

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Évaluation de la performance des géocomposites bentonitiques comme  
barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier**

**NATHALIE CHEVÉ**

Département de génie civil, géologique et des mines

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

Génie minéral

Avril 2019

© Nathalie Chevé, 2019.



# 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 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. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## **Warning**

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit 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. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Évaluation de la performance des géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier**

présenté par **Nathalie CHEVÉ**

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

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

**Carmen M. NECULITA**, présidente

**Bruno BUSSIÈRE**, membre et directeur de recherche

**Carlos OVALLE**, membre

**Jean CÔTÉ**, membre

**DÉDICACE**

*À Marco, Monique et Serge*

## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier d'entrée de jeu tous ceux et celles qui m'ont encouragé à aller au bout de mes ambitions et à sortir de ma zone de confort en entreprenant une maîtrise de recherche en génie minéral.

Un très grand merci à Bruno Bussière, mon directeur de recherche, qui m'a donné ma chance et m'a permis de vivre une expérience positive et enrichissante au sein de l'IRME. Merci Bruno pour ton encadrement, ta grande disponibilité, tes judicieux conseils et ta patience. Merci également à Benoit Plante pour sa collaboration au présent projet de recherche et pour avoir pris le temps de répondre à chacune de mes (très) nombreuses questions de géochimie tout au long de la maîtrise, ainsi qu'à Marie Guittonny pour la supervision de stage MITACS.

Je tiens à remercier tout l'équipe technique de l'URSTM pour leur aide au laboratoire, leur créativité, leur ingéniosité et leur bonne humeur quotidienne. Je remercie également tous mes collègues et amis de l'IRME, mais tout particulièrement Gwendoline, Chloé, Emma et Vincent pour les nombreux bons conseils et pour les agréables moments passés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des murs de l'UQAT.

Merci à la mine La Ronde d'Agnico Eagle pour sa collaboration au projet, à Sandra Pouliot et à Mine Canadian Malartic de m'avoir permis de réaliser un stage en entreprise en cours de maîtrise, et à toutes les personnes et organisations qui ont été impliquées de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de recherche. Un merci particulier à Ingénieurs Canada, Manuvie et le CRSNG pour leur généreux soutien financier.

Finalement, merci à Josée-Pascale, pour avoir pavé la voie du retour aux études, à Patrick pour les visites en Abitibi et les nombreuses et passionnantes discussions scientifiques, à Serge et Monique pour leur soutien et leurs encouragements et à Marco pour sa patience et sa compréhension.

## RÉSUMÉ

Les deux principaux types de rejets solides générés par l'industrie minière sont les stériles miniers et les résidus miniers (aussi appelés rejets de concentrateur). Ces rejets peuvent contenir des minéraux sulfureux et s'ils sont entreposés en surface et exposés à l'air et à l'eau, ils ont le potentiel de produire du drainage minier acide (DMA). Ce dernier est caractérisé par un  $\text{pH} < 6$  et un contenu en métaux dissous et en sulfates élevé (Aubertin et al., 2002; Blowes et al., 2014). Une méthode de restauration éprouvée pour limiter la production de DMA, tant pour les sites miniers en exploitation que ceux abandonnés, consiste à recouvrir les rejets sulfureux de matériaux limitant l'infiltration d'eau et/ou d'oxygène (Aubertin et al., 2002; INAP, 2012). Le géocomposite bentonitique (GCB) est un matériau de plus en plus considéré comme couche de faible conductivité hydraulique au sein de recouvrement de sites minier. Il s'agit d'un matériau usiné d'environ 1 cm d'épaisseur fait de bentonite (argile gonflante) encapsulée entre 2 géotextiles. La performance de GCB dans des recouvrements miniers et, plus particulièrement, en climat froid (i.e, soumis à des cycles de gel-dégel), est cependant peu documentée, bien que des risques de performance moindre qu'attendu aient été identifiés dans ce contexte d'utilisation. Le présent projet de recherche vise donc évaluer en laboratoire la performance d'un GCB comme barrière aux fluides responsables du DMA, dans un contexte de recouvrement minier.

Dans le cadre de cette étude, des essais ont été réalisés sur un GCB conventionnel (GCB non tissé et renforcé (SRNW)). Les essais en laboratoire ont été divisés en deux volets : la caractérisation du GCB utilisé et, plus particulièrement, de la bentonite qu'il contient, puis l'étude des propriétés hydrauliques et diffusives d'échantillons de GCB hydratés à l'eau ou au drainage minier acide synthétique (DMAS). Les propriétés hydrauliques et diffusives évaluées étaient la conductivité hydraulique saturée avant et après des cycles de gel-dégel, la courbe de rétention d'eau (CRE) et le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène ( $D_e$ ), tant pour une hydratation à l'eau déionisée (DI) qu'au DMAS. L'évolution de la qualité du DMAS percolant au travers des échantillons de GCB a également été suivie en cours d'essais de perméabilité. Des analyses minéralogiques ont été réalisées sur les échantillons saturés afin de documenter l'impact chimique et minéralogique d'une perméation au DMAS sur la bentonite.

Les résultats ont indiqué que sous de faibles pressions de confinement, similaires à celles exercées par un recouvrement minier, la conductivité hydraulique saturée des échantillons de GCB hydratés

au DMAS était d'environ  $10^{-8}$  cm/s, soit un ordre de grandeur de moins que celle d'échantillons hydratés à l'eau DI. Une différence d'un ordre de grandeur additionnel a été observée pour un échantillon soumis à des cycles de gel-dégel ( $10^{-7}$  cm/s), tandis qu'une augmentation de deux ordres de grandeur ( $10^{-6}$  cm/s) a été mesurée pour un échantillon soumis à des cycles de gel-dégel et une désaturation occasionnelle. Cette diminution de performance a été attribuée à la formation de fissures dans la bentonite lors du gel ou du séchage des échantillons, qui n'étaient pas réparées lors d'hydratation subséquences dû à une diminution du pouvoir gonflant de la bentonite causée par la perméation au DMAS. Les résultats des analyses chimiques, électrochimiques et minéralogiques ont également indiqué que les étapes typiques de neutralisation d'un DMAS avec faible pH et concentration élevée en sulfate et en fer ont été suivies en cours de perméation. Les essais ont toutefois été interrompus à des pH de 3,2 et 3,5, sans qu'un équilibre chimique n'ait été atteint.

Des CRE similaires ont été obtenues pour les échantillons hydratés à l'eau DI et au DMAS. Les résultats indiquent que d'importantes forces de succion doivent être appliquées (0,1 à 0,45 MPa) afin de désaturer un GCB initialement bien hydraté. Les valeurs de  $D_e$  n'ont pour leur part pas été impactées par la nature du liquide hydratant utilisé. Les valeurs obtenues de  $2,1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s à  $1,6 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, pour des  $S_r$  de 88 à 94 %, correspondent à celles estimées par le modèle d'Aachib et al. (2004). Toutefois, puisque les GCB saturés au DMAS étaient tous plus minces que ceux hydratés à l'eau DI, le flux diffusif au travers du GCB devrait être moindre dans le cas d'une hydratation au DMAS, pour un même  $D_e$ . Sur la base de ces résultats, il a été conclu que dans des conditions de laboratoires contrôlées, et pour le GCB et le DMAS utilisé, l'hydratation au DMAS sous de faibles pressions de confinement a affecté négativement la performance du GCB comme barrière à l'eau et à l'oxygène.

À la suite de ces travaux de recherche, il est recommandé de réaliser des essais de laboratoire complémentaires afin de déterminer la conductivité hydraulique saturée du GCB lorsque l'équilibre chimique est atteint, et de documenter la formation et la réparation des fissures se développant lors du gel et du séchage des échantillons. Il est également suggéré de réaliser des essais de perméabilité à très long terme sur des GCB traités aux polymères (résistance chimique accrue) afin de comparer les résultats obtenus à ceux de GCB conventionnels. Finalement, il est recommandé de poursuivre les travaux de recherche à l'échelle du terrain, afin de valider les degrés de saturation pouvant être atteints sur le terrain et l'influence des sols adjacents au GCB sur la qualité de l'hydratation.

## ABSTRACT

The two main types of mine waste generated by the mining industry are waste rocks and tailings. Both types of wastes may contain sulphide minerals and when they are stored on the surface and exposed to oxygen and water, they have the potential to generate acid mine drainage (AMD). The latter is characterized by a  $\text{pH} < 6$ , elevated level of dissolved heavy metals and high sulfate contents (Aubertin et al., 2002; Blowes et al., 2014). A proven reclamation method to mitigate AMD production is the construction of engineered multilayered covers over the mine wastes to prevent the infiltration of water and / or oxygen (Aubertin et al., 2002; INAP, 2012). Presently, geosynthetic clay liners (GCLs) are increasingly being considered as low saturated hydraulic conductivity materials as part of engineered covers. A GCL is manufactured in thin sheets (~5-10 mm) that consist of a layer of bentonite interlaid between two geotextiles. Although literature on the properties of GCLs in a mining context are more frequent, research gaps still exist, particularly with respect to the application of GCLs in mine waste covers in cold climates (exposed to freeze-thaw cycles). The main objective of this research project is to assess in the laboratory the performance of a GCL as a fluid barrier in the context of an engineered mine cover installed over acid-generating mine wastes.

As part of this study, tests were performed on a conventional GCL (geosynthetic clay liner with non-woven and scrim-reinforced geotextiles). Laboratory experiments were divided into two parts: the laboratory characterization of the GCL used and more particularly, the bentonite it contains, then the determination of the hydraulic and diffusive properties of GCB samples hydrated with deionized water (DIW) or with a synthetic acid mine drainage (SAMD). The hydraulic and diffusive properties evaluated were the saturated hydraulic conductivity before and after freeze-thaw cycles, the water retention curve (WRC) and the effective diffusion coefficient ( $D_e$ ) at high saturation value ( $S_r$ ), both for permeation with DIW and SAMD. The evolution of the quality of the percolating SAMD through the GCL samples was also monitored during the permeability tests, as well as mineralogical composition of the bentonite after permeation.

