule 4. Les précipitations journalières sont également présentées dans les figures.

La Figure 4–37 montre qu'au niveau de la cellule 1, la hauteur journalière maximale mesurée correspond à 8,9 mm avec une moyenne de 2,7 mm. En regardant les pluies isolées (survenues après plusieurs jours sans précipitations), on peut observer que le débitmètre commence à basculer quelques heures (entre 6 et 8 h) après le début de la pluie et continue à mesurer des débits sortants pendant plusieurs jours (entre 3 et 7 j en fonction de l'intensité de la pluie).

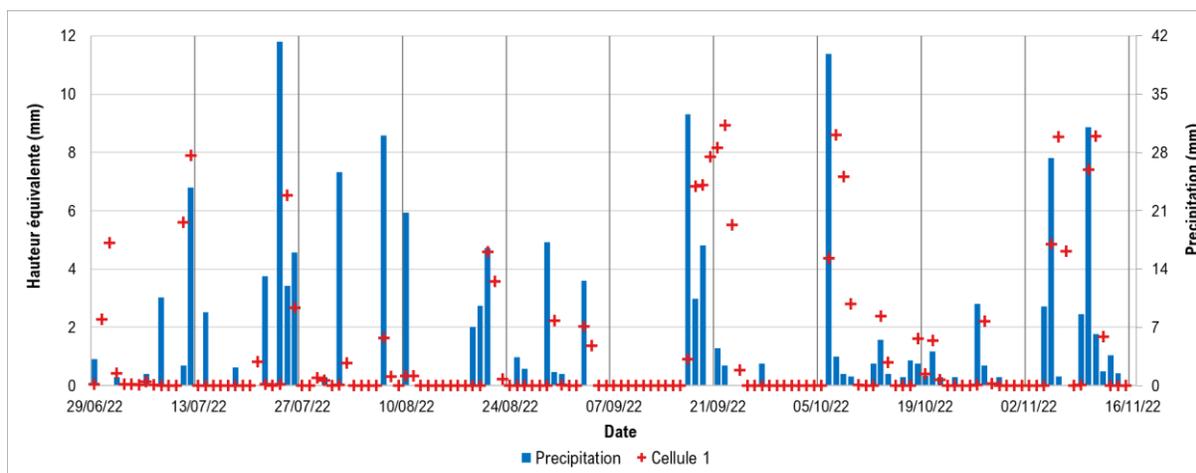


Figure 4–37 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 1.

Au niveau de la cellule 2 (Figure 4–38), la hauteur journalière maximale est de 6,2 mm et la hauteur journalière moyenne 2,0 mm. Dans cette cellule, la réponse du débitmètre se passe en deux temps : quelques heures après le début de la pluie (3 h), le débitmètre a une première réponse qui dure plusieurs heures (jusqu'à 20 h), ensuite l'infiltration s'arrête quelque jours (entre 1 et 3 j) et après l'écoulement recommence durant plusieurs jours (jusqu'à 7 jours).

Au niveau de la cellule 3 (Figure 4–39), la hauteur journalière équivalente moyenne est de 3,5 mm avec une valeur maximale de 32,8 mm. La description du comportement de l'écoulement dans cette cellule n'est pas évidente due à la perte de données à la suite des fortes pluies, néanmoins pour certaines pluies on constate que la réponse du débitmètre se passe en deux temps pareillement à la cellule 2 mais avec des débits plus importants et un temps plus courts (jusqu'à 4 j après le début de la pluie).

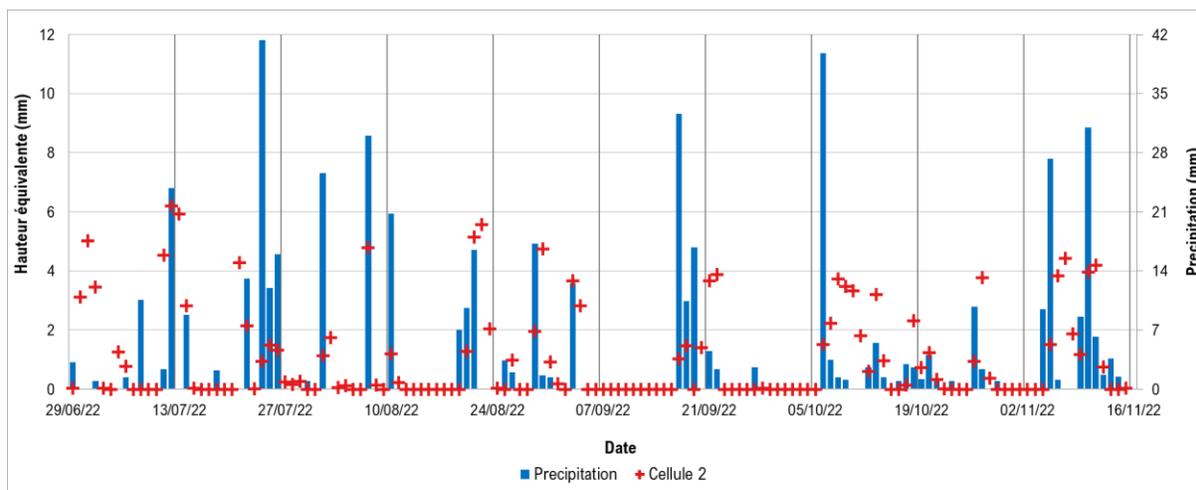


Figure 4–38 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 2.

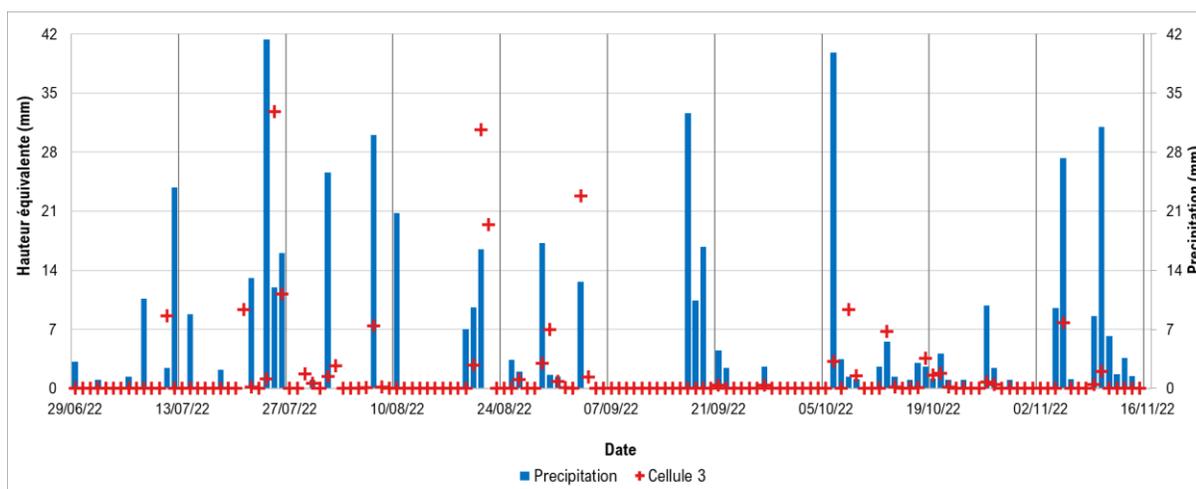


Figure 4–39 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 3.

Finally at the level of cell 4, we found a maximum height of 10.9 mm and an average height of 1.0 mm for the entire observed period. It is important to highlight that the measured discharges in summer are higher than those measured during autumn as shown in Figure 4–40. In this cell, the response of the flowmeter passes in two times as at the level of cell 2: in a first time (between 4 and 5 h after the start of the rain) the flowmeter has a first response that lasts up to 13 h, then the infiltration stops for a few days (between 4 and 6 j) and after the flow resumes for several days (up to 7 days).

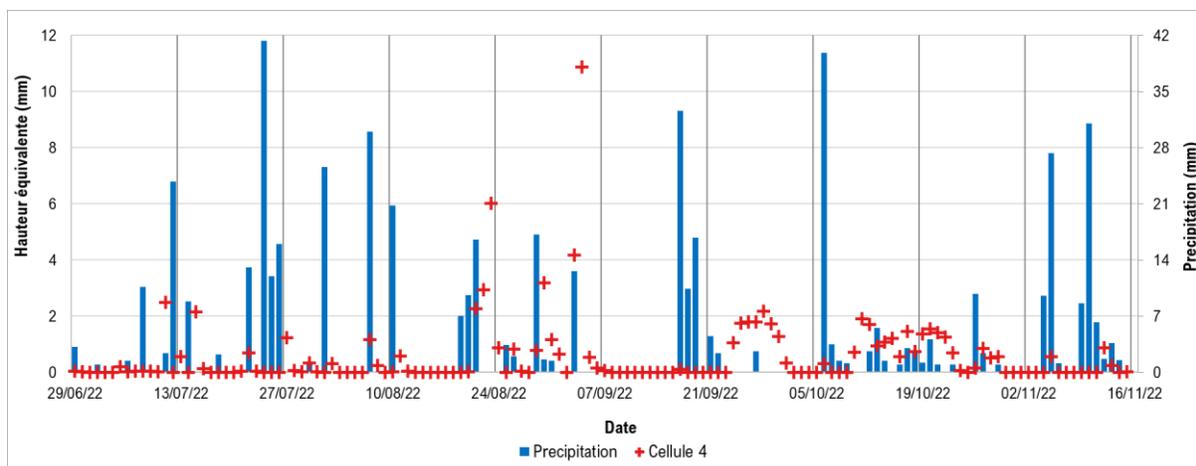


Figure 4–40 Évolution de la hauteur équivalente journalière de sortie au niveau de la cellule 4.

Ainsi, les volumes journaliers maximaux ont été mesurés au niveau de la cellule 3, suivi par la cellule 4 (en été), la cellule 1 et finalement la cellule 2. En comparant les hauteurs journalières moyennes, les valeurs les plus élevées ont été également mesurées au niveau de la cellule 3, suivi de la cellule 1, la cellule 2 et la cellule 4.

Finalement, la Figure 4–41 présente la distribution des données des volumes horaires sous forme de diagramme de boîtes pour chaque cellule. De façon général, durant la période de suivi, la hauteur maximale horaire de 4,7 mm a été mesurée au niveau de la cellule 3; cette valeur est 10 fois la valeur mesurée au niveau de la cellule 2, 9 fois la valeur mesurée au niveau de la cellule 1 et 5 fois le débit maximal mesuré au niveau de la cellule 4, cette différence est mise en évidence dans la Figure 4–41. Quant aux hauteurs horaires moyennes, on trouve une variation entre 0,37 mm calculée pour la cellule 3 et 0,09 mm calculée pour la cellule 4.

D'autre part, on peut observer que la cellule 4 montre un comportement particulier: durant l'été les débits mesurés sont plus grands que durant l'automne. Ainsi la hauteur horaire maximale en été est de 1 mm (voir Figure 4–41) tandis que celle de l'automne est de 0,26 mm (c'est-à-dire presque 4 fois plus faible, voir la Figure 4–40). L'analyse détaillée des données vis-à-vis des hypothèses de recherche sera présentée dans les sections suivantes.

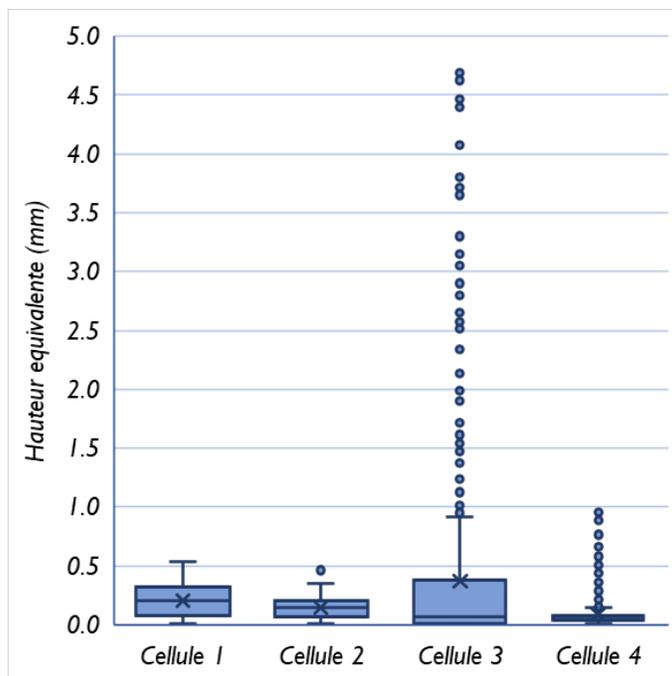


Figure 4-41 Distribution de la hauteur équivalente horaire de sortie, incluant les valeurs extrêmes.

### 4.1.3 Essais d'infiltration sur le terrain

Des essais d'infiltration ont été réalisés sur le terrain après la construction des cellules expérimentales. Ces essais visent à évaluer la perméabilité à l'aide de perméamètre Guelph (voir Chapitre 3). Les résultats de ces essais sont présentés au Tableau 4-4. En général, la conductivité hydraulique saturée mesurée varie entre  $1,35 \times 10^{-9}$  m/s, et  $1,24 \times 10^{-6}$  m/s, respectivement au niveau des cellules 2 et 3. Les valeurs moyennes sont de  $3,97 \times 10^{-7}$  m/s au niveau de la cellule 1;  $2,39 \times 10^{-8}$  m/s au niveau de la cellule 2;  $3,87 \times 10^{-7}$  m/s au niveau de la cellule 3 et  $3,68 \times 10^{-7}$  m/s pour la cellule 4.

Daniel (1993a) a publié une base de données relative à la conductivité hydraulique saturée incluant la description de la qualité du processus de construction (excellent, bonne et médiocre). Dans cette base de données la conductivité hydraulique saturée mesurée sur les sites avec un compactage insuffisant varie entre  $1 \times 10^{-6}$  m/s et  $4 \times 10^{-8}$  m/s, ces valeurs sont dans la même plage de variation que celles mesurées dans le cadre de la présente étude. L'ensemble des données utilisés par Daniel (1993a) (incluant les sites compactés adéquatement) varient de  $1 \times 10^{-6}$  m/s jusqu'à  $5 \times 10^{-11}$  m/s.

Tableau 4-4 Résultats des essais de conductivité hydraulique (m/s) sur le terrain.

Date	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
04 – 11 – 2021	$8,85 \times 10^{-8}$	$1,35 \times 10^{-9}$	$1,01 \times 10^{-7}$	$3,68 \times 10^{-7}$
	$4,27 \times 10^{-7}$	--*	$1,05 \times 10^{-7}$	--*
16 – 06 – 2022	$1,39 \times 10^{-7}$	$1,16 \times 10^{-8}$	$2,02 \times 10^{-7}$	--†
	$3,68 \times 10^{-7}$	--*	$2,44 \times 10^{-7}$	--†
04 – 08 – 2022	$1,96 \times 10^{-7}$	$4,52 \times 10^{-9}$	$7,51 \times 10^{-7}$	$3,82 \times 10^{-7}$
	$7,00 \times 10^{-7}$	$6,38 \times 10^{-9}$	$1,24 \times 10^{-6}$	$8,80 \times 10^{-7}$
24 – 10 – 2022	$5,15 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-8}$	$6,45 \times 10^{-8}$	$8,33 \times 10^{-9}$
	$7,43 \times 10^{-7}$	$1,07 \times 10^{-7}$	--*	$2,04 \times 10^{-7}$

\* Un seul essai a été exécuté. † Surface saturée, pas de portance.

La Figure 4–42 montre l'évolution des valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées au niveau de chaque cellule pendant la période observée et aussi la distribution statistique de ces valeurs.