The results indicated that under low-pressure conditions, similar to those encountered in a mine cover, the saturated hydraulic conductivity of samples permeated with SAMD was approximately  $10^{-8}$  cm/s, which is an order of magnitude higher than for samples permeated with DIW. An additional order of magnitude of difference was observed ( $10^{-7}$  cm/s) for a sample subjected to

freeze-thaw cycles (FTCs), while an increase of two orders of magnitude ( $10^{-6}$  cm/s) was measured for the sample subjected occasional desaturation after a series of FTCs. This decrease in performance was attributed to the formation of cracks during the frost or the drying phase that did not self-healed during the subsequent permeation, due to the loss of swelling capacity induced by SAMD. The results of the chemical, electrochemical and mineralogical analyses also indicated that the SAMD followed the typical pH-buffering sequence associated with geochemical reactions observed during the neutralization of AMD with low pH and high Fe and  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations. The permeability tests were ended at pH of 3,2 et 3,5, before chemical equilibrium could be reached.

Similar WRCs were obtained for GCL hydrated with DIW and DMAS. In both cases, the WRC indicates that large suction must be applied (0.1 to 0.45 MPa) to desaturate an initially well-hydrated GCL. The  $D_e$  values did not vary according to the permeating liquid and led to values of  $2.1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s to  $1.6 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, for  $S_r$  of 88 at 94%. These values correspond to those estimated by the Aachib et al. (2004) model. However, since GCLs permeated with SAMD were all thinner than those permeated with DIW, it is expected that the diffusive flux through the GCL would be higher in the case a permeation with SAMD, for a same  $D_e$  value. Based on these results, it was concluded that under controlled laboratory conditions, and for GCL and SMAD used in this study, permeation with SAMD under low-pressure conditions negatively affected the performance of the GCL as a barrier to water and oxygen.

Based on this research, it is recommended to conduct additional laboratory tests to determine the long-term saturated hydraulic conductivity (upon reaching a chemical equilibrium) of the GCL under study and further document the formation and repair of cracks that form during freezing and drying. It is also suggested to carry out long-term permeability tests on polymer-modified GCL (treated to enhance the chemical resistance of the bentonite) in order to compare the obtained results with those of conventional GCL. Finally, it is recommended to construct field experimental cells to validate the degree of saturation that can be achieved in the field and the influence of the soil layers adjacent to GCL on the quality of the hydration.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XVII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XXII
LISTE DES ANNEXES.....	XXVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Drainage minier acide.....	2
1.2 Recouvrements d'ingénierie de type multicouches.....	4
1.2.1 Généralités.....	4
1.2.2 Barrières à l'eau.....	5
1.3 Contexte et objectif du projet de recherche.....	8
1.4 Contenu du mémoire et retombées du projet.....	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	10
2.1 Composantes des géocomposites bentonitiques.....	10
2.1.1 Bentonite .....	11
2.1.2 Géotextiles.....	16
2.1.3 Aiguilletage .....	17
2.2 Propriétés physiques.....	18
2.2.1 Épaisseur du GCB .....	19

2.2.2	Diamètre des fibres aiguilletées .....	19
2.2.3	Masse surfacique .....	20
2.2.4	Teneur en eau initiale, actuelle et normalisée .....	21
2.2.5	Indice des vides apparent .....	23
2.3	Propriétés hydriques .....	23
2.3.1	Gonflement libre.....	23
2.3.2	Conductivité hydraulique saturée .....	24
2.3.3	Courbe de rétention d'eau .....	26
2.4	Propriétés diffusives .....	38
2.5	Facteurs d'influence des propriétés et du comportement .....	41
2.5.1	Facteurs intrinsèques .....	41
2.5.2	Facteurs externes ayant une influence à court et moyen terme .....	45
2.5.3	Facteurs externes ayant une influence à long terme .....	52
2.6	Besoins en recherche .....	57
CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES .....		58
3.1	Caractérisation des échantillons solides .....	58
3.1.1	Provenance des échantillons.....	58
3.1.2	Préparation des échantillons .....	58
3.1.3	Masse surfacique de bentonite sèche.....	60
3.1.4	Teneur en eau initiale .....	60
3.1.5	Densités relatives ( $G_s$ ).....	61
3.1.6	Analyse granulométrique de la bentonite .....	62
3.1.7	Limites d'Atterberg de la bentonite.....	62
3.1.8	Analyses élémentaires de la bentonite.....	64

3.1.9	Minéralogie de la bentonite .....	65
3.2	Caractérisation des échantillons liquides.....	70
3.2.1	Préparation du drainage minier acide synthétique (DMAS) .....	70
3.2.2	Analyses chimiques et électrochimiques du DMAS .....	71
3.2.3	Force ionique et quantité relative de cations monovalents et multivalents .....	74
3.2.4	Masse volumique du DMAS .....	76
3.3	Évaluation des propriétés hydrogéologiques .....	76
3.3.1	Essais de perméabilité .....	76
3.3.2	Effet des cycles de gel et dégel sur la conductivité hydraulique saturée .....	80
3.3.3	Teneur en eau, porosité et degré de saturation .....	83
3.3.4	Courbe de rétention d'eau .....	84
3.4	Évaluation des propriétés diffusives.....	86
CHAPITRE 4 ARTICLE 1: LABORATORY INVESTIGATION OF THE COMBINED EFFECTS OF ACID MINE DRAINAGE AND FREEZE-THAW CYCLES ON THE SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF A GEOSYNTHETIC CLAY LINER .....		93
4.1	Introduction .....	94
4.2	Materials and methods.....	96
4.2.1	Geosynthetic clay liners .....	96
4.2.2	Permeant liquids .....	98
4.2.3	Permeability tests and freeze-thaw cycles.....	99
4.2.4	Chemical and thermodynamic equilibrium evaluation .....	100
4.2.5	Post-testing chemical and mineralogical analysis .....	101
4.2.6	Gravimetric water content .....	101
4.3	Results and interpretation.....	102
4.3.1	Final saturated hydraulic conductivity .....	102

4.3.2	Thickness variations .....	103
4.3.3	Permeability tests duration .....	105
4.3.4	Evolution of outflow pH and EC .....	108
4.3.5	Chemical and mineralogical evolution .....	108
4.4	Discussion .....	111
4.4.1	Conceptual explanation for the combined effect of SAMD and FTCs on the saturated hydraulic conductivity .....	111
4.4.2	Conceptual explanation of geochemical reactions between the bentonite and synthetic acid mine drainage .....	114
4.4.3	Potential effect of metal precipitation on hydraulic conductivity .....	116
4.5	Summary and Conclusions .....	117
CHAPITRE 5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET DISCUSSION .....		126
5.1	Essais de perméabilité complémentaires .....	126
5.1.1	Effets de la méthode ASTM et de la pression de confinement .....	126
5.1.2	Essais de perméabilité sur le GCB20 .....	127
5.2	Courbe de rétention d'eau .....	130
5.2.1	Essais à l'extracteur à pression .....	130
5.2.2	Essais au WP4C .....	133
5.2.3	Essais par équilibre de la pression des vapeurs .....	134
5.2.4	Courbe de rétention d'eau combinée et discussion .....	135
5.3	Diffusion .....	139
5.3.1	Essais à système fermé .....	139
5.3.2	Essais à système ouvert .....	141
5.3.3	Sommaire des résultats .....	143

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	145
6.1 Sommaire et conclusions.....	145
6.2 Recommandations .....	147
RÉFÉRENCES.....	150
ANNEXES .....	165

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Synthèse des recouvrement miniers agissant comme barrière à l'eau et utilisant un GCB.....	7
Tableau 2-1 : Études portant sur la courbe de rétention d'eau des GCB .....	30
Tableau 2-2 : Critère d'atteinte de l'équilibre (ASTM, 2016d) .....	33
Tableau 2-3 : Diamètre et densité de fibres aiguilletées (Rowe et al., 2017).....	44
Tableau 2-4 : Conductivité hydraulique saturée d'échantillons hydratés avec divers liquides .....	48
Tableau 2-5 : Conductivités hydrauliques de GCB hydratés et perméés avec diverses solutions inorganiques (Jo et al., 2001) .....	51
Tableau 2-6 : Conductivités hydrauliques de GCB hydratés et perméés avec des solutions inorganiques à divers pH (Jo et al., 2001).....	51
Tableau 2-7 : Conductivités hydrauliques de GCB hydratés et perméés avec des solutions inorganiques multi-espèces à diverses concentrations .....	52
Tableau 3-1 : Composition élémentaire de la bentonite (en g/kg).....	65
Tableau 3-2: Proportion relative des minéraux cristallisés (par SGS Minerals Services Lakefield) .....	67
Tableau 3-3: Proportions relatives estimées des minéraux dans la bentonite (en %) .....	67
Tableau 3-4 : Composition élémentaire de la montmorillonite et/ou beidellite contenue dans un sous-échantillon de Bnt-Ref.....	69
Tableau 3-5 : Composition chimique du DMA de référence (en mg/l) .....	70
Tableau 3-6 : Paramètres électrochimiques du DMA de référence (à 25°C).....	71
Tableau 3-7 : Composantes du DMAS .....	71
Tableau 3-8 : Composition chimique des lots de DMAS (en mg/l).....	73
Tableau 3-9 : Composition anionique des lots de DMAS (en mg/l).....	74
Tableau 3-10 : Composition électrochimique des lots de DMAS.....	74
Tableau 3-11 : Charge ionique prédominante supposée .....	75

Tableau 3-12: Concentration molaires totales des cations monovalents ( $M_M$ ), multivalents ( $M_D$ ) et RMD.....	75
Tableau 3-13 : Force ionique du $DMA_{ref}$ et des lots de DMAS (en mol/l).....	75
Tableau 3-14 : Masse volumique du DMAS.....	76
Tableau 3-15 : Essais à l'extracteur à pression .....	85
Tableau 3-16 : Résumé des essais de diffusion.....	89
Table 4-1 : Chemical and electrochemical properties of synthetic acid mine drainage (SAMD). 98	
Table 4-2 : Permeability test (k test) results.....	104
Table 4-3 : Average elemental compositions of smectite minerals (in wt%) measured by SEM-EDS analyses. ....	109
Table 4-4 : Average elemental compositions of the overall bentonite (in wt%) measured by XRF analyses. ....	109
Table 4-5 : Chemical composition of the effluents measured by ICP-AES.....	110
Table 4-6 : Saturation indices for potential mineral phases in the bentonite at the end of the $k_0$ and $k_{10}$ tests. ....	110
Tableau 5-1 : Essais de perméabilité complémentaires .....	127
Tableau 5-2 : Composition élémentaire de la bentonite après hydratation au DMAS.....	129
Tableau 5-3 : Composition chimique à l'affluent et à l'effluent du perméamètre (GCB20).....	130
Tableau 5-4 : Résultats d'essai à l'extracteur à pression – GCB7 .....	131
Tableau 5-5 : Résultats d'essai à l'extracteur à pression – GCB18 .....	131
Tableau 5-6 : Résultats d'essais par équilibre de la pression des vapeurs - GCB18.....	135
Tableau 5-7 : Coefficients de diffusion effectifs prédits et modélisés.....	144

Tableau B-1 : Résultats d'analyse granulométrique – Bnt-Ref-01 .....	167
Tableau B-2 : Résultats d'analyse granulométrique – Bnt-Ref-02 .....	167
Tableau B-3 : Détermination de la limite de liquidité ( $\omega_l$ ).....	168
Tableau B-4 : Détermination de la limite de plasticité ( $\omega_p$ ).....	168
Tableau C-1 : Pics du diffractogramme (Bnt-Ref-06) .....	171
Tableau C-2 : Intensité des pics associés à un minéral (Bnt-Ref-06) .....	172
Tableau C-3 : Analyse semi-quantitative des phases minérales (Bnt-Ref-06).....	172
Tableau C-4 : Pics du diffractogramme (Bnt-Ref-07) .....	175
Tableau C-5 : Intensité des pics associés à un minéral (Bnt-Ref-07) .....	176
Tableau C-6 : Analyse semi-quantitative des phases minérales (Bnt-Ref-07).....	176
Tableau C-7 : Réconciliation minéralogie – Bnt-Ref.....	177
Tableau D-1 : Suivi des températures de gel et dégel – GCB24 (GCL1 – hydratation eau DI)..	178
Tableau D-2 : Suivi des températures de gel et dégel – GCB21 (GCL3- hydratation DMAS)..	178
Tableau D-3 : Suivi des températures de gel et dégel – GCB22 (GCL2- hydratation DMAS)...	179
Tableau E-1 : Résultats détaillés des essais au WP4C – échantillons intacts .....	180
Tableau E-2 : Résultats détaillés des essais au WP4C – échantillons remaniés .....	181

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Principales composantes d'un système de recouvrement multicouche (Aubertin et al., 2002).....	4
Figure 2-1 : Procédé de fabrication schématisé d'un GCB sodique aiguilleté (Terrafix Geosynthetics, 2017).....	11
Figure 2-2 : Représentations schématiques de la montmorillonite (Mitchell & Soga, 2005).....	12
Figure 2-3 : Montmorillonite sodique à divers niveaux d'hydratation (Pradhan et al., 2015) : a) sèche ; b) 4 couches de molécules d'eau; c) 10 couches de molécules d'eau.....	14
Figure 2-4 : Géotextile tissé et non tissé (Koerner, 2012) .....	17
Figure 2-5 : Procédé de renforcement par aiguilletage (inspiré d'Autospec, 2017) .....	18
Figure 2-6 : Résultats d'essai de gonflement libre selon la norme ASTM D5890 (Touze-Foltz, 2012).....	24
Figure 2-7 : Propriétés hydrauliques non saturées d'un GCB : a) courbes de rétention d'eau typiques d'un géotextile et d'une argile (Beddoe et al., 2010) et b) courbe de rétention d'eau conceptuelle d'un GCB - pas à l'échelle (Abuel-Naga & Bouazza, 2010).....	29
Figure 2-8 : Intervalle de succions couvert par méthode (Beddoe et al., 2010).....	31
Figure 2-9 : Appareils utilisés pour la méthode par translation. a) Extracteur à pression (Southen & Rowe, 2007) b) Cellule pression (Tempe Cell) (Aubertin et al., 1998).....	32
Figure 2-10 : Montage pour l'essai avec sonde capacitives d'humidité relative (Beddoe et al. 2010) .....	34
Figure 2-11 : Contrôle de la succion par équilibre des vapeurs à l'aide d'un dessiccateur et de solution saline saturée (Benchouk, 2005). .....	35
Figure 2-12 : Contrôle de la succion par équilibre des vapeurs avec application d'une pression de confinement (Pintado et al., 2009). .....	35
Figure 2-13 Appareil WP4C et composantes internes (Edaphic Scientific, 2018; Lu et al., 2017)	
36	
Figure 2-14: Représentation schématique de la cellule de diffusion (Aubertin et al., 2000).....	40

Figure 2-15 : Gonflement libre de la bentonite en fonction de la proportion de sodium échangeable (Guyonnet et al., 2009).....	42
Figure 2-16 : Conductivité hydraulique saturée de GCB en fonction de la minéralogie et des liquides de d’hydratation et de perméation (adapté de Guyonnet et al., 2009).....	42
Figure 2-17 : Débit de percolation en fonction de la masse surfacique, pour une même conductivité hydraulique (von Maubeuge & Ehrenberg, 2014) .....	44
Figure 2-18 – Relations entre la pression de confinement, l’indice des vides apparents et la conductivité hydraulique saturée (Petrov & Rowe, 1997a; Petrov & Rowe, 1997b) .....	45
Figure 2-19 : Courbe de rétention d’eau obtenues par séchage, pour diverses pression de confinement (Touze-Foltz et al., 2016).....	46
Figure 2-20 : Effets de la pression de confinement sur la conductivité hydraulique pour une perforation a) de 10 mm (Mazzieri & Pasqualini, 2000) et b) de 50 mm de diamètre (Sari & Chai, 2013).....	47
Figure 2-21 : Évolution de la distribution des cations d’un GCB (Egloffstein, 2001) .....	49
Figure 2-22 : Représentation schématique des changements structuraux dans l’argile dus à la migration de l’eau pendant le gel (N : noyau de glace) : a) avant le gel; b) après le gel (Norrish & Rausell-Colom, 1962) .....	53
Figure 2-23 Évolution de l’espacement basal du réseau cristallin de la bentonite sodique pendant un cycle de gel-dégel (Anderson & Hoekstra, 1965).....	54
Figure 2-24 : Variation de conductivité hydraulique saturée en fonction du nombre de cycles (St-Laurent et al., 2015) .....	56
Figure 3-1 : Granulométrie apparente d’échantillons de bentonite .....	63
Figure 3-2 : Montage utilisé pour l’essai de conductivité hydraulique avec perméamètre à paroi flexible inspiré de la norme ASTM 6766 : a) montage global; b) vessies; c) cellule triaxiale GDS.....	77
Figure 3-3 : Montage utilisé pour l’essai de conductivité hydraulique avec perméamètre à paroi flexible inspiré de la norme ASTM 5887 : a) panneau de contrôle manuel; b) cellules KW	78

Figure 3-4 : Dispositif utilisé pour le gel et dégel unidimensionnel des échantillons .....	81
Figure 3-5 : Évolution de la température pendant les cycles de gel-dégel #1 et 2 de l'échantillon hydraté à l'eau DI.....	82
Figure 3-6 : Montage utilisé pour les essais à l'extracteur à pression.....	84
Figure 3-7 : Analyse de la succion d'échantillon de GCB à l'aide d'un WP4C (LGEUC) .....	87
Figure 3-8 : Montage pour l'essai de diffusion de l'oxygène au travers un GCB .....	90
Figure 3-9 : Montage pour le calibrage des capteurs SO-110 et le contrôle de la qualité des données enregistrées.....	90
Figure 3-10 : Modèle numériques utilisés pour la simulation des essais de diffusion d'oxygène a) à volume d'O <sub>2</sub> constant et b) à volume d'O <sub>2</sub> variable.....	92
Figure 4-1: Hydraulic conductivity of GCLs permeated with DIW (GCL1) and SAMD (GCL2 and GCL3) as a function of the number of FTCs. ....	103
Figure 4-2 : Variation in the average thicknesses of the GCLs after permeability tests and FTCs for samples permeated with DI (GCL1) and SAMD (GCL2 and GCL3).....	105
Figure 4-3 : Evolution of hydraulic conductivity (k) and out/in ratios of flow (Q) as a function of pore volumes of flow (PVF) for a) GCL1.....	106
Figure 4-4 : Evolution of hydraulic conductivity (k) and out/in ratios of flow (Q), electrical conductivity (EC) and pH as a function of the number of pore volumes of flow (#PVF) for: a) GCL2 and b) GCL3. Open circles correspond to a clogged system. ....	107
Figure 4-5 : Cracks in GCL specimens permeated with DIW – under free-swell permeation conditions (details in Chev�, 2019). a) Frozen at $\approx 5$ °C. b) Thawed at the ambient temperature of $\approx 21$ °C.....	112
Figure 5-1 : Évolution de la conductivité hydraulique et des ratios de débit, conductivité électrique et pH en fonction du nombre de volume d'eau interstitielle ayant circulé dans l'échantillon .....	128
Figure 5-2 : Courbes de rétention d'eau obtenues par essais à l'extracteur à pression exprimées en a) teneur en eau massique et b) degré de saturation.....	131

Figure 5-3 : Relation $e(\omega)$ selon le type de méthode de préparation.....	133
Figure 5-4 : Courbes de rétention d'eau obtenues avec le WP4C exprimés en a) teneur en eau massique et b) degré de saturation .....	133
Figure 5-5 : Courbe de rétention d'eau obtenues par équilibre de la pression des vapeurs .....	135
Figure 5-6 : Courbe de rétention d'eau de GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS sous de faibles pressions de confinement .....	136
Figure 5-7 : Estimation des AEV par méthode graphique .....	137
Figure 5-8 : Indices des vides et teneur en eau en fonction du degré de saturation.....	138
Figure 5-9 : Concentrations mesurées expérimentalement et ajustements obtenus pour le GCB16 .....	140
Figure 5-10 : Concentrations mesurées expérimentalement et ajustement obtenu pour le GCB12 .....	142
Figure 5-11 : Concentrations mesurées expérimentalement et ajustement obtenu pour le GCB18 .....	142
Figure 5-12 Coefficients de diffusion effectifs estimés et résultats expérimentaux obtenus.....	144