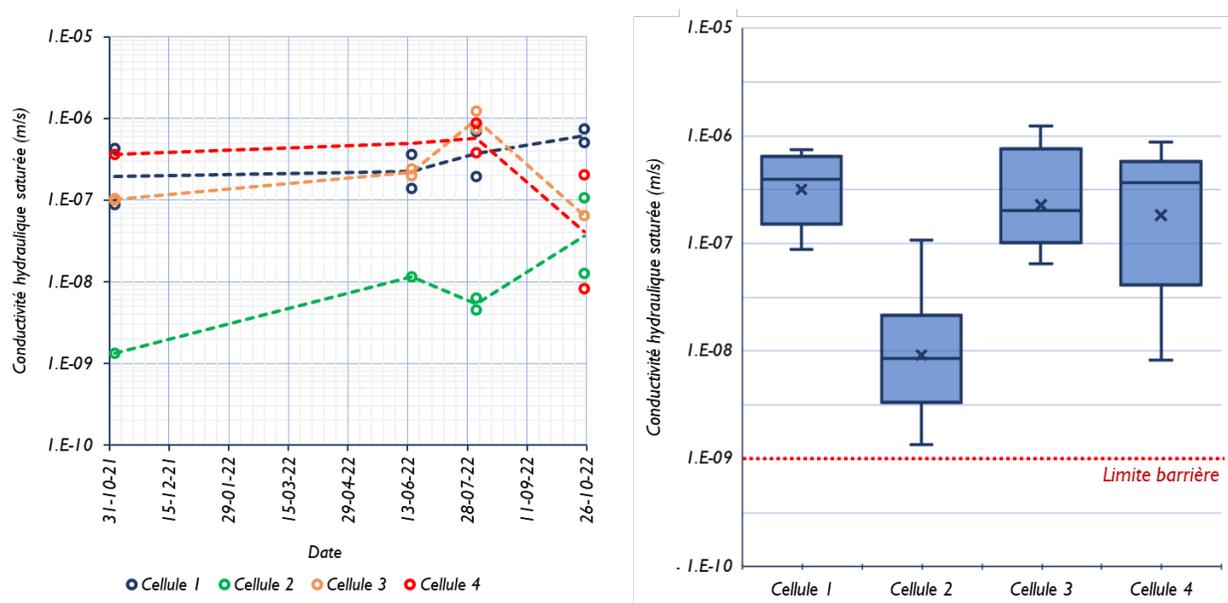


Figure 4–42 Évolution de la conductivité hydraulique saturée des cellules (gauche). Distribution statistique des données mesurées (droite). L'axe des ordonnées est en échelle logarithmique.

Au niveau des cellules 2 et 4 on observe que la conductivité hydraulique saturée présente une variation de deux ordres de grandeur, tandis que les cellules 1 et 3 elle varie d'un ordre de grandeur. Si l'on regarde le rapport entre les valeurs maximale et minimale, on trouve que la cellule 4 a la plus grande variation, avec la valeur maximale au-delà de 105 fois la valeur minimale. Pour la

cellule 2 ce rapport est de 80 fois, tandis que pour les cellules 1 et 3 il correspond respectivement à 8 et 19 fois. La Figure 4-42 (gauche) met en évidence une légère augmentation de la conductivité hydraulique dans les cellules 1 et 2 pour la période observée, tandis que dans les cellules 3 et 4 on y trouve une légère diminution à la fin de la période. La magnitude et l'évolution de la conductivité hydraulique des recouvrements simulés sont des éléments centraux de la présente recherche, une analyse minutieuse sera présentée dans les sections suivantes.

## **4.2 Interprétation des données collectées**

Dans cette section on présente l'analyse et l'interprétation des données par rapport aux hypothèses de recherche et aux comportements hydrogéologiques des cellules expérimentales. On analyse également les résultats des simulations numériques.

### **4.2.1 Efficacité des recouvrements à base d'argile à contrôler de l'infiltration de l'eau**

Dans cette section on évalue l'efficacité des recouvrements simulés dans les cellules expérimentales à contrôler l'infiltration de l'eau. Afin d'atteindre cet objectif, les résultats de la caractérisation physique et hydrogéologique ainsi que les résultats des essais sur le terrain seront analysés. Également on présente le bilan hydrique des cellules afin d'évaluer la quantité d'eau percolée durant la période de suivi au moyen des débitmètres.

Comme il a été présenté dans la revue de littérature, les matériaux argileux doivent avoir certaines caractéristiques afin qu'ils puissent être utilisés comme recouvrements à faible conductivité hydraulique (voir section 2.2.1 et Tableau 2-1). Globalement, les matériaux argileux utilisés dans la construction des cellules sont conformes aux critères énoncés au Chapitre 2. Néanmoins, les valeurs seuils du pourcentage d'argile et les limites de consistance sont à la limite des intervalles cibles, voir insuffisants. La plupart des références présentés à la section 2.2.1 considère un pourcentage d'argile (taille maximale de 2  $\mu\text{m}$ ) d'au moins 15% ; le pourcentage mesuré a été de 16% au niveau de la cellule 2, 17% pour les cellules 1 et 4, et 18% dans la cellule 3 ce qui est à la limite de la cible requise. Cependant, Roque et Didier (2006) imposent un pourcentage minimum d'argile de 25% et de ce fait les matériaux utilisés ne répondent pas à leur critère.

Les limites de consistance des matériaux utilisés dans les cellules expérimentales se situent dans la plage de mesures proposées dans la littérature à l'exception de celle proposée par Roque et Didier (2006). Ainsi pour la limite de liquidité, les valeurs mesurées se situent entre 29 et 31%, ces valeurs sont acceptables à l'égard de certaines références tel que Maqsoud et al. (2021), mais sont à la limite de la plage établie par Roque et Didier (2006) qui est de 30%.

Pour la conductivité hydraulique saturée, la valeur maximale permise est de  $10^{-9}$  m/s. Les mesures réalisées au laboratoire (voir section 3.2.4) ont montré que les échantillons prélevés au niveau des cellules 1 et 4 ont une conductivité hydraulique saturée de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s, et que les argiles amendées de la cellule 2 ont une conductivité hydraulique saturée de  $1,8 \times 10^{-10}$  m/s. Ces valeurs étant plus faibles que le seuil établi permettent de conclure que les matériaux sont appropriées pour les recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée. En revanche, le matériel amendé et utilisé dans la cellule 3 a une conductivité hydraulique saturée de  $1,7 \times 10^{-9}$  m/s, valeur légèrement supérieure au seuil.

Malgré le fait que les conductivités hydrauliques mesurées au laboratoire respectent les critères, les mesures réalisées sur le terrain montrent un comportement différent. Ainsi comme il est présenté à la section 4.1.3, les valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées à l'aide du perméamètre de Guelph varient entre  $8,8 \times 10^{-8}$  m/s et  $7,4 \times 10^{-7}$  m/s dans la cellule 1, entre  $1,4 \times 10^{-9}$  m/s et  $1,1 \times 10^{-7}$  m/s dans la cellule 2, de  $6,4 \times 10^{-8}$  m/s jusqu'à  $1,2 \times 10^{-6}$  m/s dans la cellule 3 et de  $8,3 \times 10^{-9}$  m/s jusqu'à  $8,8 \times 10^{-7}$  m/s dans la cellule 4. Ces valeurs sont jusqu'à trois ordres de grandeurs supérieures au seuil recommandé dans la littérature.

La Figure 4-43 présente les précipitations cumulées mesurées à station de Rouyn-Noranda durant la période d'observation, comparées avec les volumes de percolation cumulés mesurés à l'aide des débitmètres. La précipitation cumulée correspond à 527 mm. À la fin de la période observée, la percolation la plus élevée a été mesurée au niveau de la cellule 3 et qui représente 40% de la précipitation totale cumulée. La percolation la plus faible a été mesurée au niveau de la cellule 4 et qui correspond à 15% de la précipitation infiltrée à travers le recouvrement. Les cellules 1 et 2 ont un comportement similaire où l'infiltration représente 31 et 28% des précipitations cumulées.

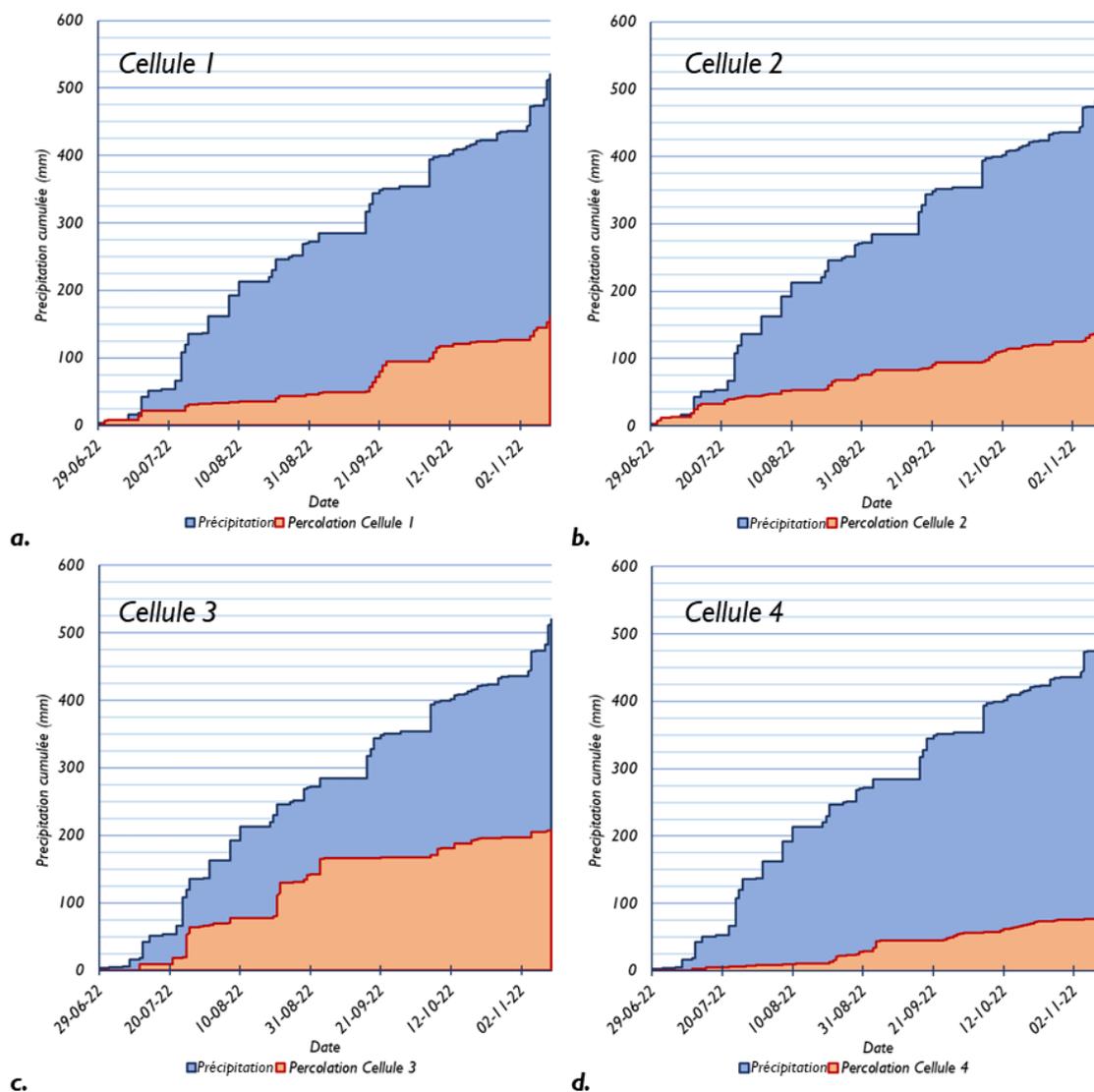


Figure 4-43 Comparaison de la précipitation et la percolation d'eau dans les cellules expérimentales.

Le Tableau 4-5 présente le résumé de ces résultats. Néanmoins, il est important de noter que ces valeurs sont probablement surestimées en raison des possibilités d'infiltration le long de l'interface entre les matériaux de recouvrement et la géomembrane (la paroi lisse de la membrane tend à accélérer l'écoulement dans cette interface). De même que ces valeurs d'infiltration peuvent être surestimées puisque la fraction qui devrait normalement correspond au ruissellement s'est également infiltrée.

Tableau 4-5 Percolation d'eau cumulée dans les cellules expérimentales.

Cellule	Percolation cumulée (mm)	Pourcentage de précipitation (%)
1	163	31
2	147	28
3	207	40
4	78	15

Les résultats exposés dans la présente section montrent que les matériaux et les configurations simulées dans les cellules expérimentales possèdent un potentiel pour être utilisés comme barrière étanche. Les paramètres de base et les valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées au laboratoire montrent que les matériaux ont les caractéristiques nécessaires pour être choisis comme barrière à l'eau dans un recouvrement. Malgré cela, sur le terrain on observe des valeurs qui sont supérieures à valeur cible de la conductivité hydraulique. Tel que le mentionne Daniel (1993a), les mesures au laboratoire peuvent donner des valeurs qui ne sont pas représentatives, car celles-ci ne tiennent pas en compte certaines conditions du terrain (mise en place, variations, influences externes, etc). Ce fait permet d'expliquer en partie par les valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées sur le terrain et les volumes d'eau qui ont percolé à travers les cellules.

#### 4.2.2 Modélisation numérique

Afin d'évaluer d'une façon plus détaillée le bilan hydrique au niveau des cellules expérimentales, des modèles numériques simulant l'écoulement de l'eau ont été construits en utilisant le logiciel SEEP/W. La calibration des données d'entrée du modèle tel que les conditions météorologiques (pluie, température, rayonnement solaire, etc.) et les données de sortie, en particulier le débit percolé, permettent d'évaluer la sensibilité des paramètres hydrogéologiques des matériaux utilisés et d'établir les plages de variation de ces paramètres. Le détail de la construction des modèles numériques sont présentés dans la section 3.3.

L'analyse de sensibilité réalisée a consisté à calculer le débit horaire percolé en changeant la conductivité hydraulique saturée du modèle numérique, et par la suite comparer son évolution avec le débit mesuré à l'aide des débitmètres à bascule. Pour cela on commence par faire le calcul avec les valeurs extrêmes mesurés au laboratoire et sur le terrain, le débit calculé et cumulé dans la période observée est ensuite comparé avec celui qui a été mesuré. Si la différence entre le débit

cumulé calculé et le débit mesuré est importante, on calcule la moyenne des conductivités hydrauliques et on recalcul le débit cumulé avec cette moyenne. On répète cette procédure jusqu'à ce qu'on trouve une différence acceptable.

La Figure 4-44 présente l'analyse de sensibilité pour la cellule 1. Les simulations ont débuté avec une conductivité hydraulique saturée de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s, qui correspond à la valeur minimale de l'ensemble et qui a été mesurée au laboratoire. Le résultat de cette simulation a permis d'obtenir une hauteur cumulée de 0,01 mm, qui est une valeur négligeable par rapport à la valeur mesurée avec le débitmètre et qui correspond à 162,8 mm (voir Tableau 4-5). Les simulations ont été refaites avec une conductivité hydraulique saturée maximale de  $8,8 \times 10^{-7}$  m/s (valeur qui a été mesuré sur le terrain) et qui a permis d'obtenir une hauteur de percolation cumulée de 334,3 mm qui est supérieure à la hauteur mesurée sur le terrain.

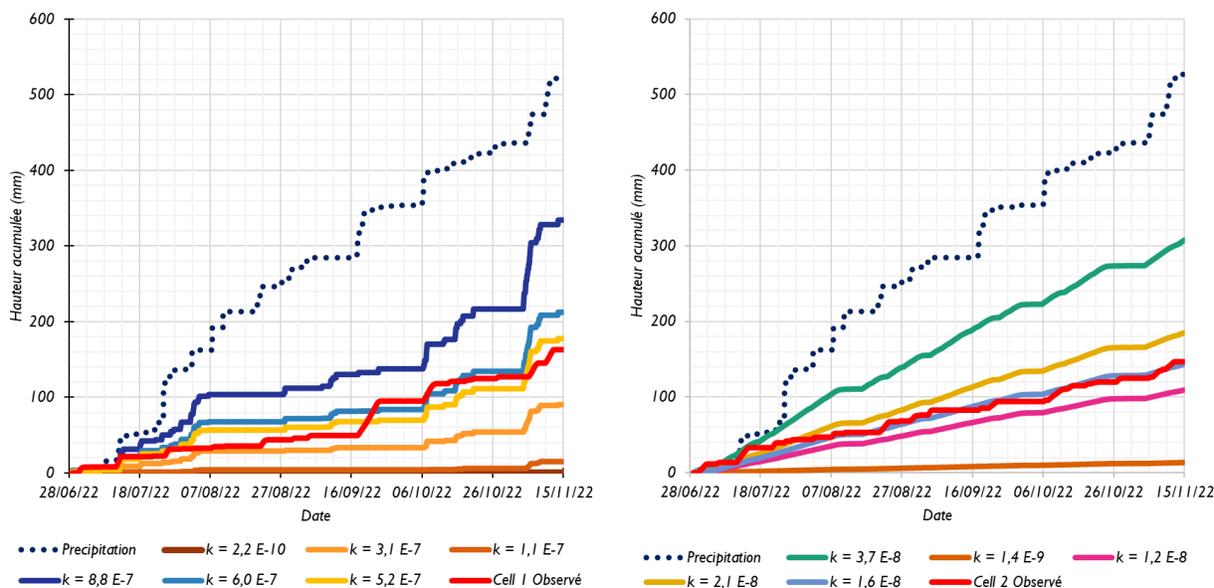


Figure 4-44 Analyse de sensibilité de la conductivité hydraulique saturée (m/s) et calibration du modèle pour la cellule 1 (gauche) et la cellule 2 (droite).

À la fin du processus itérative, la hauteur cumulée de 177,6 mm a été obtenue avec une conductivité hydraulique saturée de  $5,2 \times 10^{-7}$  m/s, soit une différence de 14,8 mm (9%) par rapport à la hauteur cumulée mesurée sur le terrain. Ainsi la conductivité hydraulique saturée qui a permis d'obtenir ce résultat est similaire à la valeur moyenne des mesures réalisées sur le terrain à l'aide du perméamètre de Guelph qui est de  $4,0 \times 10^{-7}$  m/s (voir Figure 4-42). Pour confirmer ces résultats,

les hauteurs équivalentes de la percolation journalière calculées au moyen du modèle numérique et mesurées sur le terrain sont présentées à la Figure 4–45. Cette dernière montre que, globalement les débits calculés et mesurés sont du même ordre de grandeur; toutefois on peut observer que les temps de réponse sont différents. Cette différence peut s’expliquer par l’accumulation de l’eau, qui peut exister sur le terrain mais qui n’est pas incluse dans le modèle numérique et par les erreurs au niveau des mesures réalisées à l’aide des débitmètres.

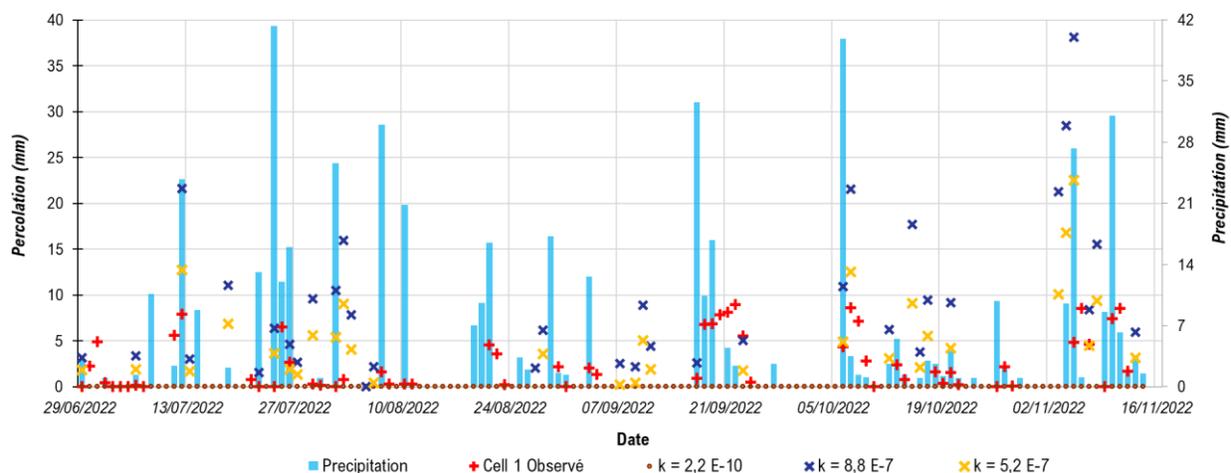


Figure 4–45 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 1.

La Figure 4–44 (droite) montre l’analyse de sensibilité réalisée pour la cellule 2. À la fin du processus itératif, la conductivité hydraulique saturée obtenue est de  $1,6 \times 10^{-8}$  m/s et qui a permis d’obtenir une hauteur de percolation cumulée de 143,5 mm, soit une différence de 3,2 mm (2%) par rapport à la hauteur mesurée sur le terrain (146,7 mm). La valeur de la conductivité hydraulique saturée calculée avec l’analyse de sensibilité se trouve entre la moyenne géométrique et le troisième quartile des valeurs mesurées à l’aide du perméamètre de Guelph (voir Figure 4–42).

La Figure 4–46 présente les hauteurs équivalentes de la percolation journalière calculées au moyen du modèle numérique et mesurées sur le terrain pour la cellule 2. Pour cette dernière on observe également des différences entre certaines valeurs mesurées sur le terrain et celles qui ont été calculées. Dans cette simulation, une accumulation d’eau a été incluse, ce qui permet de voir l’influence de l’accumulation d’eau sur le débit de sortie, néanmoins, le volume d’eau cumulée et sa variation dans le temps reste une variable inconnue qui empêche de faire une meilleure approximation des percolations.

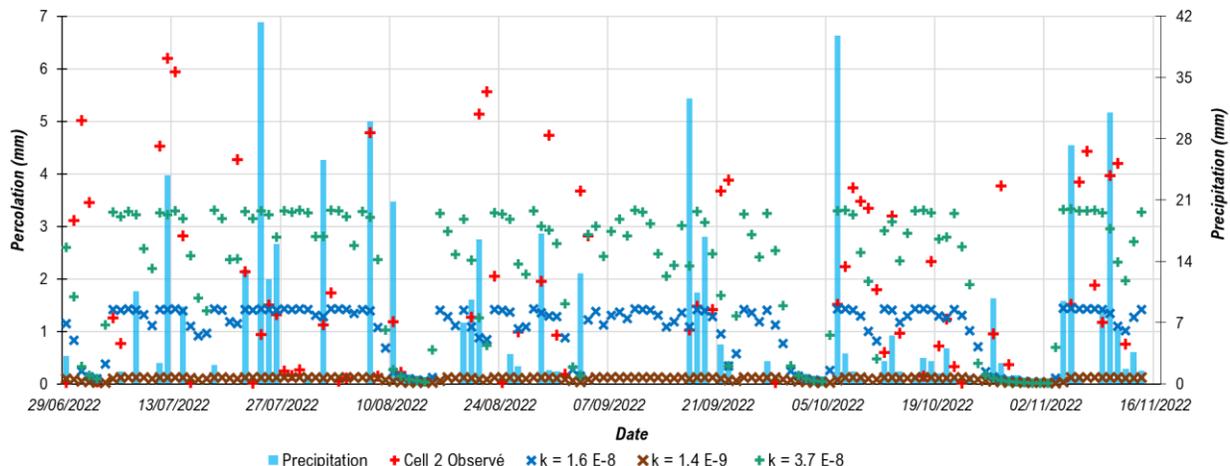


Figure 4-46 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 2.

La Figure 4-47 montre l'analyse de sensibilité faite pour la cellule 3 et le meilleur résultat a été obtenu avec une conductivité hydraulique saturée de  $2,2 \times 10^{-8}$  m/s et qui a permis d'obtenir une percolation cumulée de 214 mm, soit une différence de 7 mm (3%) par rapport à celle mesurée sur le terrain (207 mm). La valeur de la conductivité hydraulique saturée calculée de cette façon est plus faible que les valeurs mesurées à l'aide du perméamètre Guelph (voir Figure 4-42) mais plus grande que celle mesurée au laboratoire ( $1,7 \times 10^{-9}$  m/s, voir Tableau 3-26).

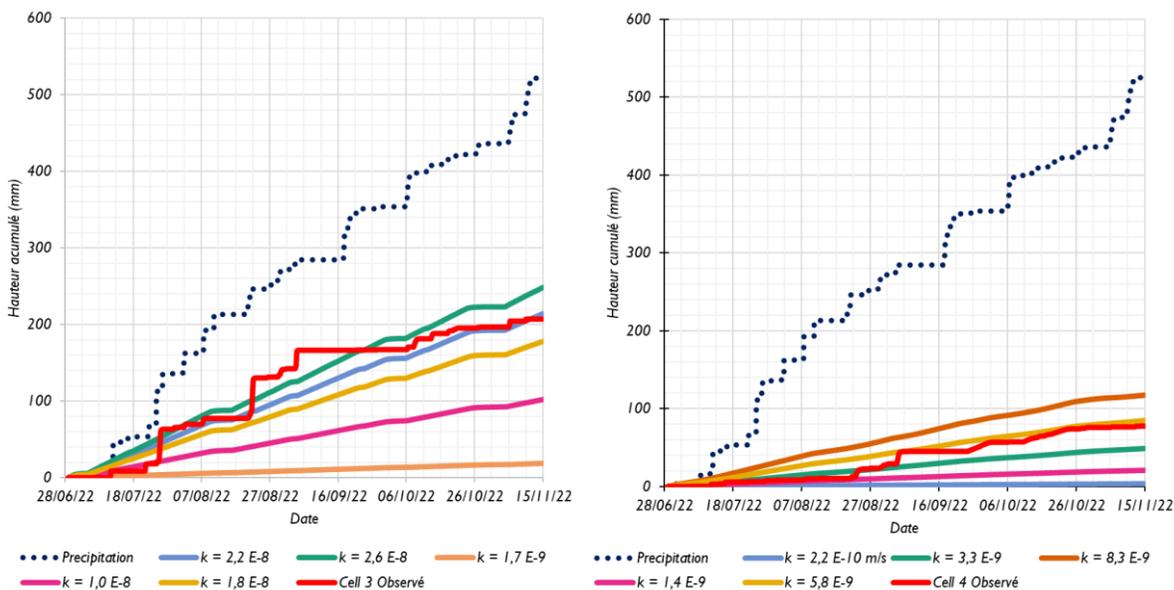


Figure 4-47 Analyse de sensibilité de la conductivité hydraulique saturée (m/s) et calibration du modèle pour la cellule 3 (gauche) et la cellule 4 (droite).

La Figure 4–48 présente les hauteurs équivalentes de la percolation journalière calculées pour la cellule 3. On observe aussi des différences entre les valeurs extrêmes mesurées sur le terrain et celles qui ont été calculées; les valeurs normales sont dans la même plage dans les deux cas. Le modèle a inclus l'accumulation sur la cellule afin de calibrer les données mesurées. Néanmoins, on peut observer qu'avec cette condition les périodes de drainage sont plus longues (c'est-à-dire que la cellule est sous l'eau) par rapport à celle qui ont été observées sur le terrain. Ce constat permet de conclure que la perméabilité équivalent au niveau de toute la cellule est similaire mais qu'en surface elle doit être supérieure à la conductivité calculée ( $2,2 \times 10^{-8}$  m/s).

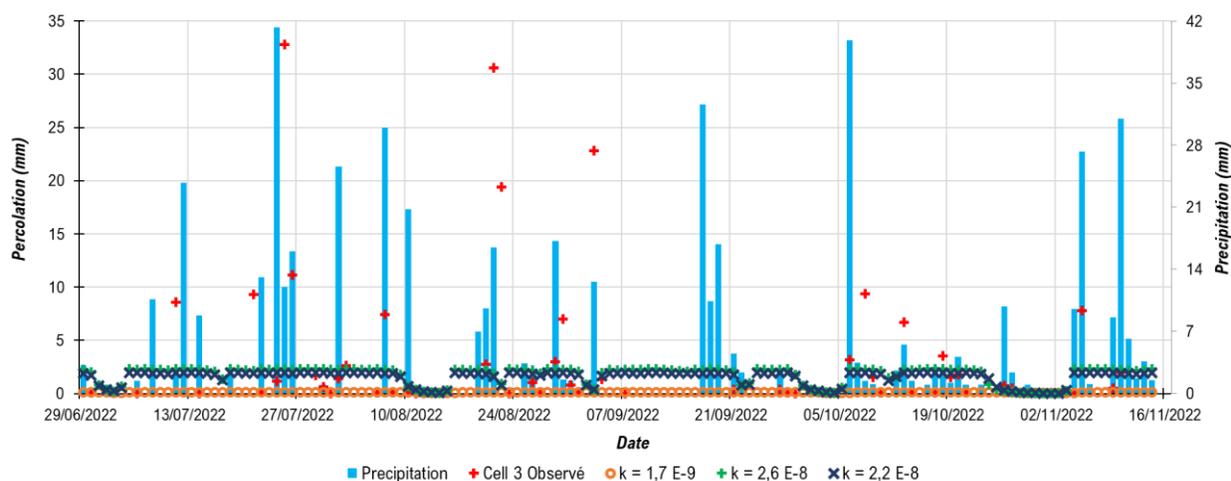


Figure 4–48 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 3.

Dans le cas de la cellule 4, la convergence a été obtenue avec une conductivité hydraulique saturée de  $5,8 \times 10^{-9}$  m/s. Cette conductivité hydraulique saturée a permis d'obtenir une hauteur de percolation cumulée de 85 mm, soit une différence de 7 mm (9%) par rapport à la valeur mesurée sur le terrain (78 mm). La valeur de la conductivité hydraulique saturée calculée de cette façon est légèrement plus faible que les valeurs mesurées à l'aide du perméamètre Guelph (voir Figure 4–42) mais plus grande que celle mesurée au laboratoire ( $2,2 \times 10^{-10}$  m/s, voir Tableau 3-26).

Le cas de la cellule 4, qui est illustré dans la Figure 4–49, est similaire à celui de la cellule 3. On observe des différences entre les valeurs extrêmes mesurées sur le terrain et ceux qui ont été calculés, mais les valeurs normales sont du même ordre de grandeur. On peut noter aussi que les différences entre le modèle numérique et les mesures sur le terrain sont moins importantes après le mois de septembre, où on avait identifié un changement dans le comportement hydrogéologique

de la cellule : durant l'été les débits mesurés sont plus grands que durant l'automne, où l'accumulation d'eau dans cette cellule a été observée en surface.

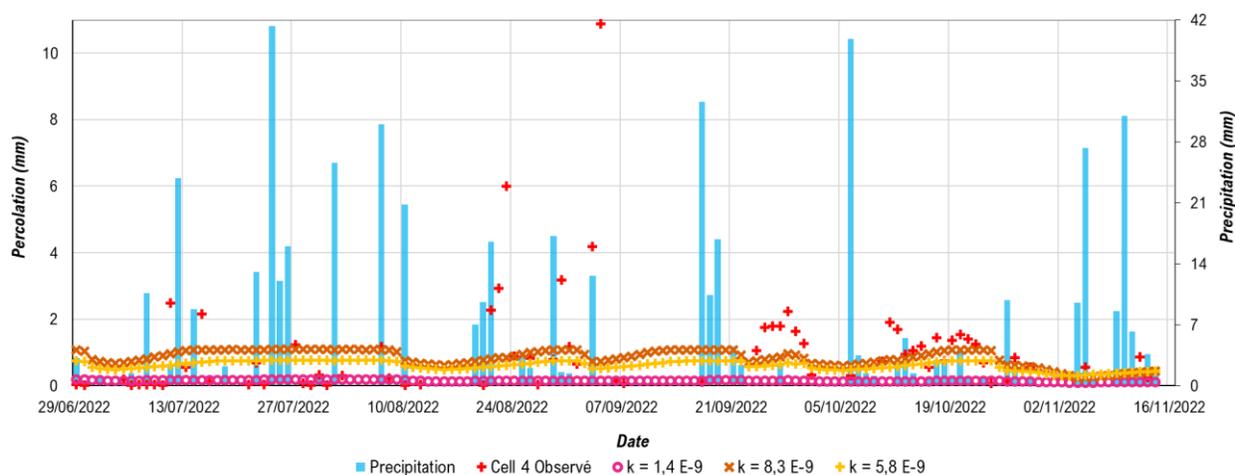


Figure 4-49 Hauteur de la percolation journalière mesurées et estimées pour la cellule 4.

Le Tableau 4-6 résume les résultats des simulations numériques et qui ont permis d'obtenir les meilleurs résultats à la suite de l'étude de sensibilité. Ainsi pour les cellules 1 et 2, les valeurs sont proches des valeurs moyennes mesurées lors des différents essais sur le terrain tandis que pour les cellules 3 et 4 elles sont légèrement inférieures aux valeurs minimales mesurés sur le terrain.