Figure A-1 : Perméamètre à paroi flexible et montage utilisé pour l’essai encadré par la norme ASTM D5887.....	165
Figure A-2: Perméamètre à paroi flexible et montage utilisé pour l’essai encadré par la norme ASTM D6766.....	166
Figure B-1 : Détermination de la limite de liquidité ( $\omega_L$ ).....	168
Figure C-1 : Diffractogramme et interprétation qualitative (Bnt-Ref-06).....	169
Figure C-2 : Identification des phases potentielles par traitements complémentaires (Bnt-Ref-06).....	170
Figure C-3 : Diffractogramme et interprétation qualitative (Bnt-Ref-07).....	173
Figure C-4 : Identification des phases potentielles par traitements complémentaires (Bnt-Ref-07).....	174
Figure C.5 : Réconciliation minéralogie – Bnt-Ref.....	177
Figure E-1 Courbe de rétention d’eau $\omega(\psi)$ de GCB hydratés à l’eau DI et au DMAS sous de faibles pressions de confinement.....	182
Figure F-1 : Essai de diffusion sur le sable sec.....	183
Figure F-2 : Essai de diffusion sur le GCB 12 ( $S_r$ final).....	184
Figure F-3 : Essai de diffusion sur le GCB 12 ( $S_r$ initial).....	185
Figure F-4 : Essai de diffusion sur le GCB 13.....	186
Figure F-5 : Essai de diffusion sur le GCB 16.....	187
Figure F-6 : Essai de diffusion sur le GCB 18.....	188
Figure F-7 : Essai de diffusion sur le GCB 20.....	189
Figure F-8 : Essai de diffusion sur le GCB 22.....	190

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire
AMD	<i>Acid mine drainage</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
AEV	Valeur d'entrée d'air ( <i>Air entry value</i> )
C	Concentration
CE	Conductivité électrique
CEC	Capacité d'échange cationique
CRE	Courbe de rétention d'eau
d	Diamètre
$D_e$	Coefficient de diffusion effectif de l'oxygène
$D^*$	Coefficient de diffusion apparent de l'oxygène
$D_a^0$	Coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air
$D_w^0$	Coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau
DI	Déionisé
DIW	<i>Deionized water</i>
DMA	Drainage minier acide
$DMA_{Réf}$	Drainage minier acide de référence
DMAS	Drainage minier acide synthétique
DRX	Diffractomètre de rayons X
e	Indice des vides
$e_B$	Indice des vides apparent
Eh	Potentiel d'oxydo-réduction
EC	<i>Electrical conductivity</i>

EDS	Spectrométrie par dispersion d'énergie
f	Fraction d'eau pure retenue par cristallisation
F	Flux diffusif
FTC	<i>Freeze-thaw cycle</i>
GCB	Géocomposite bentonitique
GCL	<i>Geosynthetic clay liner</i>
$G_{s-GCB}$	Densité relative des grains solides du GCB
$G_{s\_bento}$	Densité relative des grains solides de bentonite
$G_{s\_géotex}$	Densité relative des grains solides de géotextiles
h	Épaisseur moyenne d'un échantillon
h <sub>GCL</sub>	Épaisseur moyenne d'un GCB hydraté
h <sub>s</sub>	Épaisseur des composantes solides d'un GCB
H	Constante d'Henry
i	Gradient
I	Force ionique
I <sub>p</sub>	Indice de plasticité
ICP-AES	Spectrométrie d'émission atomique au plasma à couplage inductif
k	Conductivité hydraulique
k <sub>sat</sub>	Conductivité hydraulique saturée
k <sub>sat ref</sub>	Conductivité hydraulique saturée de référence
LDR	Limite de détection rapportée
LGEUC	Laboratoire de génie de l'environnement de l'Université de Carleton
m <sub>GCB</sub>	Masse surfacique du GCB
m <sub>bento</sub>	Masse surfacique de bentonite

$m_{\text{géotex}}$	Masse surfacique de bentonite
$M$	Concentration molaire (mol/l)
$M_{\text{vap}}$	Masse moléculaire de la vapeur d'eau (18,016 kg/kmol)
$M_a$	Masse sèche actuelle
$M_{\text{h-GCB}}$	Masse de l'échantillon humide ou saturé de GCB
$M_{\text{i-GCB}}$	Masse initiale de l'échantillon de GCB
$M_{\text{i-bento}}$	Masse initiale de l'échantillon de bentonite
$M_{\text{s-GCB}}$	Masse sèche de l'échantillon de GCB
$M_{\text{s-bento}}$	Masse sèche de l'échantillon de bentonite
$M_{\text{vap}}$	Masse moléculaire de la vapeur d'eau (18.016 kg/kmol)
$M_w$	Masse d'eau
MEB	Microscope électronique à balayage
$n$	Porosité
Na-Mnt	Montmorillonite sodique
$p_a$	Paramètre de tortuosité dans l'air
$p_{\text{sat}}$	Pression de vapeur saturante
$p_{\text{vap}}$	Pression partielle de vapeur
$p_w$	Paramètre de tortuosité dans l'eau
PVC	Polychlorure de vinyle
PVF	Volume des vides de l'échantillon (« <i>pore volumes of flow</i> »)
#PVF	<i>Number of pore volume of flow</i>
$Q_{\text{in}}$	Débit entrant dans le perméamètre
$Q_{\text{out}}$	Débit sortant du perméamètre
$R$	Constante universelle des gaz parfaits (8,31432 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )

RH	Humidité relative
RMD	Quantité relative de cations monovalents et multivalents
$S_r$	Degré de saturation (%)
SAMD	<i>Synthetic aid mine drainage</i>
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>
SI	<i>Saturation Index</i>
SRNW	Geotextile non tissé renforcé ( <i>Scrim Reinforced Nonwoven</i> )
t	Temps
T	Température
$u_a$	Pression d'air
$u_w$	Pression d'eau
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
v	volume spécifique
$V_{s-bento}$	Volume des grains solides de bentonite
$V_{s-geotex}$	Volume des drains solides de géotextile
$V_{s-GCB}$	Volume des solides du GCB
$V_t$	Volume total
$V_v$	Volume des vides
WRC	<i>Water Retention Curve</i>
XRF	Fluorescence au rayon X
z	Profondeur
$\rho_{bento}$	Masse volumique de la bentonite
$\rho_{geotex}$	Masse volumique des géotextiles
$\rho_w$	Masse volumique de l'eau

$\psi$	Succion
$\psi_t$	Succion totale
$\psi_m$	Succion matricielle
$\psi_o$	Succion osmotique
$\theta_a$	Teneur en air volumique
$\theta_w$	Teneur en eau volumique
$\theta_{eq}$	Porosité effective
$\omega_{bento}$	Teneur en eau massique de la bentonite
$\omega_i$	Teneur en eau massique initiale du GCB
$\omega_{i-bento}$	Teneur en eau massique initiale de la bentonite
$\omega_L$	Limite de liquidité
$\omega_P$	Limite de plasticité

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe A - Essais de perméabilité .....	165
Annexe B – Résultats de caractérisation physique.....	167
Annexe C – Résultats minéralogiques .....	169
Annexe D – Températures des échantillons – Cycles de gel-dégel .....	178
Annexe E – Résultats – Courbes de rétention d'eau .....	180
Annexe F – Résultats – Essais de diffusion d'oxygène et interprétation .....	183

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le Canada est un des principaux pays miniers du monde. Soixante minéraux et métaux y sont produits annuellement, et le Canada est l'un des cinq principaux producteurs mondiaux pour 16 de ces minéraux et métaux (Association Minière du Canada, 2018). Pour sa part, le Québec était la 2<sup>e</sup> plus importante province minière en 2016, avec une production minérale annuelle de 7,8 milliards de dollars issue de 27 mines actives (Madore & Caron, 2018; Natural Ressources Canada, 2018). Une importante exploitation minière est néanmoins accompagnée d'une importante génération de rejets miniers solides et liquides, dont la gestion peut devenir problématique et coûteuse.

Les deux principaux types de rejets solides générés par l'industrie minière sont les stériles miniers et les résidus miniers (aussi appelés rejets de concentrateur). Les stériles miniers sont définis comme étant des roches extraites lors des opérations minières, ne contenant pas de minéraux en quantité suffisante pour que son exploitation soit économiquement rentable. Les résidus miniers sont quant à eux des roches concassées et finement broyées provenant du traitement du minerai (MERN et MDELCC, 2017). Ces deux types de rejets solides peuvent contenir des minéraux sulfureux si bien que lorsqu'ils sont entreposés en surface et exposés à l'air et à l'eau, ils ont le potentiel de produire du drainage minier acide (DMA). Ce dernier est caractérisé par un pH <6, une acidité élevée et un contenu en métaux dissous et en sulfates élevé (Aubertin et al., 2002; Blowes et al., 2014).

Au Québec, la Loi sur les mines exige qu'avant même que les travaux d'exploitations ne débutent, le propriétaire d'un site minier doit identifier les techniques de restauration qui seront mises en place sur les aires d'accumulations de rejets miniers, afin de limiter la production et la propagation de contaminants dans l'environnement. En plus, une analyse comparative des options de restaurations applicables au site minier doit être présentée (MERN et MDELCC, 2017).

Une méthode de restauration éprouvée, tant pour les sites miniers en exploitation que ceux abandonnés, consiste à mettre en place des recouvrements de matériaux empêchant l'infiltration d'eau et/ou d'oxygène dans les rejets sous-jacents (Aubertin et al., 2002; INAP, 2012). Ces recouvrements sont généralement faits de plusieurs couches de matériaux aux propriétés complémentaires. L'utilisation de matériaux naturels (gravir, sable, silt, argile) ou de matériaux issus de l'exploitation minière non problématiques au niveau environnemental (p.ex., rejets non potentiellement générateurs d'acide) s'avère généralement plus avantageuse sur le plan

économique que l'utilisation de matériaux synthétiques (INAP, 2012). Toutefois, des contraintes de disponibilité de matériaux ou de géométrie des aires d'accumulation peuvent faire en sorte que l'utilisation de matériaux synthétiques au sein d'un recouvrement soit avantageuse.

Le géocomposite bentonitique (GCB) est un matériau de plus en plus considéré comme composante au sein de recouvrement d'ingénierie utilisés pour restaurer les sites miniers. Il a une épaisseur d'environ 1 cm et son enveloppe est faite de matériaux synthétiques tandis que son intérieur est composé de bentonite (argile gonflante). La performance de GCB dans des recouvrements miniers est toutefois peu documentée, ce qui complique l'évaluation rigoureuse de scénarios de restauration l'utilisant.

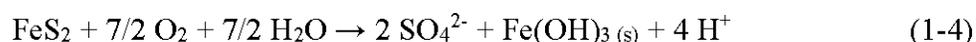
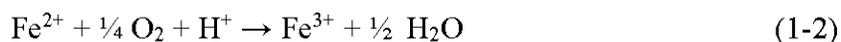
Les sections qui suivent présentent tout d'abord la problématique de génération DMA, ainsi que la manière dont les recouvrements d'ingénierie agissent afin d'en limiter la production. Une revue des cas documentée de GCB utilisés dans des recouvrements miniers est ensuite réalisée, ce qui permettra d'identifier certains besoins en recherche. Finalement, les hypothèses et objectifs du présent projet de recherche, qui orientent l'ensemble de ce mémoire, sont présentés.

## 1.1 Drainage minier acide

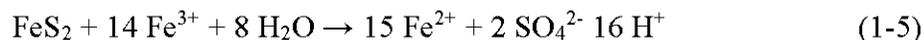
La formation du drainage minier acide (DMA) provient de l'oxydation de minéraux sulfureux et fait intervenir des réactions chimiques et biologiques. Le minéral sulfureux le plus fréquemment rencontré dans l'écorce terrestre et dans les rejets miniers est la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) (Blowes, 2014). D'autres minéraux sulfureux contribuent également à la génération de DMA de manière directe (p.ex., la pyrrhotite ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) et la bornite ( $\text{CuFeS}_4$ )) ou indirecte (p.ex., la sphalérite ( $\text{ZnS}$ ), la galène ( $\text{PbS}$ ), la chalcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ) et la pentlandite ( $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ )) (Plumlee et al., 1999). Dans les paragraphes qui suivent, les réactions d'oxydation de la pyrite seront utilisées à titre représentatif. Les informations présentées sont tirées de Aubertin et al. (2002); Blowes et al. (2003); Blowes et al. (2014); INAP (2012); et Nordstrom (1999).

Au niveau chimique, l'oxydation directe de la pyrite se produit initialement en présence d'eau et d'oxygène (équation 1.1). Le fer ferreux alors libéré peut être oxydé en fer ferrique, selon l'équation 1.2. Un bilan positif de  $\text{H}^+$  résulte des réactions 1.1 et 1.2 et le pH diminuera si aucun minéral neutralisant n'est présent, si ces minéraux sont présents en quantité insuffisante pour neutraliser toute l'acidité produite, ou si leur vitesse de dissolution est trop lente comparativement

à la vitesse d'oxydation des sulfures. Tant que le pH demeure supérieur à environ 4,5, le fer ferrique peut précipiter sous forme d'hydroxyde selon la réaction 1.3. La combinaison des équations 1.1 à 1.3 correspond à la réaction globale d'oxydation présentée à l'équation 1.4.



Lorsque le fer ferrique est présent en grande quantité en solution (généralement à  $\text{pH} < 3,5$ ), la pyrite peut être oxydée par le fer ferrique plutôt que l'oxygène selon la réaction indirecte présentée à l'équation 1.5.



La cinétique de cette dernière réaction est plus rapide que celle de la réaction 1.4, en plus de générer une importante quantité d'acidité (16 moles de  $\text{H}^+$  par mole de  $\text{FeS}_2$ ).

Une variété d'espèces bactériennes est présente dans le sol, tant à pH près de la neutralité qu'à pH acide. Ces bactéries interviennent dans la génération du DMA en catalysant certaines réactions chimiques telles l'oxydation du soufre natif et du fer ferreux. Par exemple, la réaction chimique 1.2 se produit à une vitesse rapide à  $\text{pH} > 4$ , mais très lentement à pH plus faible. La présence de bactéries ferroxydantes comme *Acidithiobacillus ferrooxidans* vient toutefois augmenter de 5 à 6 ordres de grandeur la vitesse de cette réaction, ce qui permet au système d'être alimenté en fer ferrique suffisamment rapidement pour soutenir les réactions d'oxydation indirectes des minéraux, comme celle présentée à équation 1.5 pour la pyrite.

Finalement, plusieurs facteurs viennent influencer la vitesse à laquelle se produit l'oxydation des minéraux sulfureux, tels que la nature des minéraux sulfureux présents dans le milieu, la distribution des sulfures (disséminés versus massifs), leur disponibilité (libérés versus non-libérés), la température du milieu et la disponibilité de l'oxygène (Aubertin et al., 2002; Lapakko et al., 2006; Miller & Murray, 1988; Nicholson & Scharer, 1994; Nicholson et al., 1988).

La prévention et le contrôle du DMA s'effectue en limitant la présence d'au moins une des trois composantes de la réaction d'oxydation des sulfures, soit les minéraux sulfures eux-mêmes, l'eau

et l'oxygène. Un moyen éprouvé pour y parvenir est de mettre en place un recouvrement d'ingénierie au-dessus des matériaux potentiellement générateurs d'acide, de manière à limiter la pénétration de l'eau et/ou de l'oxygène. Le terme « recouvrement sec » est parfois utilisé dans la littérature par opposition aux recouvrements en eau ou humides, qui impliquent l'utilisation d'eau pour limiter la disponibilité de l'oxygène. L'utilisation d'une couche unique de matériau sec s'est souvent avérée peu performante dans le cadre de fermetures minière en Amérique du Nord (INAP, 2012), contrairement aux systèmes à couche multiples utilisant conjointement plusieurs couches de matériaux aux propriétés complémentaires.

## 1.2 Recouvrements d'ingénierie de type multicouches

### 1.2.1 Généralités

Les recouvrements d'ingénierie de type multicouche visant à prévenir la production de DMA sont généralement faits de 5 couches de sol (figure 1-1) ayant chacune une fonction particulière (Aubertin et al., 1995).

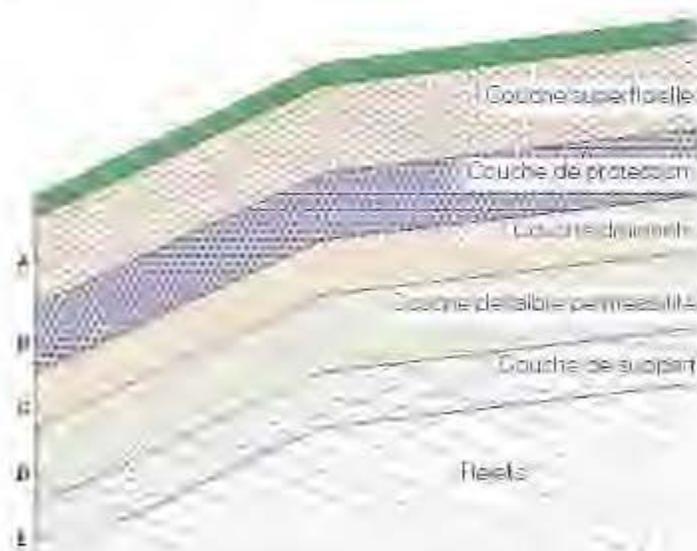


Figure 1-1 : Principales composantes d'un système de recouvrement multicouche (Aubertin et al., 2002)

La couche de support (E) est installée au-dessus des rejets miniers. Comme son nom l'indique, elle sert de support aux couches de matériaux sus-jacente et doit généralement posséder une bonne capacité portante et une bonne résistance aux déformations. Elle peut également être utilisée pour créer un bris de capillarité avec les rejets miniers sous-jacents, pour empêcher la remontée capillaire du DMA contenu dans les rejets, et avec la couche de sol sus-jacente (D), si la rétention d'eau doit être favorisée dans cette dernière couche. Cette couche est généralement faite de sable ou de gravier. La couche D est la barrière à l'eau ou à l'oxygène, dépendamment des objectifs recherchés. Dans le cas d'une barrière à l'oxygène, le degré de saturation de la couche D doit demeurer élevé, de manière à limiter la diffusion de l'oxygène vers les résidus miniers sous-jacents. En effet, la diffusion de l'oxygène est environ 10 000 fois plus faible dans l'eau que dans l'air (Cussler, 2009; Lide, 1995). Dans le cas d'une barrière à l'eau, la couche D doit avoir une très faible conductivité hydraulique afin de limiter l'infiltration d'eau dans les résidus sous-jacents. Les matériaux pouvant être utilisés dans la couche D sont multiples et dépendent des objectifs visés ; ce sont généralement des sols fins tels les silts et les argiles peu plastique ou encore des résidus miniers (Bussière et al., 2007). La couche C est généralement une couche drainante (sable ou gravier) qui permet l'évacuation latérale des eaux et la diminution des gradients hydrauliques et pressions interstitielles par le fait même. Dans le cas d'une barrière à l'oxygène, cette couche sera également utilisée pour créer un bris de capillarité et éviter la désaturation de la couche D. La couche B vise à protéger l'intégrité des couches A, B et C des effets climatiques, des animaux et de la biointrusion. Dans plusieurs cas, cette couche est combinée à la couche C. Finalement, la couche A fait la transition entre les couches sous-jacentes et le milieu environnant. Elle sert de support à la végétation, de protection contre l'érosion et réduit les effets des fluctuations météorologiques.

### **1.2.2 Barrières à l'eau**

Tel que mentionné précédemment, la couche D d'un recouvrement d'ingénierie de type multicouche agissant comme barrière à l'eau doit avoir une faible conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ). Une valeur de  $10^{-7}$  cm/s est généralement visée (Aubertin et al., 2015). Les matériaux généralement considérés au sein de cette couche sont l'argile, les géomembranes et, depuis plus récemment, les géocomposites bentonitiques.