Tableau 4-6 Résultats des simulations numériques.

Cellule	Conductivité hydraulique (m/s)	Percolation mesurée cumulée (mm)	Percolation estimée cumulée (mm)	Différence (valeur mesurée et valeur simulée)
1	$5,2 \times 10^{-7}$	163	178	15 mm (9%)
2	$1,6 \times 10^{-8}$	147	144	3 mm (2%)
3	$2,2 \times 10^{-8}$	207	214	7 mm (3%)
4	$5,8 \times 10^{-9}$	78	85	7 mm (9%)

Il est important de rappeler que les modèles ont été calibrés pour la hauteur cumulée du débit de percolation, ce qui engendre certaines différences dans les valeurs ponctuelles de débit calculés surtout pour les valeurs extrêmes.

### 4.2.3 Effets des conditions de mise en place des recouvrements

Tel que présenté dans la section 4.2.1, il y a des variations entre les valeurs de la conductivité hydraulique saturée mesurées au laboratoire et celles mesurées sur le terrain. Dans le cas de la

cellule 1, au laboratoire on a mesuré une valeur de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s tandis que sur le terrain la conductivité hydraulique varie entre  $8,8 \times 10^{-8}$  et  $7,4 \times 10^{-7}$  m/s, soit entre deux et trois ordres de grandeur. Pour la cellule 2, les valeurs varient entre  $1,4 \times 10^{-9}$  et  $1,1 \times 10^{-7}$  m/s contre une valeur de  $1,8 \times 10^{-10}$  m/s mesurée au laboratoire, c'est-à-dire entre un et trois ordres de grandeur. Dans la cellule 3, la valeur mesurée au laboratoire est de  $1,8 \times 10^{-9}$  m/s, alors que sur le terrain la conductivité hydraulique varie de  $6,4 \times 10^{-8}$  jusqu'à  $1,2 \times 10^{-6}$  m/s, encore entre un et trois ordres de grandeur de différence. Finalement, au niveau de la cellule 4 les valeurs obtenues sur le terrain se situent entre  $8,3 \times 10^{-9}$  et  $8,8 \times 10^{-7}$  m/s alors qu'au laboratoire la valeur mesurée est de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s.

La différence entre les données mesurées au laboratoire et sur le terrain peut être attribuée en partie aux conditions de mise en place des recouvrements. Ainsi comme il est présenté à la section 4.1.1, la valeur maximale mesurée de la masse volumique sèche est de  $1,70 \text{ g/cm}^3$  dans la cellule 2 alors que dans les autres cellules les valeurs sont toujours inférieures à  $1,50 \text{ g/cm}^3$ . D'autre part, la valeur moyenne de la masse volumique sèche optimale est de  $1,74 \text{ g/cm}^3$  pour les matériaux argileux (Tableau 3-20); ce qui donne des taux de compactage entre 63 et 95% (voir Tableau 4-7). La valeur moyenne du taux de compactage a été de 80% au niveau de la cellule 1, 85% pour la cellule 2, 84% pour la cellule 3 et 76% pour la cellule 4.

Tableau 4-7 Taux de compactage au niveau des cellules expérimentales.

Cellule	Profondeur	Masse volumique sèche ( $\text{gr/cm}^3$ )	n	% Proctor
1	-70	1.49	0.44	86%
	-60	1.09	0.59	63%
	-40	1.30	0.51	75%
	-40	1.49	0.44	86%
	-20	1.31	0.50	76%
	-15	1.49	0.44	86%
	0	1.49	0.44	86%
2	-50	1.70	0.36	95%
	-30	1.52	0.43	84%
	-20	1.50	0.43	84%
	-20	1.33	0.50	74%
	-15	1.60	0.40	89%
	0	1.69	0.36	94%
	0	1.42	0.47	79%

Cellule	Profondeur	Masse volumique sèche (gr/cm <sup>3</sup> )	n	% Proctor
3	-50	1.49	0.44	88%
	-30	1.49	0.44	88%
	-20	1.49	0.44	88%
	-15	1.49	0.44	88%
	0	1.49	0.44	88%
	0	1.25	0.53	74%
	0	1.25	0.53	74%
4	-110	1.36	0.49	79%
	-90	1.36	0.49	79%
	-80	1.35	0.49	78%
	-80	1.12	0.58	65%
	-60	1.38	0.49	80%
	-60	1.48	0.45	86%
	-40	1.47	0.45	85%
	-30	1.42	0.47	82%
	-20	1.44	0.46	83%
	-20	1.38	0.48	80%
	-20	1.35	0.49	78%
	-15	1.15	0.57	66%
	0	1.15	0.57	66%
	0	1.24	0.54	71%
	0	1.15	0.57	67%
0	1.34	0.50	77%	

Le Tableau 4-7 résume les taux de compactage calculés à partir des données du contrôle réalisé à l'aide du nucleodensimètre et à l'aide du cylindre à volume connu ainsi que du système de suivi installé dans les cellules. Le Tableau 4-7 montre que seulement deux valeurs (5%) dépassent 90% de la masse volumique sèche optimale, 11 valeurs (30%) se trouvent entre 85 et 90 % de la valeur optimale et 24 (65%) des valeurs mesurées sont en dessous du 85% de la densité optimale. Dans la pratique, il est habituel de recommander un compactage des couches utilisées comme barrière étanche soit fait avec un taux de compactage d'au moins compris entre 90% ou 95% (Daniel, 1993a). Les valeurs présentées au tableau permettent aussi d'identifier que la cellule 2 est la mieux compactée, suivi par la cellule 3. Au contraire, la cellule 4 présente les valeurs les plus faibles; c'est-à-dire que les matériaux amendés (cellules 2 et 3) ont un meilleur compactage que les argiles sans amendements (cellules 1 et 4). On explique ce comportement par une amélioration de la malléabilité des argiles avec les amendements, notamment avec celui du sable fin.

L'amélioration de la malléabilité a été constatée aussi au laboratoire lors de la reconstruction des échantillons pour des différents essais. Tel est le cas du compactage des échantillons utilisés pour mesurer la conductivité hydraulique saturée (Tableau 3-26), où on a calculé des porosités de 0,31 pour l'amendement de la cellule 2, de 0,36 pour l'amendement de la cellule 3 et de 0,37 pour l'argile non amendée. Quant au niveau de compactage, on a calculé un taux de 96% pour l'argile non amendée alors que les deux amendements ont atteint le 100% du compactage.

D'autre part, comme il a été présenté à la section 4.1.1, le compactage insuffisant est le résultat combiné d'une faible énergie de compactage et d'une teneur en eau élevée. La Figure 4-5 révèle que la teneur en eau des sols lors du compactage était au-dessus de la teneur en eau optimal en raison des précipitations qui ont eu lieu lors de la mise en place des cellules expérimentales. Les valeurs des teneurs en eau dépassent les valeurs qui correspondent aux zones d'acceptabilité. En plus, le compactage a été fait au moyen d'une plaque vibrante (10,1 kN); cette énergie de compactage peut être considérée comme faible d'après les résultats des essais de contrôle.

Bref, la différence observée au niveau des valeurs de la conductivité hydraulique saturée, mesurées au laboratoire et sur le terrain, est la conséquence d'un compactage insuffisant dû aux conditions météorologiques pendant la mise en place et à l'utilisation d'équipements à faible énergie de compactage.

Afin de réduire les effets que l'on vient de décrire, il est nécessaire d'établir un système de contrôle et d'assurance de qualité lors de la mise en place des recouvrements à base d'argile à grande échelle. Ce système inclut la réalisation systématique d'essais de contrôle des matériaux utilisés dans la construction des recouvrements. Le Tableau 4-8 résume les recommandations des essais et leur fréquence pour la construction de recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée (Daniel (1993a)).

Tableau 4-8 Essais pour le contrôle de qualité et leur fréquence (D'après Daniel (1993a))

Paramètre	Fréquence
Pourcentage de fins ( $< 75 \mu m$ )	1 essai chaque 760 m <sup>2</sup> ou chaque jour
Pourcentage de gravier ( $> 5 \text{ mm}$ )	1 essai chaque 760 m <sup>2</sup> ou chaque jour
Limites de Atterberg	1 essai chaque 760 m <sup>2</sup> ou chaque jour
Pourcentage d'argile	1 essai chaque 760 m <sup>2</sup> ou chaque jour
Proctor	1 essai chaque 3800 m <sup>2</sup>

Teneur en eau massique (in situ)	1 essai chaque 150 m <sup>2</sup> ou chaque jour
Teneur en eau massique (au four)	1 essai chaque 1500 m <sup>2</sup>
Observation	En continu
Densité in situ*	1 essai chaque 760 m <sup>2</sup> ou chaque jour

\* Non inclus par Daniel (1993a)

#### 4.2.4 Effets des conditions météorologiques dans la période observée

Dans cette section on examine les effets des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel sur les paramètres qui peuvent être utilisés dans l'évaluation de la performance des recouvrements simulés dans les cellules expérimentales. A cet égard, on évalue dans un premier temps la profondeur à laquelle les cycles météorologiques ont des effets et dans un deuxième temps on examine s'il existe une variation de la conductivité hydraulique saturée tout au long de la période d'observation.

Pour commencer, prenons le cas de la température et l'évaluation de la profondeur des effets des cycles gel-dégel. Comme il est présenté à la Figure 4-12 et à la Figure 4-13, on peut constater que toute la profondeur de la cellule 1 (80 cm) et la cellule 2 (60 cm) ont été affectées par le gel durant l'hiver et les températures minimales mesurées correspondent à -3 et -6,6 °C, pour les niveaux d'instrumentation les plus profondes situées respectivement à 70 et 50 cm (à partir de la surface des cellules expérimentales). Pour les cellules 3 et 4, on constate qu'il y a eu un gel partiel des recouvrements. Ainsi dans la cellule 3, des températures négatives ont été mesurées au niveau des capteurs localisés à 15 et 30 cm de la surface et dont les températures minimales correspondaient à -2,5 et -1,6 °C respectivement. Le capteur le plus profond n'a mesuré aucune température négative (Figure 4-14); néanmoins les données de succion montrent que toute l'épaisseur du recouvrement a été soumise à des effets du gel comme on peut le voir dans la Figure 4-28. Au niveau de la cellule 4, des températures négatives ont été mesurées au niveau des capteurs localisés à 15 et 30 cm de la surface, avec des valeurs minimales de -3,2 et -1,2 °C respectivement. Les capteurs les plus profonds n'ont pas atteint des températures négatives, c'est-à-dire que l'effet du gel a été limité à la couche supérieure d'argile et que ni la couche de silt ni la couche d'argile n'ont été affectées par l'effet du gel (Figure 4-15) et de ce fait on peut mettre en évidence l'effet bénéfique de la mise en place d'une couche intermédiaire. Comme pour les cellules 1 et 2, il est important de signaler que dans les cellules 3 et 4 et plus particulièrement au niveau le plus bas

aucun effet des cycles de gel n'a été observé à l'automne et au printemps, la température a changé progressivement.

Les périodes durant lesquelles les cellules ont été gelées sont présentées au Tableau 4-9.

Tableau 4-9 Périodes de gel dans cellules expérimentales.

Cellule	Profondeur	Période gelée
<b>1</b>	15 cm	26-11-2021 jusqu'à 10-04-2022
	40 cm	23-12-2021 jusqu'à 10-04-2022
	70 cm	07-01-2021 jusqu'à 10-04-2022
<b>2</b>	15 cm	27-11-2021 jusqu'à 05-04-2022
	30 cm	08-12-2021 jusqu'à 13-04-2022
	50 cm	10-12-2021 jusqu'à 17-04-2022
<b>3</b>	15 cm	27-11-2021 jusqu'à 02-04-2022
	30 cm	06-12-2021 jusqu'à 23-03-2022
	50 cm	18-01-2022 jusqu'à 06-04-2022*
<b>4</b>	15 cm	17-11-2021 jusqu'à 31-03-2022
	30 cm	04-12-2021 jusqu'à 18-03-2022
	60 cm	Pas de gel ( $T_{min} = 0,4 \text{ °C}$ )
	90 cm	Pas de gel ( $T_{min} = 0,3 \text{ °C}$ )
	110 cm	Pas de gel ( $T_{min} = 0,4 \text{ °C}$ )

\*( $T_{min} = 0 \text{ °C}$ ), dates d'après les capteurs de succion

Les mécanismes de transferts de chaleur (conduction, convection de l'air ou de l'eau, et radiation) dans les milieux poreux sont fortement contrôlés par les caractéristiques du milieu telles que la minéralogie, la granulométrie et le degré de saturation. Quant au degré de saturation, étant donné que la conductivité thermique de l'eau (0,58 W/m/K) est supérieure à celle de l'air (0,025 W/m/K), un sol saturé est un meilleur conducteur de la chaleur qu'un sol à l'état sec (Fredlund et al., 2012). C'est cela qui peut expliquer pourquoi au niveau de la cellule 4 le front le gel se limite à la première couche (constituée entièrement d'argile non amendée). La couche intermédiaire de sable silteux (servant à développer le bris capillaire) présente une saturation plus faible que l'argile, et en

conséquence une conductivité thermique aussi plus faible qui fait limiter le front de gel à la couche supérieure d'argile.

Malgré les différences dans les profondeurs atteintes par le front de gel dans les différentes cellules, on ne constate aucun changement notable (en dehors de la variabilité statistique) au niveau de la conductivité hydraulique mesurée avant et après la saison d'hiver, comme le présente la section 4.2.4.

Il est important de souligner que durant la période de gel qui s'est étalée depuis l'automne 2021 jusqu'au printemps 2022 (voir Tableau 3-5), aucun dégel n'a été observé au niveau des capteurs et plus particulièrement pour ceux installés proche de la surface au niveau des quatre cellules expérimentales.

Concernant les cycles de mouillage-séchage, la Figure 4-16 et la Figure 4-17 montrent qu'après la fonte des neiges des couches ont atteint la saturation au niveau des cellules 1 et 2, une fois la saturation est atteinte (après la fonte des neiges), toute l'épaisseur des recouvrements est demeurée à un degré de saturation élevé, c'est-à-dire que ces cellules n'ont pas été affectées par les périodes de sécheresse. En ce qui concerne la cellule 4 (voir Figure 4-19), on observe que seulement le capteur situé à 15 cm de profondeur a montré des diminutions importantes au niveau des teneurs en eau volumiques. En d'autres termes, les effets des cycles de mouillage-séchage sont limités à une bande superficielle.

En ce qui concerne la cellule 3, son comportement s'explique à l'aide de la Figure 4-50, où on présente l'évolution de la saturation des matériaux des recouvrements simulés par les quatre cellules. Cette figure montre qu'au niveau de la cellule 3 les désaturations (saturation peut être plus basse que 85%) sont récurrentes proche de la surface (-15 cm). Ce constat est également valable au milieu du recouvrement où des désaturation fréquentes ont été observées (-30 cm) ; toutefois au niveau le plus bas des désaturations sporadiques ont été observées. Ces résultats permettent de conclure qu'au niveau de la cellule 3, la totalité du recouvrement a été affectée par les effets des cycles de mouillage-séchage (voir la Figure 4-18 et la Figure 4-24).

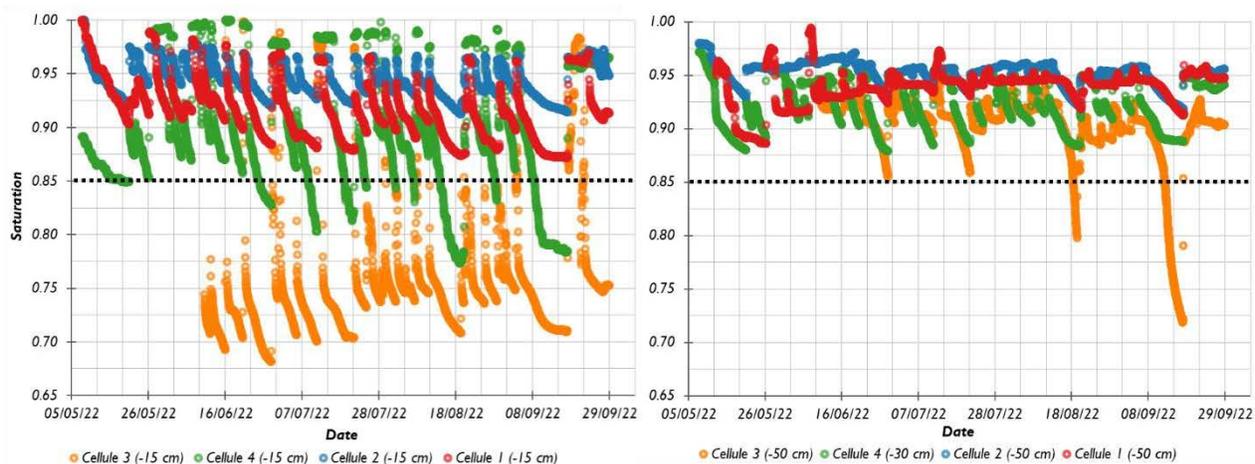


Figure 4–50 Évolution de la saturation dans les cellules expérimentales. À gauche, les niveaux supérieures des couches et à droite au fond de la couche (première couche argileuse pour la cellule 4).