Il est possible d'obtenir un  $k_{\text{sat}}$  de  $10^{-7}$  cm/s et moins en mettant en place une couche d'argile compactée. Toutefois, lorsque l'argile est mise en place à une teneur en eau sous-optimale pour le compactage, elle a tendance à former une structure agrégée favorisant la présence de macropores, ce qui résulte en un  $k_{\text{sat}}$  plus élevé qu'attendu, tandis que si l'argile est placée à une teneur en eau sus-optimale, elle est difficile à compacter, ce qui se traduit également par un  $k_{\text{sat}}$  plus élevé qu'attendu en raison de la porosité élevée (Holtz & Kovacs, 1991). Les argiles plastiques sont également sensibles aux effets des cycles de gel-dégel qui peuvent induire une augmentation de  $k_{\text{sat}}$  de 1 à 3 ordres de grandeur (Chapuis, 2002; Chapuis et al., 2006) et il peut d'avérer économiquement non viable de placer une couche d'argile à une profondeur la protégeant de ces cycles.

Les géomembranes en polyéthylène sont régulièrement utilisées comme barrière à l'eau en génie civil, et ont été utilisées à quelques reprises au sein de recouvrement miniers au Québec (p.ex., sites Poirier, Normétal, Aldermac et Barvue). Le matériau a un  $k_{\text{sat}}$  de  $10^{-11}$  cm/s en laboratoire, mais sa mise en place est inévitablement accompagnée de perforations et autres défauts. L'exposition prolongée du matériau au soleil peut également réduire la durabilité du matériau à des durées insuffisantes pour un contexte de restauration minière (Aubertin et al., 2015).

Les géocomposites bentonitiques sont faits de bentonite (argile gonflante) contenue entre 2 géotextiles et sont manufacturés sous forme de rouleau, tout comme les géomembranes. Le matériau fait environ 1 cm d'épaisseur et a été développé comme alternative aux couches d'argiles compactées (Bouazza, 2002). Lorsqu'hydraté avec de l'eau, les GCB ont une faible conductivité hydraulique (de l'ordre de  $5 \times 10^{-9}$  cm/s). Les propriétés gonflantes de la bentonite confèrent au matériau une capacité d'auto-réparation des perforations et une bonne résistance aux cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel (Bouazza, 2002; Daniel et al., 1997; Eigenbrod, 2003a; Lange et al., 2007; Melchior, 2002; Sari & Chai, 2013; Sivakumar Babu et al., 2001). Les panneaux de GCB n'ont pas besoin d'être liés mécaniquement entre eux, ce qui en réduit les coûts d'installation et de main d'œuvre (Aubertin et al., 2015). Cependant, lorsqu'un GCB est hydraté avec une solution ayant une force ionique élevée, la conductivité hydraulique du matériau peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur, et sa capacité de gonflement peut être réduite (Egloffstein, 2001; Mesri & Olson, 1971; Shackelford, 1994; Shackelford et al., 2000; Shackelford et al., 2010). La performance du matériau au sein d'un recouvrement en contact avec du DMA pourrait donc être amoindrie. Toutefois, les données disponibles à ce sujet sont limitées.

Tableau 1-1 Synthèse des recouvrement miniers agissant comme barrière à l'eau et utilisant un GCB

Site minier (Localisation)	Utilisation du GCB	Nature des rejets	Recouvrement minier (de haut en bas)	Suivi réalisé	Références
Somex (Lac Édouard, Québec)	Recouvrement d'un site minier abandonné (1 ha)	Résidus miniers générateurs d'acide	- 1,0 m sable - GCB	Inconnu	- Aubertin et al. (2002)
Kam Kotia (Timmins, Ontario)	Recouvrement d'un site minier abandonné (80 ha)	Résidus miniers générateurs d'acide	- 0,15 m terre végétale - 0,60 m granulaire - 0,15 m argile - GCB - Ancien recouvrement (0.3 m de stériles et 0.3m de granulaire)	Inconnu	- Hamblin (2009) - INAP (2012)
Whistle (Capreol, Ontario)	Cellule expérimentale de terrain (12 m x 24 m)	Stériles miniers générateurs d'acide	- 0,9 m sable graveleux - GCB	- Conditions météorologiques au site - Teneur en eau, succion, température et teneur en oxygène dans le recouvrement - Ruissellement sur le recouvrement - Infiltrations dans les stériles miniers	- Adu-Wusu et Yanful (2006) - Adu-Wusu et Yanful (2007)
Premier Gold (Steward, Colombie- Britannique)	Cellule expérimentale de terrain (15 x 16 m)	Résidus miniers potentiellement générateurs d'acide	- 0,10 m terre végétale - 0,30 m sable et gravier - GCL - 0,10 m sable et gravier	- Teneur en eau, succion, température et en oxygène dans le recouvrement et les résidus miniers - Ruissellement sur le recouvrement - Infiltrations dans les résidus miniers - Qualité de l'eau interstitielle dans les résidus miniers	- Renken (2006) - Renken et al. (2009)
Montague Gold (Darmouth, Nouvelle-Écosse)	Cellule expérimentale de terrain (8 m x 10 m) avec diverses configurations de recouvrement intégrées à la cellule	Résidus miniers générateur de drainage neutre contaminé (arsenic)	Diverses configurations avec : - Ensemencement (gazon) - 0 à 1 m de sable et gravier - GCL conventionnel ou amendé avec des polymères - 0 ou 0,15 m de sable et gravier	- Teneur en eau des résidus miniers et matériaux granulaires - Essais en laboratoire sur des échantillons de GCB exhumés : • Conductivité hydraulique • Essais de gonflement libre • Cations liés, solubles et échangeables • Composition élémentaire	- Hosney et Rowe (2013) - Hosney et Rowe (2016)

Le tableau 1-1 présente les cas documentés d'utilisation de GCB dans un recouvrement minier. Tous ces cas sont situés en climat continental humide selon la classification climatique de Köppen (Peel et al., 2007).

### 1.3 Contexte et objectif du projet de recherche

L'utilisation des GCB dans le domaine du génie civil est désormais fréquente. De nombreuses études ont été réalisées depuis les années 1990 afin de déterminer les propriétés du matériau ainsi que les facteurs les influençant. Ces études ont cependant principalement été menées pour des utilisations en fond de cellule comme tapis d'étanchéité, donc pour des GCB moins soumis aux variations de conditions climatiques, pour le recouvrement de déchets domestiques, mais dans des climats plus tempérés que ceux du Canada et du Québec, ou lors d'utilisations conjointes avec des géomembranes. Il en résulte que l'utilisation du GCB comme principale couche de faible perméabilité, au sein d'un recouvrement minier installé en climat continental humide ou subarctique, peut sembler avantageuse dans certains cas de restauration minière, mais que son utilisation dans un tel contexte demande d'utiliser le matériau au-delà de ses limites actuellement testées et éprouvées (Bouazza, 2018; Hornsey et al., 2010). Le présent projet de recherche vise donc à documenter une telle utilisation.

L'objectif principal du projet est d'évaluer en laboratoire les propriétés hydrogéologiques d'un GCB dans un contexte de recouvrement de rejets miniers générateurs d'acide (faible confinement et eau pouvant être agressive). Pour ce faire, les 5 objectifs secondaires suivants ont été définis :

- adapter les méthodes d'essais de perméabilité normées existantes, afin d'évaluer la conductivité hydraulique saturée du matériau dans un contexte de confinement similaire à celui d'un recouvrement minier,
- évaluer l'effet du DMA sur la capacité du GCB à agir comme barrière aux liquides, en comparant la conductivité hydraulique saturée d'échantillons hydratés à l'eau déionisée et au DMA,
- évaluer l'effet du DMA sur la résistance du GCB à des cycles de gel-dégel, combinés ou non à des cycles de séchage, en comparant l'évolution de la conductivité hydraulique saturée de GCB hydratés à l'eau déionisée et au DMA, au fil d'une série de cycles de gel-dégel avec et sans désaturation,

- évaluer l'effet du DMA sur la capacité du GCB à maintenir un degré de saturation élevé, en comparant les courbes de rétention d'eau de GCB hydratés à l'eau déionisée et au DMA,
- évaluer l'effet du DMA sur la capacité du GCB à limiter le flux d'oxygène vers les rejets miniers sous-jacents, en comparant les coefficients de diffusion effectifs de GCB hydratés à l'eau déionisée et au DMA.

## 1.4 Contenu du mémoire et retombées du projet

Le présent mémoire est divisé en 6 chapitres. Après l'actuel chapitre 1 d'introduction, une revue de littérature sur les GCB sera présentée au chapitre 2. L'accent sera alors mis sur les propriétés influençant majoritairement la performance d'un recouvrement minier, soit les propriétés hydriques et diffusives du matériau. Le chapitre 3 décrit la méthodologie employée afin de caractériser le GCB utilisé lors des essais en laboratoire, ainsi que celle appliquée lors de ces mêmes essais pour caractériser leurs propriétés hydrogéologiques ( $k_{sat}$ , CRE et  $D_e$ ). Les résultats et l'interprétation de ceux-ci sont présentés aux chapitres 4 et 5. L'évolution de la conductivité hydraulique saturée et de la minéralogie de 3 échantillons de GCB hydratés au drainage minier acide synthétique (DMAS) est décrite au chapitre 4, sous forme d'un article qui a été soumis à la revue *Geotextiles and Geomembranes*, tandis que les résultats d'essais de conductivité hydraulique additionnels, de rétention d'eau et de diffusion de l'oxygène sont consignés au chapitre 5. Le mémoire se termine avec une présentation des principales conclusions du projet ainsi qu'une série de recommandations.