Quant aux données des succions, les valeurs maximales mesurées dans la période « sans gel » correspondent à 46 kPa pour la cellule 1, 32 kPa pour la cellule 2, 40 kPa pour la cellule 3 et 62 kPa pour la cellule 4 (voir Figure 4–30 et Figure 4–31); tandis que les valeurs d'entrée d'air (pression à partir laquelle les pores commencent à se vider) correspondent à 66 kPa pour l'argile mise en place dans les cellules 1 et 4 et 22 et 16 kPa respectivement pour les argiles amendées des cellules 2 et 3 (voir Tableau 3-27). Ces résultats montrent une bonne capacité de rétention d'eau dans les cellules 1 et 4, et explique les valeurs élevées des teneurs en eau volumiques dans ces cellules.

Les mesures de la conductivité hydraulique réalisées sur le terrain ont montré une certaine variabilité (voir Figure 4–42). Ces variations suggèrent la présence de modifications au niveau des propriétés des matériaux qui constituent les recouvrements. Afin de quantifier ces variations on fait appel à certains indicateurs statistiques tel que le coefficient de variation et le rapport  $valeur_{max}/valeur_{min}$ . Ensuite on va comparer ces indicateurs par rapport à ceux qu'on trouve dans la littérature.

Le Tableau 4-10 résume les valeurs de ces indicateurs reportés dans les travaux suivants :

- Deb et Shukla (2012) ont compilé un grand nombre d'études où la variation de la conductivité hydraulique a été quantifiée. Il est important de mentionner que certaines études les conductivités hydrauliques ont été mesurées avec des perméamètres Guelph ;

- Dorsey et al. (1990) ont comparé les résultats des mesures de la conductivité hydraulique réalisées sur les loams silteux et les argiles loam-silteux en utilisant différentes techniques incluant le perméamètre Guelph ;
- Ebrahimi et Moradi (2015) ont comparé les mesures de la conductivité hydraulique qui ont été réalisées en utilisant le perméamètre Guelph et l'infiltromètre à double anneau sur des sables.

Les indicateurs calculés sont présentés au Tableau 4-10 et qui montre que les mesures de la conductivité hydraulique présentent une haute dispersion tel que signalé dans la section 2.3.1. Ainsi les coefficients de variation peuvent être supérieurs à 1 (100%) ou les valeurs maximales sont grandes plus de 100 fois par rapport aux valeurs minimales.

Tableau 4-10 Coefficient de variation (CV) et rapport maximal/minimal de référence.

Reference	CV	<i>valeur<sub>max</sub>/valeur<sub>min</sub></i>
Deb et Shukla (2012)	0,9 – 1,8	49 – 869
<b>Deb et Shukla (2012)*</b>	<b>0,4 – 0,8</b>	--†
<b>Dorsey et al. (1990)*</b>	--†	<b>10 - 77</b>
Ebrahimi et Moradi (2015)*	1,2	250

\*Guelph seulement. †Non signalé

Pour les essais réalisés sur le terrain au niveau des différentes cellules expérimentales, le Tableau 4-11 présente le calcul des différents indicateurs. Ainsi les coefficients de variation calculés varient entre 0,62 et 1,71 respectivement dans la cellule 1 et la cellule 2. Quant au rapport *valeur<sub>max</sub>/valeur<sub>min</sub>*, il varie entre 8 et 106 respectivement au niveau de la cellule 1 et la cellule 4. Globalement, la variation la plus faible a été observée au niveau de la cellule 1, tandis que la dispersion la plus importante a été observée au niveau de la cellule 2. Néanmoins, toutes les valeurs indiquées dans le Tableau 4-11 se trouvent dans les plages de variation « normales » présentés dans le Tableau 4-10. En d'autres termes, les variations observées ne dépassent pas les variations statistiques typiques pour cette variable.

Tableau 4-11 Coefficient de variation (CV) et rapport maximal/minimal des valeurs mesurées sur le terrain.

Cellule	CV	<i>valeur<sub>max</sub>/valeur<sub>min</sub></i>
1	0,62	8
2	1,71	79

<b>Cellule</b>	<b>CV</b>	<b><i>valeur<sub>max</sub>/valeur<sub>min</sub></i></b>
3	1,15	19
4	0,88	106

Étant donné que les valeurs du coefficient de variation et du rapport  $valeur_{max}/valeur_{min}$  restent dans les variations mesurées dans les références consultées, on peut conclure que les variations observées durant la période peuvent être considérées comme des variations statistiques et de ce fait on ne peut pas affirmer que ces variations soient attribuées ou influencées par les successions de cycles de gel-dégel et mouillage-drainage. La poursuite du suivi permettra de voir si les tendances observées au niveau des cellule 2 se maintiennent ou non.

## CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Avec les éléments exposés dans ce document, on peut conclure que :

D'après les résultats des essais réalisés au laboratoire, dont les paramètres de base et la conductivité hydraulique saturée, les matériaux argileux utilisés dans les cellules expérimentales possèdent un potentiel pour être utilisés comme barrière à l'eau dans un recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée. Une conductivité hydraulique saturée de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s a été mesurée dans les argiles non amendées, et de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s dans les argiles amendées de la cellule 2. Cependant, au niveau de la cellule 3 on a mesuré une conductivité hydraulique saturée de  $1,7 \times 10^{-9}$  m/s, cette valeur est légèrement supérieure au seuil d'étanchéité défini comme  $1,0 \times 10^{-9}$  m/s.

Ils existent des variations entre les valeurs de conductivité hydraulique saturée mesurées au laboratoire et celles mesurées sur le terrain. Ces variations peuvent atteindre deux ou trois ordres de grandeur; les valeurs mesurées sur le terrain au moyen du perméamètre Guelph varient entre  $1,4 \times 10^{-9}$  m/s dans la cellule 2 et  $1,2 \times 10^{-6}$  m/s dans la cellule 3. Toutes les valeurs mesurées sur le terrain sont supérieures au seuil d'étanchéité.

D'après l'analyse de sensibilité faite au moyen des modèles numériques, la conductivité hydraulique saturée varie entre  $5,8 \times 10^{-9}$  m/s pour la cellule 4 et  $5,2 \times 10^{-7}$  m/s pour la cellule 1. En général, les valeurs de conductivité hydraulique qui font converger le volume percolé cumulé sont plus proches des valeurs mesurées à l'aide du perméamètre Guelph qu'aux valeurs mesurées au laboratoire. Pour les cellules 1 et 2, les valeurs sont proches des valeurs moyennes tandis que dans les cellules 3 et 4, elles sont légèrement inférieures aux valeurs minimales mesurées sur le terrain. Pourtant, toutes les valeurs calibrées d'après le suivi du débit de sortie, sont supérieures au seuil d'étanchéité. Finalement, il est recommandé de faire un suivi de la hauteur d'eau qui s'accumule sur la cellule et de mesurer le temps de transit afin d'avoir un calcul plus précis (permettant de calibrer le volume percolé cumulé).

Le suivi du débit percolé a permis d'établir que 31% de la précipitation a percolé à travers la couche simulée dans la cellule 1, 28% dans la cellule 2, 40% dans la cellule 3 et 15% dans la cellule 4.

Néanmoins, ces valeurs peuvent être surestimées en raison des infiltrations potentielles de l'eau le long de l'interface entre les matériaux et les membranes.

La différence au niveau des valeurs de la conductivité hydraulique saturée, mesurées au laboratoire et sur le terrain, peut s'expliquer par un compactage insuffisant dû aux conditions météorologiques pendant la mise en place et à l'utilisation d'équipements à faible énergie de compactage. La teneur en eau des sols lors du compactage était au-dessus de la teneur en eau optimal, en raison de la faible pluie qui a tombée durant la mise en place des cellules. Le compactage a été fait au moyen d'une plaque vibrante (10,1 kN); cette énergie de compactage a été précaire d'après les résultats des essais de contrôle.

Afin de réduire les effets de la mise en place, il est nécessaire d'établir un système de contrôle et d'assurance de la qualité permettant de suivre le processus de compactage et d'assurer les conditions d'installation (matériaux, teneur en eau, niveau de compactage) selon les recommandations de la littérature et les critères de conception.

Les variations observées au niveau des valeurs de la conductivité hydraulique saturée au long de l'année restent des variations statistiques ; on ne peut pas affirmer que ces variations soient attribuées aux cycles météorologiques de gel-dégel et mouillage-séchage. La poursuite du suivi permettra de discerner si la tendance d'augmentation présente au niveau de la cellule 2 se maintient en révélant une influence de ces facteurs; également cela permettra d'observer si les changements mesurés dans les lectures de l'automne 2022 au niveau des cellules 3 et 4 constituent une tendance ou s'il s'agit d'une fluctuation dans les valeurs mesurées.

Les amendements réalisés dans les argiles n'imposent pas des changements au niveau des propriétés physiques tel que le pourcentage d'argile, la plasticité ou l'activité. Les valeurs mesurées dans les amendements restent dans la plage de variation de l'argile. De même, les matériaux amendés sont classifiés aussi comme une argile à faible plasticité (CL).

Les matériaux amendés (cellules 2 et 3) ont un meilleur compactage que les argiles non amendées (cellules 1 et 4). En effet, la cellule 2 (argile amendée avec du sable fin) montre un meilleur compactage que les cellules contenant l'argile non amendée et la cellule 3 (amendée avec du sable silteux). On explique ce comportement par une amélioration de la malléabilité des argiles avec les

amendements, notamment avec celui du sable fin. Cet effet a été constaté aussi au laboratoire lors de la reconstruction des échantillons pour des différents essais.

En ce qui concerne la conductivité hydraulique, seulement la cellule 2 présente une différence que peut être attribuée à un autre aspect que la variation statistique. Les descripteurs statistiques de variation révèlent qu'il existe une différence entre la conductivité hydraulique mesurée dans la cellule 2 et celle mesurée dans les autres cellules.

Quant à la réponse aux cycles de mouillage-séchage, les cellules 1 et 2 gardent une saturation élevée, la cellule 4 montre des désaturations au niveau superficiel, tandis que la cellule 3 a montré des valeurs faibles de saturation dans toute l'épaisseur du recouvrement lors des périodes de sécheresse de plus de 8 jours. Malgré cela, il n'y a pas d'évidence que les effets du séchage dans la cellule 3 engendrent des variations dans la conductivité hydraulique saturée.

Concernant les effets des cycles de gel-dégel, les cellules 1 et 2 ont été gelés totalement pendant l'hiver, tandis que dans la cellule 3 le front de gel n'a pas affecté la partie la plus profonde du recouvrement simulé ainsi que dans la cellule 4, le front le gel se limite à la première couche (constituée entièrement d'argile non amendée). Dans cette cellule, la couche intermédiaire de sable silteux, servant à développer le bris capillaire, présente une saturation plus faible que l'argile, et en conséquence une conductivité thermique aussi plus faible, permettant de contrôler le front de gel à ce niveau.

Malgré les différences dans les profondeurs atteints par le front de gel dans les différentes cellules, on ne constate aucun changement (en dehors de la variabilité statistique) au niveau de la conductivité hydraulique mesurée avant et après la saison d'hiver.

Aucune des cellules n'a montré que la température du sol monte et descend durant les périodes des cycles de gel-dégel en suivant la variation de la température de l'atmosphère. On observe tant à l'automne comme au printemps la température du sol évolue progressivement. Cet effet élimine les changements de structure et la formation de vides dans les sols.

Afin d'avoir un calcul plus précis des débits au moyen des modèles numériques, il est nécessaire de faire un suivi de la hauteur d'eau accumulée sur les cellules et de mesurer le temps de transit. Cela permettra de calibrer le volume percolé cumulé mais aussi les débits non cumulés. Cette

amélioration du modèle permet de calibrer d'une manière plus précise les valeurs de conductivité hydraulique.

## RÉFÉRENCES

- Albrecht, B. A., & Benson, C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1), 67-75.
- ASTM. (2008). Particle Size Distribution of Powders by Laser Light Scattering. ASTM UOP856-07. In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2016a). Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. ASTM D3282-15. In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2016b). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM D5856-15. In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2016c). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. ASTM D5550-14 In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2016d). Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. ASTM D6836-16. In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2016e). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM D5084-16a. In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM D4318-17e1. In : American Society for Testing and Materials United States of America.
- ASTM. (2020). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-17e1 In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM D1557-12(2021). In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2022). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Coarse-Grained Soils. ASTM D2434-22. In : American Society for Testing of Materials (ASTM) West Conshohocken, PA.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers: Manuel sur cédérom*. Presses Internationales Polytechnique.

- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Maqsood, A. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symposium 2015 sur l'environnement et les mines,
- Aubertin, M., Ricard, J.-F., & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), 55-69.
- Awoh, A. S. (2012). *Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sous un recouvrement en eau*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada).
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2020). 6 Water Covers. In *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage* (pp. 135).
- Benson, C. H., Zhai, H., & Wang, X. (1994). Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2), 366-387. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:2\(366\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:2(366))
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C. G., Paktunc, D., Gould, W. D., & Johnson, D. B. (2014). 11.5 - The Geochemistry of Acid Mine Drainage. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* (pp. 131-190). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>
- Bussière, B., & Wilson, G. W. (2021). Store-and-release covers. In *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage* (pp. 115-134).
- Canada, E. e. C. c. (2022). *Données climatiques historiques*. Retrieved 03/12/2022 from [https://climat.meteo.gc.ca/index\\_f.html](https://climat.meteo.gc.ca/index_f.html)
- CEPP, C. d. e. s. l. p. p. (1998). *Le Système canadien de classification des sols (troisième édition)*. CNRC-NRC 42259 (Vol. Publication 1646). Direction generale de la recherche, Ministère de l'Agriculture et de Agro-Alimentaire du Canada.
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71(3), 401-434.
- 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.
- Chevé, N. (2019). *Évaluation de la performance des géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier* [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/3870/>
- Cloutier, V., Blanchette, D., Dallaire, P.-L., Nadeau, S., Rosa, E., & Roy, M. (2013). *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1)* (Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche Issue.
- Cloutier, V., Rosa, E., Roy, M., Nadeau, S., Blanchette, D., Dallaire, P.-L., Derrien, G., & Veillette, J. (2016). *Atlas hydrogéologique de l'Abitibi-Témiscamingue*. PUQ.

- Cossu, R. (2018). Physical Landfill Barriers: Principles and Engineering. In R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Solid Waste Landfilling* (pp. 271-287). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00015-2>
- Cossu, R., & Stegmann, R. (2018). *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technology*. Elsevier.
- Council, N. R. (2007). *Assessment of the Performance of Engineered Waste Containment Barriers*. The National Academies Press. <https://doi.org/doi:10.17226/11930>
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD),
- Daniel, D. E. (1993a). Case histories compacted clay liners and covers for waste disposal facilities. Third international conference on case histories in geotechnical engineering (1993: June 1-4; St. Louis, Missouri),
- Daniel, D. E. (1993b). Clay liners. In D. E. Daniel (Ed.), *Geotechnical Practice for Waste Disposal* (pp. 137-163). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3070-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3070-1_7)
- Daniel, D. E., & Benson, C. H. (1990). Water content-density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12), 1811-1830.
- Deb, S. K., & Shukla, M. K. (2012). Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(5), 489.
- Delage, P., & Cui, Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur-Construction*(C 301).
- Demers, I., & Pabst, T. (2021a). 13 Alternative and Innovative Integrated Mine Waste Management Approaches. In B. G. Bussière, Marie (Ed.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press.
- Demers, I., & Pabst, T. (2021b). Covers with capillary barrier effects. In *Hard Rock Mine Reclamation. From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*; Bussière, B., Guittonny, M., Eds.
- Dorsey, J., Ward, A., Fausey, N., & Bair, E. (1990). A comparison of four field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE*, 33(6), 1925-1931.
- Ebrahimi, M., & Moradi, S. (2015). A comparison of Guelph permeameter and double ring infiltrometer methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in sandy soils. *International journal of research in engineering & advanced technology*, 3(4), 218-222.
- Eigenbrod, K. (2003). Self-healing in fractured fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 435-449.
- Farthing, M. W., & Ogden, F. L. (2017). Numerical solution of Richards' equation: A review of advances and challenges. *Soil Science Society of America Journal*, 81(6), 1257-1269.