Le présent projet de maîtrise apporte deux principales contributions pratiques. Tout d'abord, le projet vise à documenter et évaluer la performance de GCB comme matériau intégré au sein d'un recouvrement minier. Pour ce faire, quelques essais en laboratoire ont été adaptés afin de les rendre davantage représentatifs d'un contexte de recouvrement minier. Ces méthodologies modifiées pourront être réutilisées lors de travaux futurs. Également, il est souhaité que les résultats obtenus et présentés dans le présent mémoire puissent être utilisés par les divers acteurs de l'industrie minière dans le cadre d'analyses comparatives de méthodes de restauration et qu'ils permettent de mieux cibler les risques de défaillance associés à l'utilisation de GCB dans un contexte de recouvrement minier.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Le présent chapitre résume les concepts clés relatifs à l'utilisation de géocomposites bentonitiques (GCB) comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier. La première partie définit ce qu'est un GCB et décrit les principales composantes de ce matériau. Les propriétés hydrauliques d'intérêt des GCB sont par la suite présentées, soit le potentiel de gonflement de la bentonite, la conductivité hydraulique saturée et la courbe de rétention d'eau. Ensuite, les principes généraux en matière de diffusion des gaz au travers des milieux poreux sont présentés, puis le cas spécifique de la diffusion de l'oxygène au travers d'un GCB est abordé. Les principaux facteurs pouvant influencer les propriétés des GCB sont finalement décrits. Ces derniers ont été regroupés en trois grandes catégories, soit les facteurs intrinsèques, les facteurs externes ayant une influence à court terme, et les facteurs externes ayant une influence à long terme. Grâce à la revue de l'état des connaissances des divers points énumérés précédemment, il sera possible d'identifier des éléments manquants ou nécessitant des précisions additionnelles afin d'évaluer le potentiel d'utilisation des GCB comme barrière aux fluides dans un recouvrement minier.

### 2.1 Composantes des géocomposites bentonitiques

La *International Geosynthetics Society* décrit le GCB comme étant un géocomposite manufacturé, fait de bentonite maintenue en place entre deux géosynthétiques. Il existe plusieurs types de GCB, présentant des variantes quant à la nature de la bentonite utilisée (sodique, calcique ou activée) et sa texture (en poudre ou en granule), la masse de bentonite utilisée par unité de surface, la nature des géosynthétiques formant les faces supérieures et inférieures du géocomposite (géomembranes ou géotextiles, tissés ou non), la présence ou non d'une couche supplémentaire entre la bentonite et un des géosynthétiques afin d'améliorer la performance du produit (enduit ou adhésif), et le type de liens et renforcements utilisé entre les matériaux (couture, aiguilletage et/ou colle). Dans le présent document, une nomenclature inspirée de Touze-Foltz et al. (2016) sera utilisée afin de différencier les grandes familles de GCB. Le terme GCB désignera les GCB conventionnels faits d'un noyau de bentonite maintenu en place entre deux géotextiles.

Un GCB est habituellement manufacturé sous forme de rouleau ayant une largeur de 4,0 à 5,2 m et une longueur de 30 m à 60 m. Les rouleaux sont scellés après leur production, pour éviter leur

hydratation ou déshydratation lors du transport. L'épaisseur de bentonite sèche retrouvée dans un GCB varie généralement de 4 à 7 mm.

Considérant que la bentonite retrouvée dans les GCB en Amérique du Nord provient principalement du Wyoming, que cette dernière est de type sodique (Eigenbrod, 2003b; von Maubeuge, 2002) et que les principaux GCB distribués utilisent la liaison fibreuse par aiguilletage (Bentofix®, Bentomat®, GSE Bentoliner, Geobent), la présente revue de littérature traitera presque exclusivement des GCB faits de bentonite sodique utilisant un procédé d'aiguilletage pour maintenir en place la bentonite. La figure 2-1 illustre de manière schématisée le procédé de fabrication d'un GCB sodique aiguilleté.

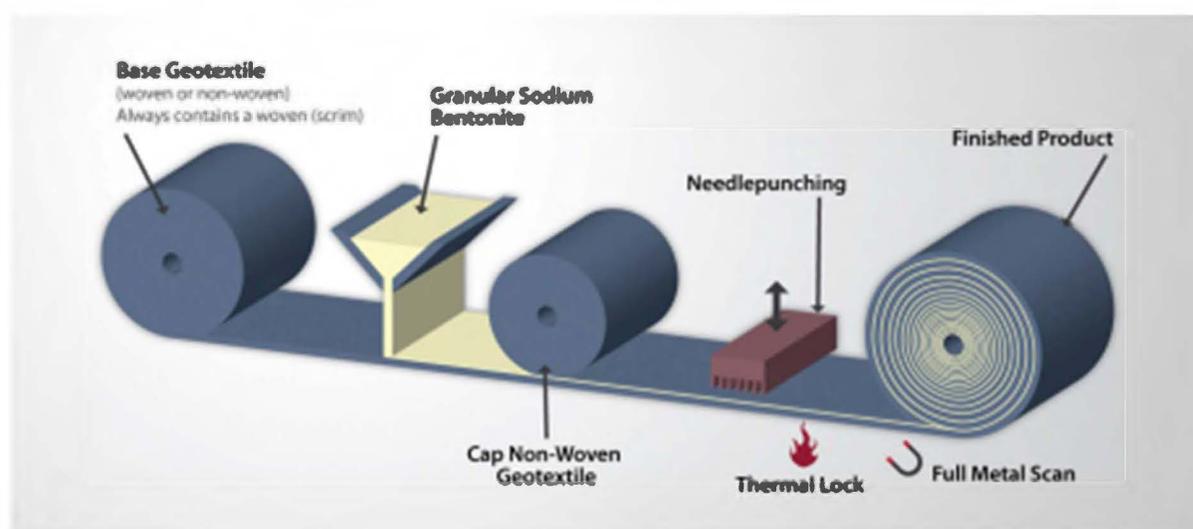


Figure 2-1 : Procédé de fabrication schématisé d'un GCB sodique aiguilleté (Terrafix Geosynthetics, 2017)

## 2.1.1 Bentonite

### 2.1.1.1 Minéralogie et structure

Le terme « bentonite » désigne généralement une argile colloïdale formée par l'altération de cendres volcaniques dans un environnement marin, et composée majoritairement de minéraux argileux du groupe des smectites et plus spécifiquement, de montmorillonite (WSGS, 2014). La teneur massique en montmorillonite de la bentonite naturelle ou usinée varie selon les produits manufacturés. Les valeurs retrouvées dans la littérature varient de 47% à 96% (Egloffstein, 2001; Rowe et al., 2017; Shackelford et al., 2000; von Maubeuge, 2002). Quelques distributeurs de GCB

(Texel et Terrafix) indiquent des teneurs minimales de 90% de montmorillonite à la fiche technique de leurs produits. Outre la montmorillonite, la bentonite contient généralement du quartz, des feldspaths, des micas et des carbonates. La densité relative de la bentonite sèche est de l'ordre de 2,5 à 2,7.

La montmorillonite possède la structure minéralogique feuilletée des phyllosilicates TOT ou 2:1. La couche élémentaire de la montmorillonite est faite de trois feuillets soit un feuillet octaédrique (O) d'alumine pris entre deux feuillets tétraédriques (T) de silice. Les sommets des octaèdres d'alumine et des tétraèdres de silice se confondent en partageant leurs molécules d'oxygène. La couche élémentaire a une épaisseur de l'ordre de 1 nm. Les couches élémentaires sont, quant à elles, retenues ensemble par des forces de van der Waals, ne produisant qu'un faible lien. La structure de la montmorillonite est illustrée à la figure 2-2.

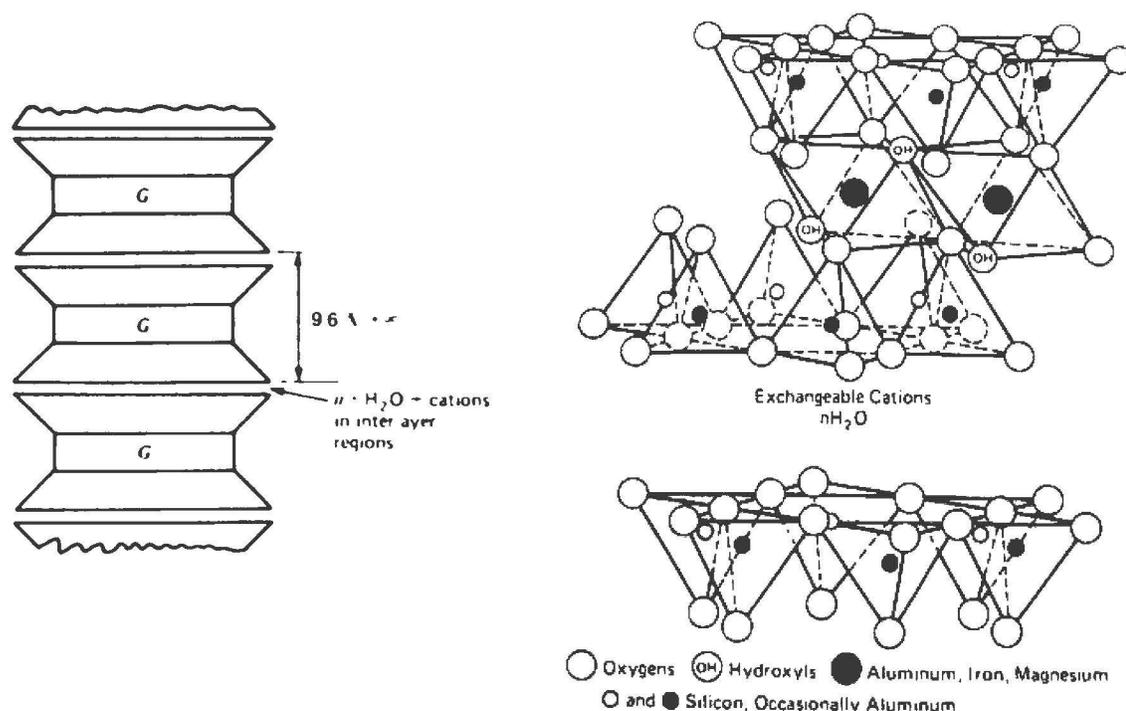


Figure 2-2 : Représentations schématiques de la montmorillonite (Mitchell & Soga, 2005)

La structure feuilletée de la montmorillonite lui confère une surface spécifique élevée : elle est de 50-120 m<sup>2</sup>/g pour la surface externe des feuillets uniquement, et peut aller jusqu'à 840 m<sup>2</sup>/g en incluant l'espace interfoliaire (Mitchell & Soga, 2005).