- Favaretti, M., & Cossu, R. (2018). Mineral Liners. In R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Solid Waste Landfilling* (pp. 289-312). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00016-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00016-4)
- Fernuik, N., & Haug, M. (1990). Evaluation of in situ permeability testing methods. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(2), 297-311.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- GEOSLOPE, I. (2020). *Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2020 (First Edition)*. GEOSLOPE International Ltd.
- Ghazizade, M. J., & Safari, E. (2017). Analysis of Desiccation Crack Depth in Three Compacted Clay Liners Exposed to Annual Cycle of Atmospheric Conditions with and without a Geotextile Cover. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143, 06016024.
- Gonzalez De Vallejo, L. I., & Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC press.
- GSI, E. (2000). *Projet d'implantation d'un Centre intégré de gestion de matières résiduelles MRC Rouyn-Noranda. Étude hydrogéologique des lots 55 à 58, 48-1 et 15 à 18 du canton de Rouyn*.
- Guinot, V., Cappelaere, B., & Polytech'Montpellier, S. (2005). *Méthodes Numériques Appliquées (Résolution numérique des équations différentielles de l'ingénieur)* (Vol. 2).
- Hazen, A. (1892). Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. In *Volume II State Sanitation: A Review of the Work of the Massachusetts State Board of Health, Volume II* (pp. 232-248). Harvard University Press.
- Jambor, J. (1994). Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. *The environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*, 59, 102.
- Kleinmann, R. L. P. (1981). *Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation* [Princeton University].
- Konrad, J.-M., & Ayad, R. (1997). Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 929-942.
- Konrad, J.-M., & Samson, M. (2000). Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 857-869.
- Lancellotta, R. (2008). *Geotechnical engineering*. CRC Press.
- Maqsood, A. (2022). A Simple Relationship to Estimate Parameters of the Optimum Compaction Point. *Applied Sciences*, 12(13), 6539.

- Maqsood, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2006). Modification of the predictive MK model to integrate hysteresis of the water retention curve. In *Unsaturated Soils 2006* (pp. 2465-2476).
- Maqsood, A., Bussière, B., & Mbonimpa, M. (2021). Low Saturated Hydraulic Conductivity Covers. In B. Bussière & M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press.
- Maqsood, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Wilson, W. (2007). Instrumentation and monitoring techniques for oxygen barrier covers used to control acid mine drainage. Mining Industry Conference, CIM, Montréal CD-rom,
- Marcoen, J. M., Tessier, D., Thorez, J., Monjoie, A., & Schroeder, C. (2000). *Manuel relatif aux matières naturelles pour barrières argileuses ouvragées pour CET (centres d'enfouissement technique) et réhabilitation de dépotoirs en région wallonne*.
- Martineau, P. (2018). *Plantes de l'enclave argilleuse Barlow-Ojibway-2 Québec 2018*.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R., & Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical & Geological Engineering*, 20(3), 235-259.
- Mbonimpa, M., Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Maqsood, A. (2021). Water, gas, and heat movement in cover materials. In *Hard Rock Mine Reclamation. From Prediction to Management of Acid Mine Drainage; Bussière, B., Guittonny, M., Eds.*
- MEND, M. E. N. D. (2004). *Design, Construction, and Performance Monitoring of Cover Systems for Waste Rock and Tailings* (MEND Report, Issue).
- Merzouk, A., Maqsood, A., Belem, T., Mbonimpa, M., & Viger, M. (2022). Évaluation de la performance des Amendement Des Matériaux Argileux comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier. GeoCalgary 2022: 75th Canadian Geotechnical Conference, Calgary, AB.
- Ministère de l'Environnement, d. l. L. c. l. c. c., de la Faune et des Parcs. (2012). *Climat du Québec, Classification de Köppen-Geiger, Basée sur les normales 1981-2010*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/cartes/Classification-Koppen.pdf>
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol* (Vol. 6). PPUR presses polytechniques.
- Nagy, L., Tabácks, A., Huszák, T., Mahler, A., & Varga, G. (2013). Comparison of permeability testing methods. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris,
- Nordstrom, D. K. (2000). Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters. *International Geology Review*, 42(6), 499-515.
- Ouranos. (2022). *Portraits climatiques*. Retrieved 03/12/2022 from <https://www.ouranos.ca/fr/portraits-climatiques>

- Pabst, T. (2020). Elevated water table with monolayer covers. In *Hard Rock Mine Reclamation. From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*; Bussière, B., Guittonny, M., Eds.
- Plante, B., Schudel, G., & Benzaazoua, M. (2021). Generation of acid mine drainage. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, 1-20.
- Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées, LQE chapitre Q-2, r. 22. À jour au 1er juin 2022, (2022).
- Rarison, R. F. (2021). *Évaluation des propriétés chimiques, mécaniques et hydrogéologiques de géomembranes utilisées comme matériaux de recouvrement pour restaurer des sites miniers en milieu froid et acide* Polytechnique Montréal].
- Rayhani, M., Yanful, E., & Fakher, A. (2008). Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering geology*, 97(1-2), 25-31.
- Reddy, J. (2004). *An introduction to the finite element method* (Vol. 1221). McGraw-Hill New York.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.
- Richardson, L. F. (1922). *Weather prediction by numerical process*. University Press.
- Ritchie, A. (1994). The waste-rock environment. Chapter 5, The waste-rock environment. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. Edited by DW Blowes and JL Jambor.
- 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, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Roque, A. J., & Didier, G. (2006). Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions. *Engineering geology*, 85(1-2), 147-157.
- Shakoor, A., & Cook, B. D. (1990). The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 27(2), 245-253.
- Solutions-Mesonet. (2023). *Données Ratiation Solaire, Station Rouyn CWUY, 2021-2022*. [www.solutions-mesonet.org](http://www.solutions-mesonet.org)
- Sterpi, D. (2015). Effect of freeze–thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy. *Soils and Foundations*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.030>
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics: III–Determination of permeability of clay. *Engineering News-Record*, 95(21), 832-836.
- Tremblay, G. (1974). *Géologie du quaternaire région d'Abitibi, centre ouest, comtés d'Abitibi-ouest, d'Abitibi-est et de Rouyn-Noranda et: rapport interimaire*. Ministère des richesses naturelles, Service de l'exploration géologique.

- Wagner, J. F. (2013). Chapter 5.3 - Clay Liners and Waste Disposal. In F. Bergaya & G. Lagaly (Eds.), *Developments in Clay Science* (Vol. 5, pp. 663-676). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098259-5.00023-8>
- Zeng, L.-L., Hong, Z.-S., Cai, Y.-Q., & Han, J. (2011). Change of hydraulic conductivity during compression of undisturbed and remolded clays. *Applied Clay Science*, 51(1-2), 86-93.

**ANNEXES**

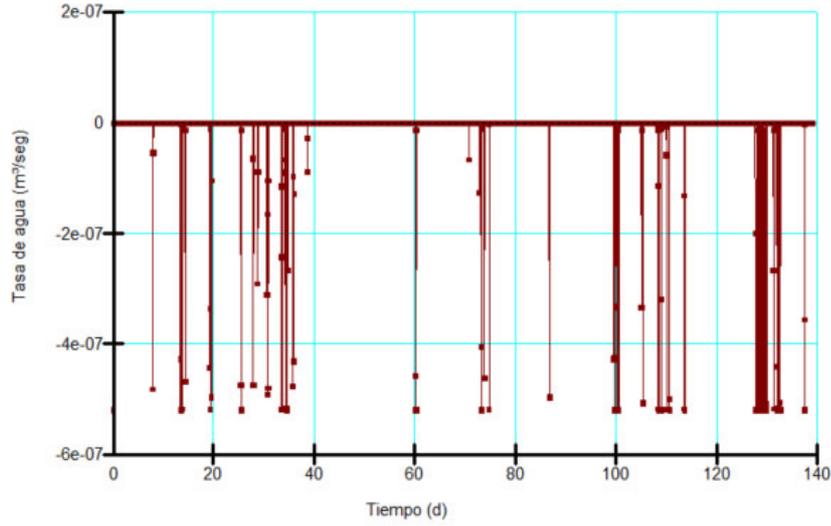
ANNEXE A RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES  
DEBIT DE SORTIE

Projet *Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile*  
Realisé par: Alejandro E. GRANADOS BECERRA

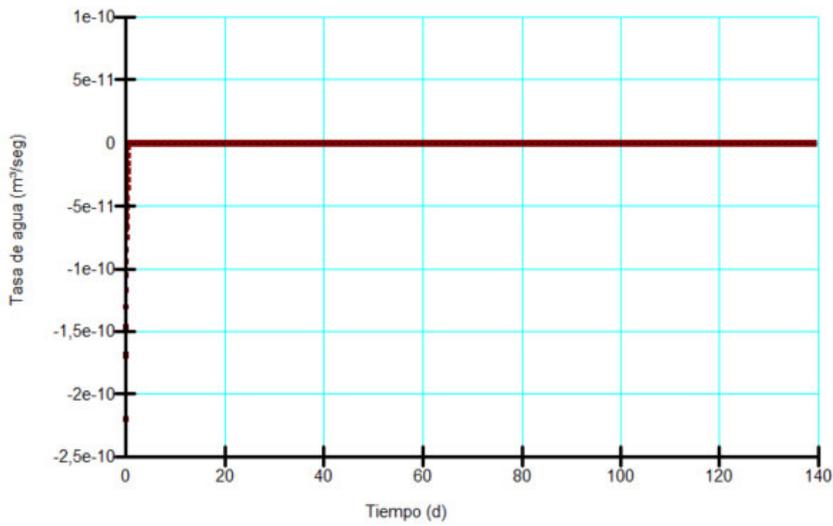
Cellule 1

Materiau: Argile

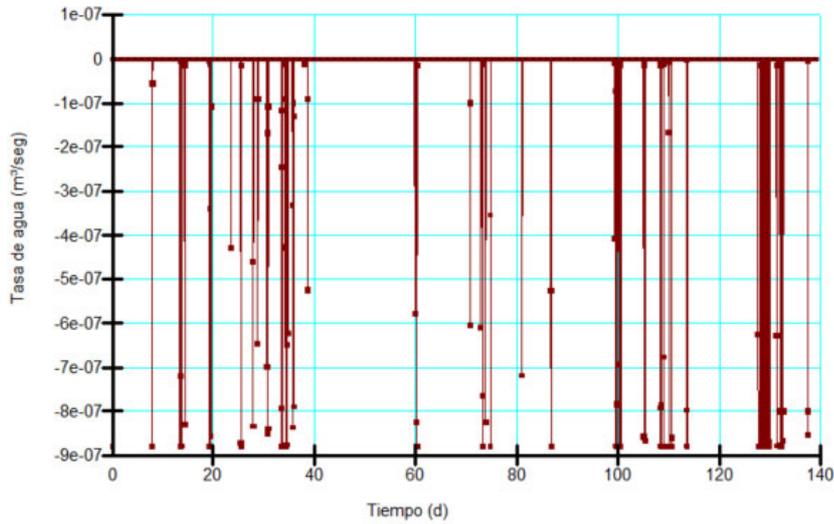
$k_{sat} = 5.2 \times 10^{-7}$  m/s



$k_{sat} = 2.2 \times 10^{-10}$  m/s

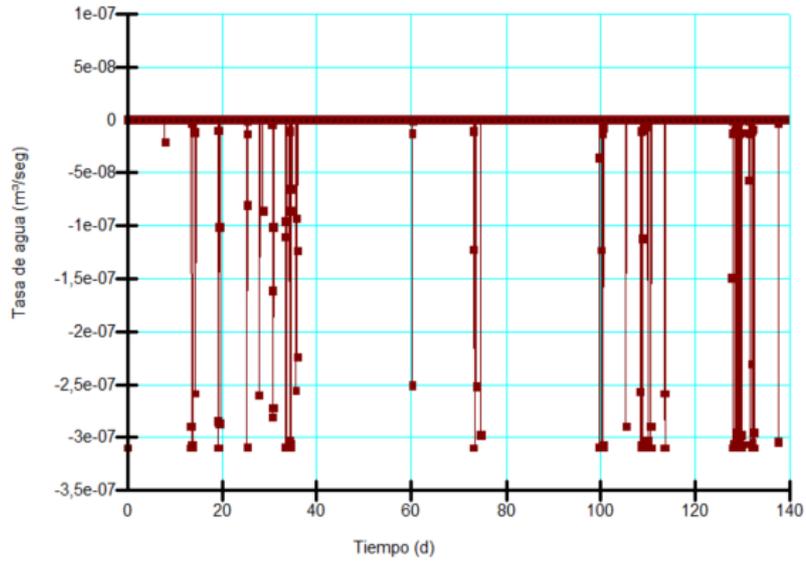


$k_{sat} = 8.8 \times 10^{-7}$  m/s



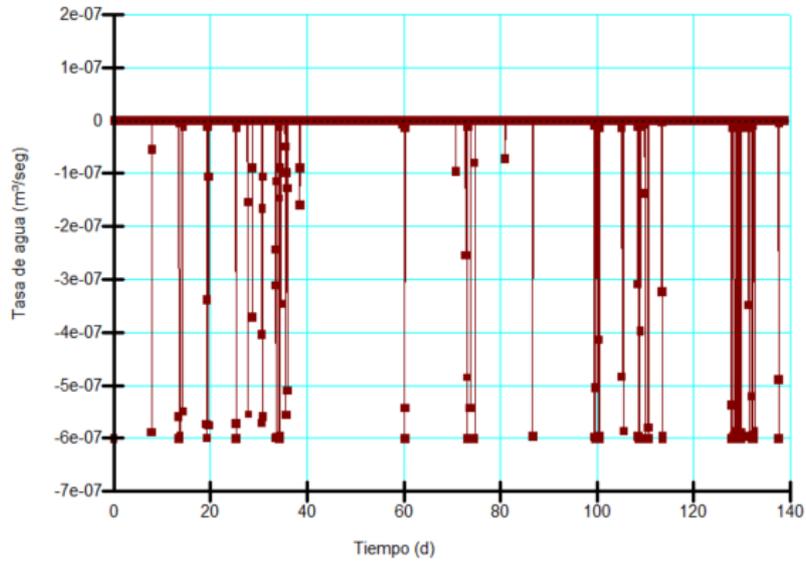
---

$$k_{\text{sat}} = 3.1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$



---

$$k_{\text{sat}} = 6.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$



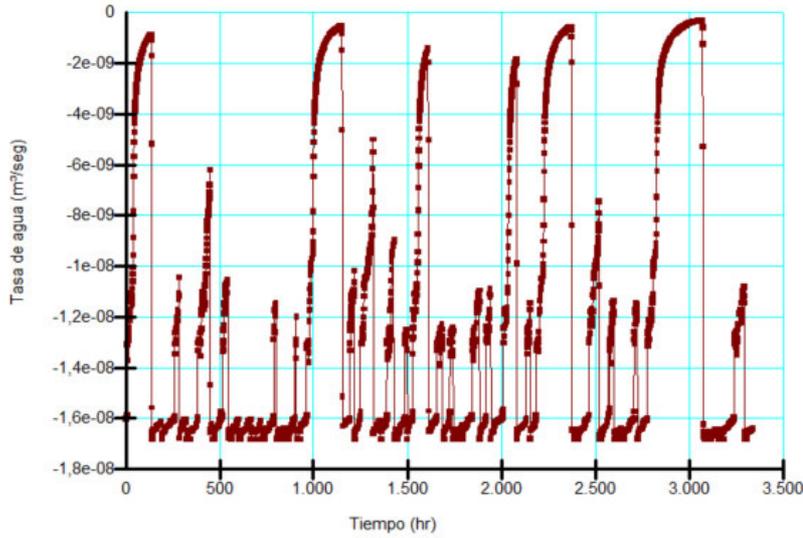
ANNEXE A RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES  
DEBIT DE SORTIE

Projet *Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile*  
Realisé par: Alejandro E. GRANADOS BECERRA

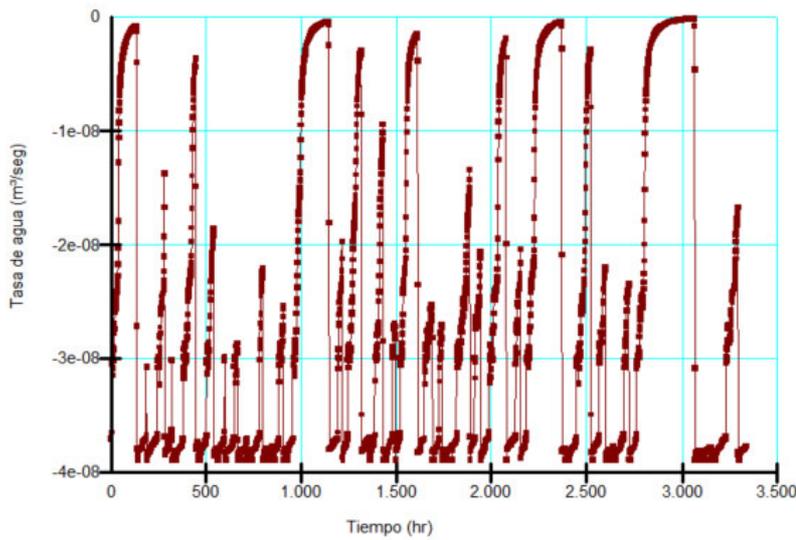
Cellule 2

Materiau: Amendement Argile - Sable

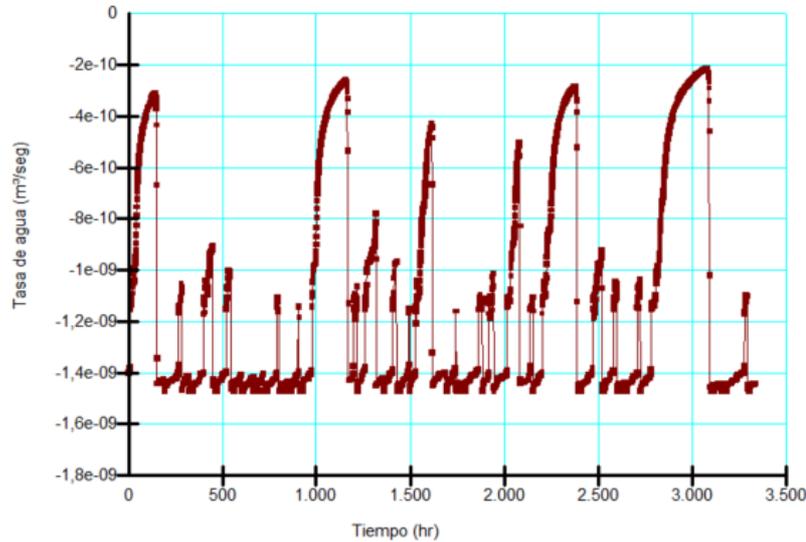
$k_{sat} = 1.6 \times 10^{-8}$  m/s



$k_{sat} = 3.7 \times 10^{-8}$  m/s

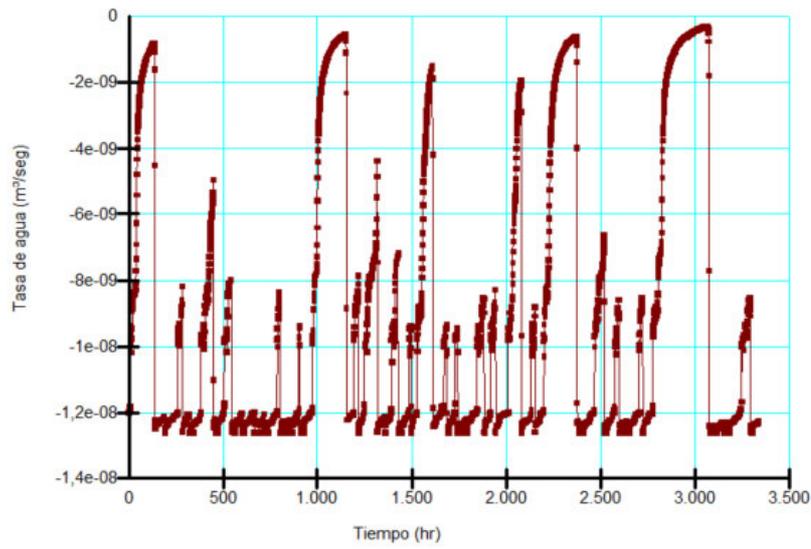


$k_{sat} = 1.4 \times 10^{-9}$  m/s



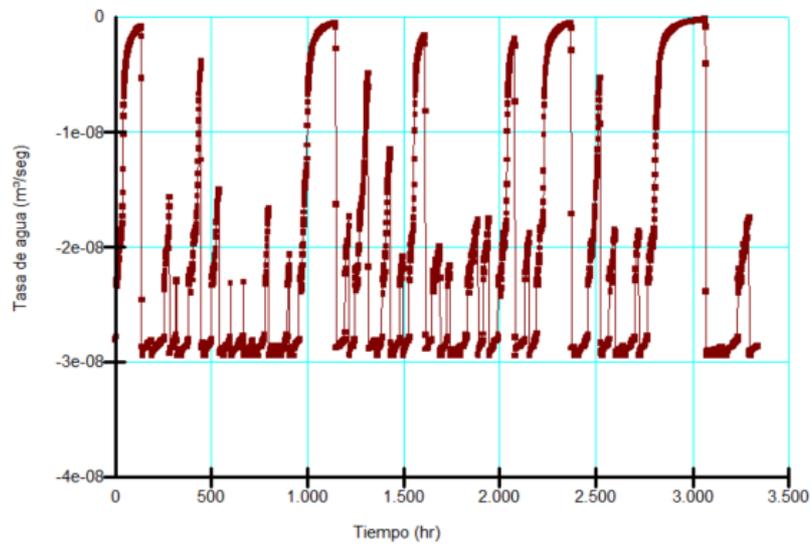
$k_{sat} = 1.2 \times 10^{-8}$  m/s

---



$k_{sat} = 6.6 \times 10^{-7}$  m/s

---



ANNEXE A RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES  
DEBIT DE SORTIE

Projet

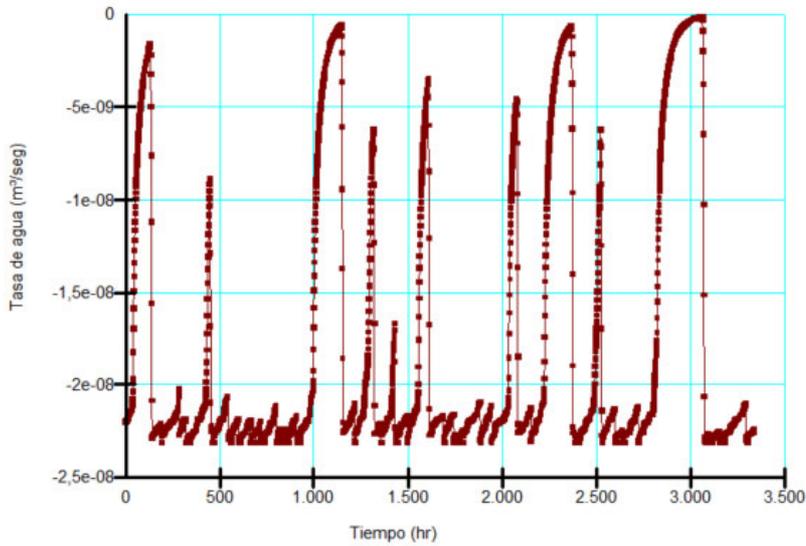
Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile

Cellule 3

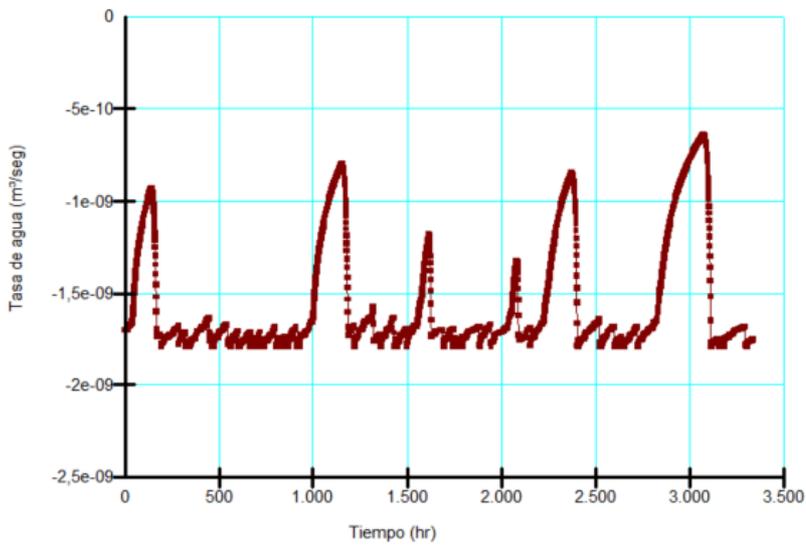
Realisé par: Alejandro E. GRANADOS BECERRA

Materiau: Amendement Argile - Silt

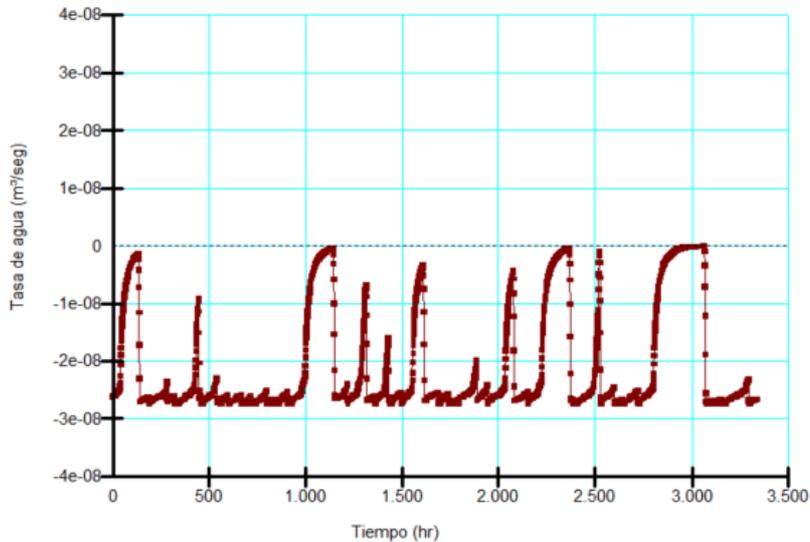
$k_{sat} = 2.2 \times 10^{-8}$  m/s



$k_{sat} = 1.7 \times 10^{-9}$  m/s

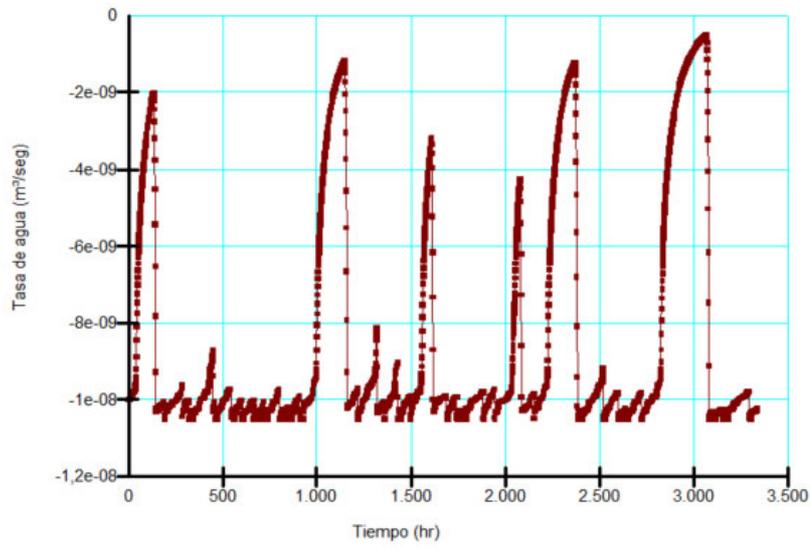


$k_{sat} = 2.6 \times 10^{-8}$  m/s



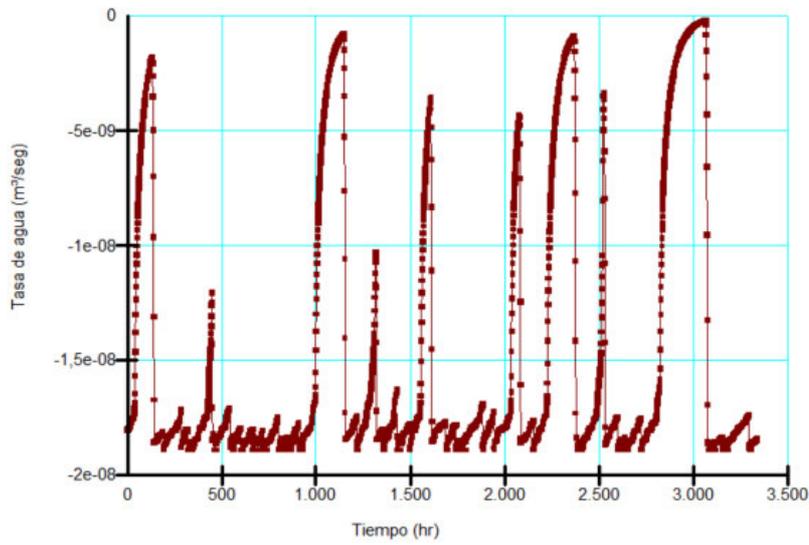
---

$$k_{\text{sat}} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$



---

$$k_{\text{sat}} = 6.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$



ANNEXE A RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES  
DEBIT DE SORTIE

Projet

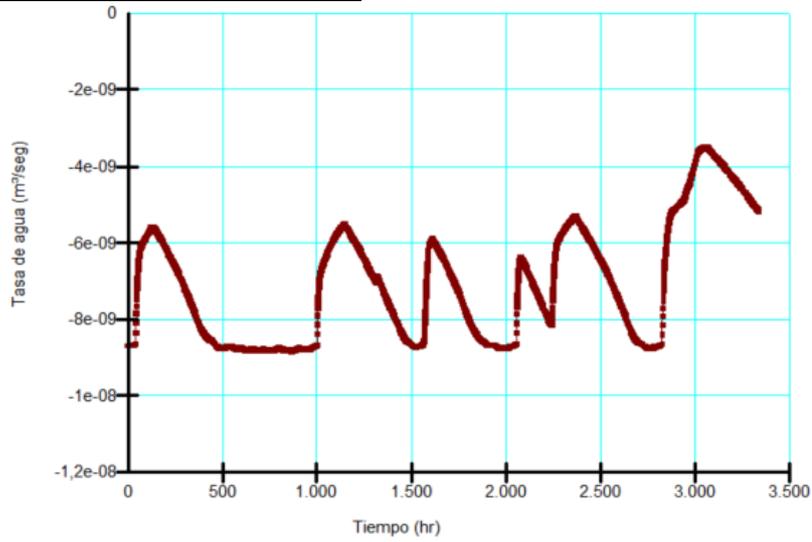
Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile

Cellule 3

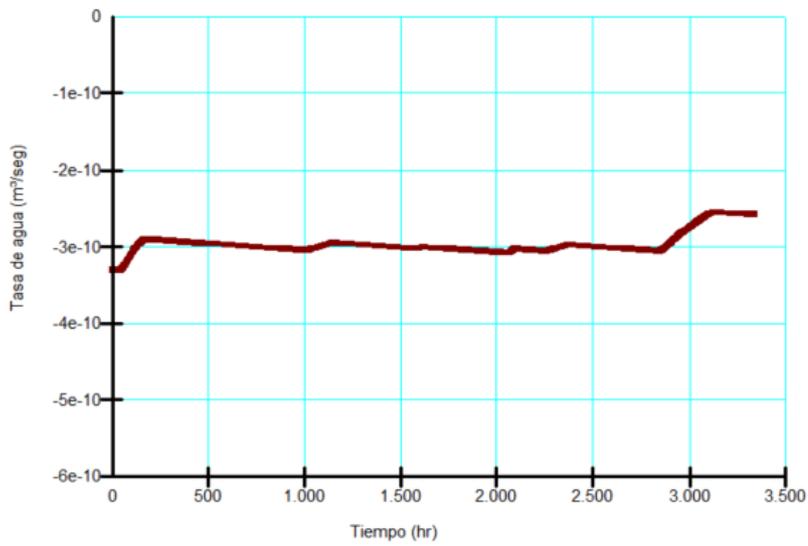
Realisé par: Alejandro E. GRANADOS BECERRA

Materiau: Amendement Argile - Silt

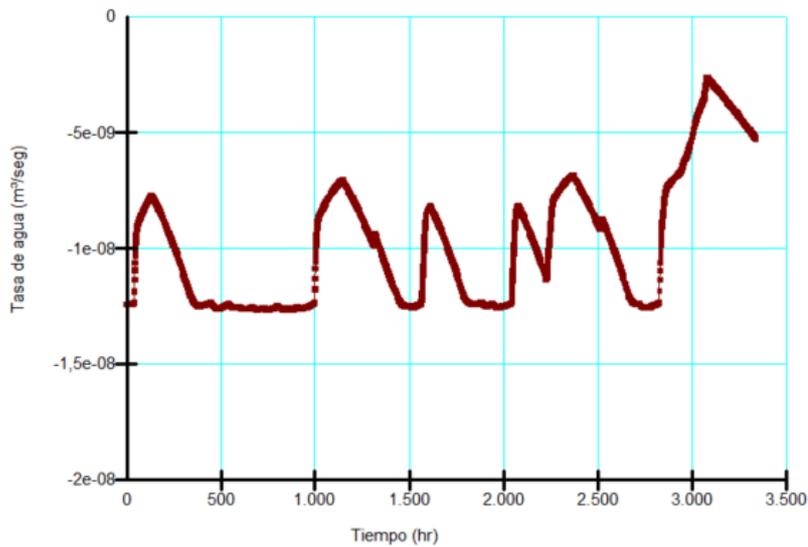
$k_{sat} = 5.8 \times 10^{-9}$  m/s



$k_{sat} = 2.2 \times 10^{-10}$  m/s

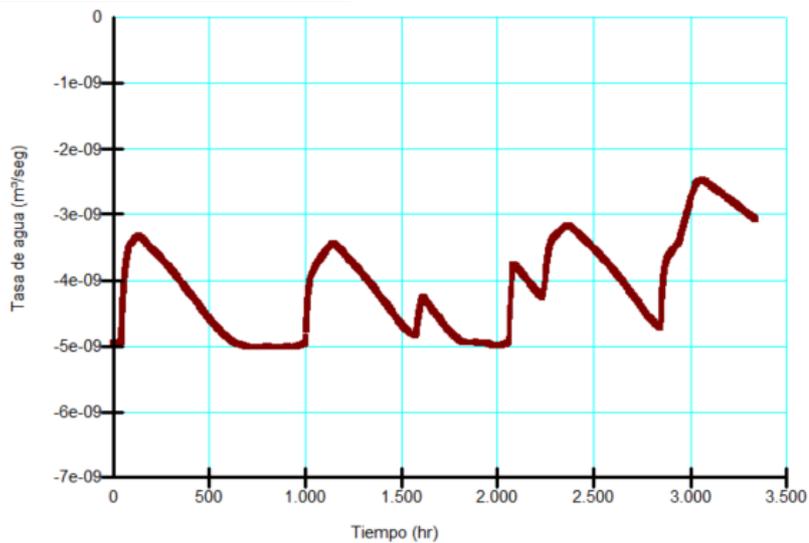


$k_{sat} = 8.3 \times 10^{-9}$  m/s



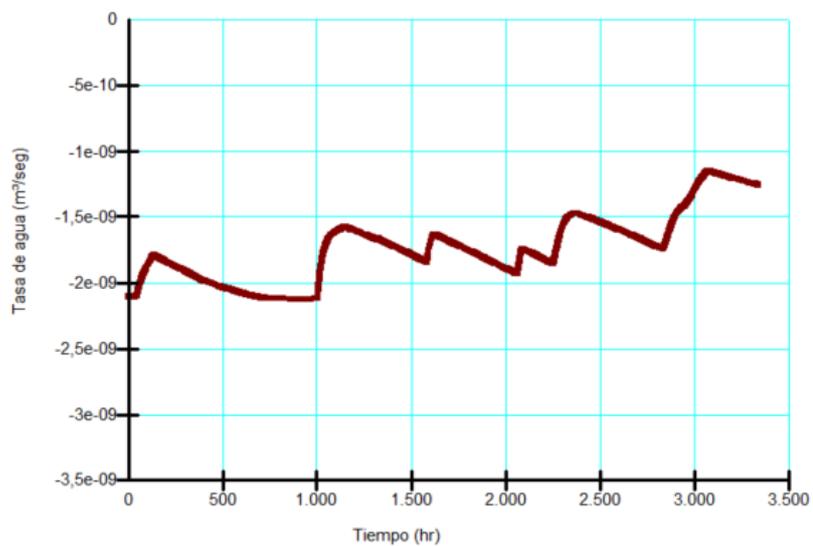
---

$$k_{sat} = 3.3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$$



---

$$k_{sat} = 1.9 \times 10^{-9} \text{ m/s}$$

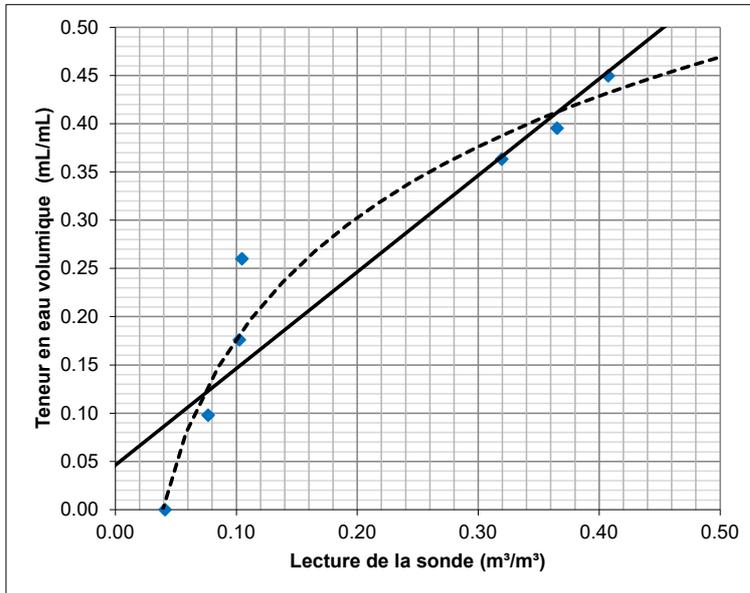


**CALIBRATION SONDES TEROS 11**

**Projet** *Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile* **Date:** 2/09/2022  
**Realisé** Alejandro E. GRANADOS BECERRA **Materiau:** Argile Cellule 1

Poids moule	115.10	D (cm)	10.19
Poids sonde	255.00	h (cm)	20.17

	Tare	Tare+Mh	Tare+Ms	W%	Moule+Mh+sonde	V <sub>eau</sub>	TEV mesurée	Lecture sonde	S
1	10	15	15	0	2273.7	0	0	0.041	0.00
2	6.1	77.5	72	8%	2462.5	161.2	0.098	0.077	0.17
3	6.2	77.1	67.8	15%	2575.8	289.3	0.176	0.103	0.31
4	6.3	110.9	92.8	21%	2841.5	427.7	0.260	0.104	0.49
5	6.1	157.2	127.5	24%	3408.8	597.3	0.363	0.319	0.82
6	5.9	125.6	100	27%	3409.9	650.1	0.395	0.365	0.87
7			SATURATION				0.450	0.407	1.00



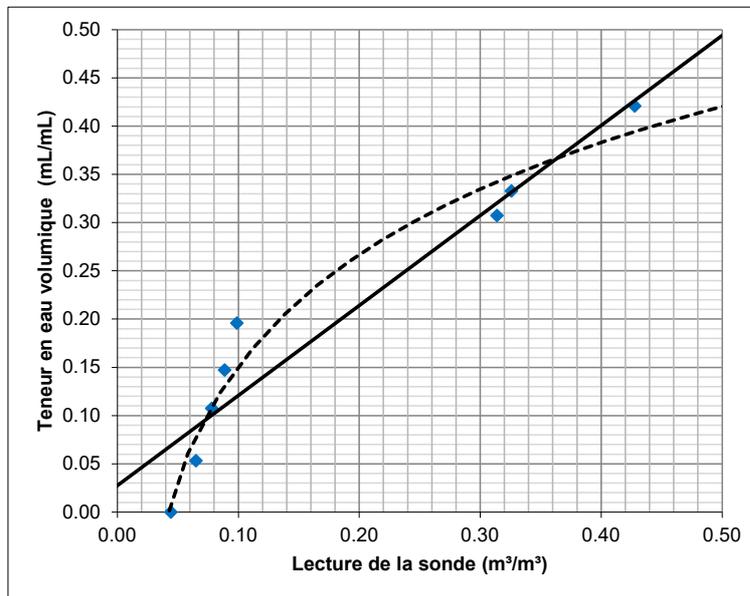
Type de régression	Équation de calibration	R <sup>2</sup>
Régression linéaire	$y = 1.0008 x + 0.0464$	0.871
Régression logarithmique	$y = 0.1814 \ln(x) + 0.5947$	0.951

**CALIBRATION SONDES TEROS 11**

**Projet** *Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile* **Date:** 1/09/2022  
**Realisé** Alejandro E. GRANADOS BECERRA **Materiau:** Amendement Cellule 2

<b>Poids moule</b>	115.10	<b>D (cm)</b>	10.19
<b>Poids sonde</b>	255.00	<b>h (cm)</b>	20.17

	Tare	Tare+Mh	Tare+Ms	W%	Moule+Mh+sonde	V <sub>eau</sub>	TEV mesurée	Lecture sonde	S
1	10	15	15	0	2395.6	0	0	0.044	0.00
2	6.3	87.3	84.1	4%	2589.4	87.7	0.053	0.065	0.10
3	6.1	95.5	88.7	8%	2697.1	177.0	0.108	0.078	0.21
4	6.4	98.6	88.9	12%	2672.5	242.2	0.147	0.088	0.28
5	6.5	117.3	102.4	16%	2766.1	322.2	0.196	0.099	0.37
6	6.1	160.5	134.6	20%	3383.7	505.5	0.307	0.314	0.72
7	6	209.7	173.8	21%	3476.2	547.4	0.333	0.326	0.80
8	SATURATION						0.421	0.428	1.00



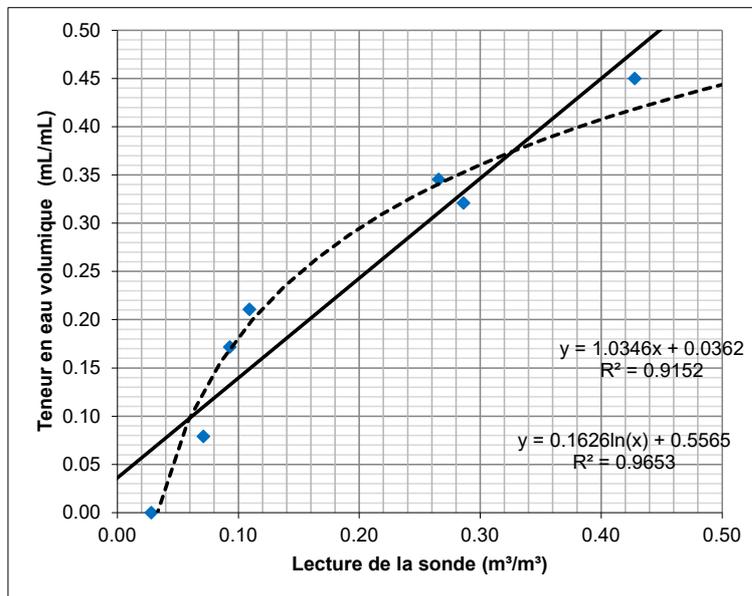
Type de régression	Équation de calibration	R <sup>2</sup>
Régression linéaire	$y = 0.9328 x + 0.0276$	0.911
Régression logarithmique	$y = 0.1674 \ln(x) + 0.5363$	0.963

**CALIBRATION SONDES TEROS 11**

**Projet** *Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile* **Date:** 1/09/2022  
**Realisé** Alejandro E. GRANADOS BECERRA **Materiau:** Amendement Cellule 3

Poids moule	115.10	D (cm)	10.19
Poids sonde	255.00	h (cm)	20.17

	Tare	Tare+Mh	Tare+Ms	W%	Moule+Mh+sonde	V <sub>eau</sub>	TEV mesurée	Lecture sonde	S
1	10	15	15	0		0	0	0.028	0.00
2	6.4	73.3	69.3	6%	2544.1	130.0	0.079	0.071	0.15
3	6.5	125.4	110	15%	2549.3	282.3	0.172	0.093	0.30
4	6.1	72.6	62.6	18%	2676.7	346.9	0.211	0.109	0.38
5	6.3	222.7	184.6	21%	3366.9	527.6	0.321	0.286	0.74
6	6.3	208.7	169.2	24%	3279.9	567.9	0.345	0.266	0.74
7			SATURATION				0.450	0.428	1.00



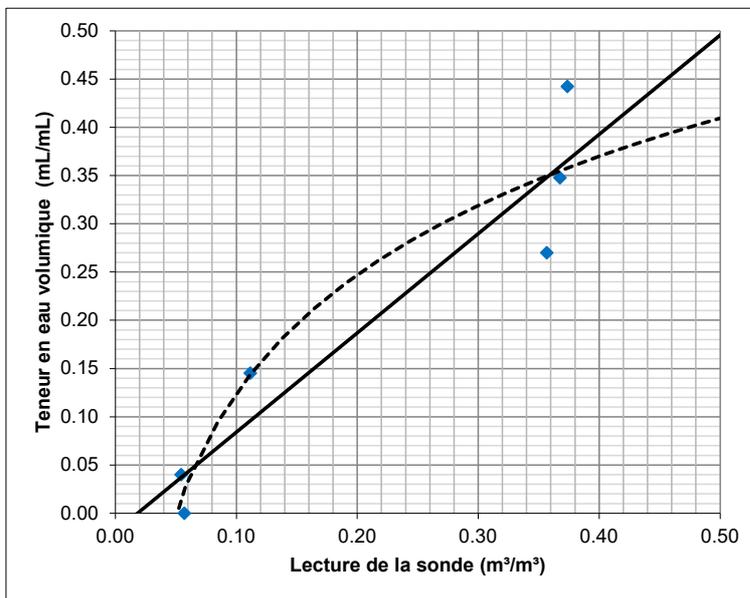
Type de régression	Équation de calibration	R <sup>2</sup>
Régression linéaire	$y = 1.0346 x + 0.0362$	0.915
Régression logarithmique	$y = 0.1626 \ln(x) + 0.5565$	0.965

**CALIBRATION SONDES TEROS 11**

**Projet** *Évaluation sur le terrain de la performance des recouvrements à base d'argile* **Date:** 2/09/2022  
**Realisé** Alejandro E. GRANADOS BECERRA **Materiau:** Silt

Poids moule	115.10	D (cm)	10.19
Poids sonde	255.00	h (cm)	20.17

	Tare	Tare+Mh	Tare+Ms	W%	Moule+Mh+sonde	V <sub>eau</sub>	TEV mesurée	Lecture sonde	S
1	10	15	15	0	2273.7	0	0	0.057	0.00
2	6.3	34.9	34	3%	2462.5	65.8	0.040	0.054	0.07
3	6.6	50.9	46.1	12%	2575.8	238.9	0.145	0.111	0.26
4	2.1	53.3	44.1	22%	2841.5	444.0	0.270	0.357	0.50
5	2.1	56.3	46.1	23%	3408.8	571.7	0.348	0.368	0.79
7			SATURATION				0.442	0.374	1.00



Type de régression	Équation de calibration	R <sup>2</sup>
Régression linéaire	$y = 1.0289 x - 0.0188$	0.895
Régression logarithmique	$y = 0.1772 \ln(x) + 0.5322$	0.904