Des substitutions isomorphiques surviennent au sein du réseau cristallin de la montmorillonite, au niveau de la couche octaédrique. Environ un ion  $\text{Al}^{3+}$  sur 6 est remplacé par un cation  $\text{Mg}^{2+}$  ou, plus rarement,  $\text{Fe}^{2+}$ , induisant ainsi une déficience en charges négatives. Cette dernière est compensée par la présence de cations échangeables dans l'espace interfoliaire, majoritairement présents sous forme de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Ca}^{2+}$  mais également sous forme de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  (Egloffstein, 2001). Il en résulte également une capacité d'échange cationique (CEC) élevée, de l'ordre de 80 à 150 meq / 100 g (Mitchell & Soga, 2005). La CEC se définit comme étant la somme des charges négatives d'une surface minérale étant compensée par la présence de cations adsorbés (ASTM, 2010b).

Les divers types de bentonite peuvent être catégorisés selon la nature et la proportion des cations compensateurs présents. Lorsque les cations sont majoritairement du  $\text{Na}^+$ , la bentonite est qualifiée de « sodique », tandis que lorsque les ions  $\text{Ca}^{2+}$  sont en majorité, la bentonite est de type « calcique ». Des bentonites activées peuvent également être retrouvées dans les géocomposites bentonitiques. Il s'agit d'une bentonite faite de montmorillonite calcique traitée au carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) afin de favoriser la substitution du  $\text{Ca}^{2+}$  pour du  $\text{Na}^+$  et ainsi augmenter la teneur en sodium du produit. Cette substitution est souhaitable puisque la présence de sodium en surface de la couche élémentaire augmente la capacité de gonflement du minéral lorsqu'hydraté, et diminue sa conductivité hydraulique par le fait même, tel qu'il sera expliqué plus en détails à la section suivante. Bien que l'activation de la montmorillonite calcique augmente la teneur en  $\text{Na}^+$  du minéral, la bentonite sodique naturelle contient toujours un pourcentage plus élevé de sodium que de la bentonite activée (von Maubeuge, 2002). Tel que mentionné en introduction, la bentonite « nord-américaine » est majoritairement de type sodique, tandis que la bentonite « européenne » est principalement de type calcique (Eigenbrod, 2003b).

### **2.1.1.2 Mécanismes d'hydratation**

La cohésion entre les couches élémentaires de montmorillonite sèche est assurée par des forces de Van der Waals relativement faibles. Les couches élémentaires peuvent ainsi facilement s'écarter et permettre la pénétration d'eau et d'ions dans les espaces interfoliaires.

L'hydratation de la montmorillonite s'effectue en deux phases consécutives. La première phase, la phase cristalline, se produit à partir de la montmorillonite sèche (McBride 1994, Prost et al., 1998). Les charges négatives nettes élevées en surface des couches élémentaires permettent alors

l'adsorption de molécule d'eau et de cations aux couches élémentaires. Plusieurs couches de molécules d'eau peuvent alors venir se fixer dans les espaces interfoliaires. Ces molécules d'eau, qualifiées « d'eau liée », sont considérées comme étant immobiles et ne contribuent pas à la porosité effective de la montmorillonite. Plus l'hydratation progresse, plus l'espace disponible pour l'écoulement d'un liquide entre les feuillets diminue, et plus le chemin d'écoulement de ce liquide est tortueux, ce qui explique la diminution de la conductivité hydraulique observée ainsi qu'un certain gonflement.

La phase osmotique d'hydratation se produit après la phase cristalline. Cette phase d'hydratation ne se produit toutefois que lorsque les cations adsorbés à la surface de la montmorillonite sont majoritairement monovalents (McBride, 1994; Prost et al., 1998). Lors de la phase osmotique, le nombre de couches de molécules d'eau liées à la montmorillonite continue d'augmenter. Le nombre de couches d'eau additionnelles adsorbées avant d'atteindre un équilibre dépend de l'abondance et de la charge des cations présents dans le liquide circulant entre les couches élémentaires. Le gonflement de l'argile se poursuit lors de cette phase. La bentonite sodique contenue dans un GCB a la capacité d'absorber de 200 à 700% de sa masse en eau (Egloffstein, 2001). La figure 2-3 représente schématiquement l'hydratation de montmorillonite sodique et son gonflement.

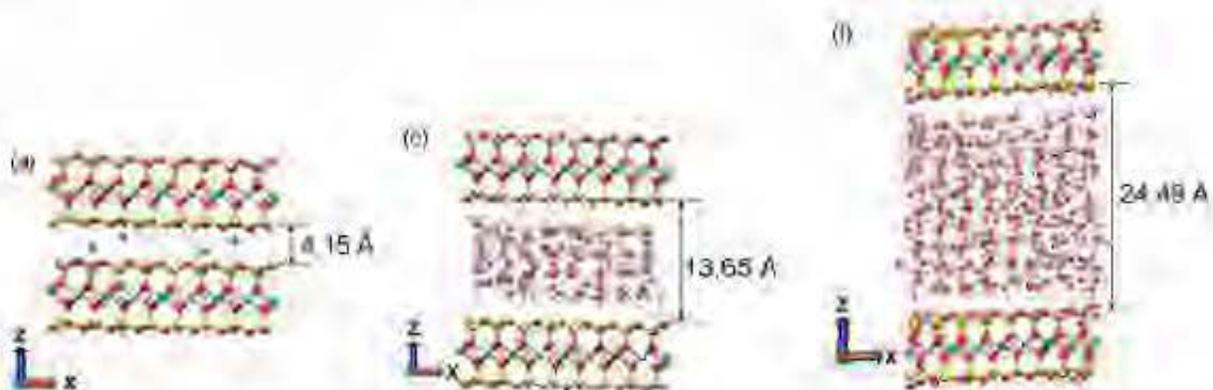


Figure 2-3 : Montmorillonite sodique à divers niveaux d'hydratation (Pradhan et al., 2015) :

a) sèche ; b) 4 couches de molécules d'eau ; c) 10 couches de molécules d'eau.

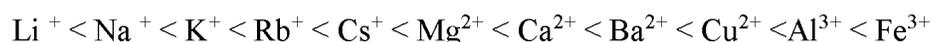
Plus il y a de cations multivalents à la surface des couches élémentaires de la montmorillonite, plus les forces d'attractions sont grandes et moins l'hydratation osmotique se produit. À l'extrême,

lorsqu'il n'y a que des cations multivalents à la surface des couches élémentaires, uniquement 4 couches de molécules d'eau peuvent alors se fixer dans l'espace interfoliaire (Jo et al., 2001). La conductivité hydraulique d'une montmorillonite contenant majoritairement des cations multivalents dans son espace interfoliaire a donc tendance à être plus élevée que pour une montmorillonite sodique hydratée dans les mêmes conditions et à avoir un gonflement moindre. Ces phénomènes sont entre autre observables pour la bentonite calcique, qui possède une conductivité hydraulique près de 1000 fois plus élevée que celle de la bentonite sodique lorsqu'hydraté avec de l'eau d'aqueduc (Gleason et al., 1997).

### 2.1.1.3 Échanges cationiques

Tel que mentionné à la section 2.1.1.1, la montmorillonite possède une CEC élevée. Ainsi, lorsque de la montmorillonite sèche ou hydratée subit une perméation par un liquide ayant une forte proportion de cations multivalents, une partie ou la totalité des cations initialement adsorbés peut être remplacée. L'équilibre préalablement établis est alors perturbé et une modification des forces électrostatiques et du nombre de couches de molécules d'eau dans l'espace interfoliaire se produit.

La facilité avec laquelle les cations en place sont remplacés par d'autres cations dépend de la valence des cations présents dans le liquide circulant dans la bentonite, de l'abondance relative de ces cations ainsi que de leur dimension. Les échanges suivent habituellement la série lyotropique (Kolstad, Benson, & Edil, 2004), soit :



Il est toutefois possible qu'un cation ayant une faible capacité de remplacement prenne la place d'un cation ayant une forte capacité de remplacement ( $\text{Na}^+$  qui remplace  $\text{Ca}^{2+}$  par exemple) lorsque la concentration du cation de faible capacité est élevée dans le liquide perméant, en comparaison à celle du cation de forte capacité.

La vitesse et l'ampleur des échanges cationiques dépendent respectivement de la force ionique (I) du liquide perméant et de l'abondance relative des cations (Benson & Meer, 2009; Kolstad, Benson, & Edil, 2004; Mitchell & Soga, 2005). La force ionique se calcule à l'aide de l'équation 2-1:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i c_i z_i^2 \quad (2-1)$$

où  $c_i$  est la concentration molaire (mol/l) de l'ion  $i$  et  
 $z_i$  est sa charge.

Le ratio des concentrations en cations monovalents et multivalents (RMD) permet d'évaluer l'abondance relative des cations dans un liquide perméant de la bentonite, à l'aide de l'équation 2-2 :

$$RMD = \frac{M_M}{\sqrt{M_D}} \quad (2-2)$$

où  $M_M$  est la concentration molaire totale (mol/l) des cations monovalents et  
 $M_D$  est la concentration molaire totale (mol/l) des cations multivalents.

Le remplacement du sodium par des cations multivalents dans la montmorillonite sodique crée des liaisons plus fortes entre les silicates anioniques de la couche tétraédrique et les cations multivalents (Zhu et al., 2012). Cela se traduit physiquement par une réduction de l'espace interfoliaire et hydrauliquement par une augmentation de la conductivité hydraulique, vu la diminution de couches de molécules d'eau liée entre les couches élémentaires. Un liquide induisant une importante modification de la structure et des propriétés hydriques d'un GCB est qualifié d'incompatible (ASTM, 2014c).

## 2.1.2 Géotextiles

Les géotextiles sont des tissus fabriqués à partir de fibres synthétiques et possédant une conductivité hydraulique élevée. Ils ont été introduits en génie civil afin de remplacer les filtres de sols granulaires, mais leur utilisation est désormais beaucoup plus variée (Koerner, 2012).

Les géotextiles sont généralement caractérisés selon leur mode de fabrication, soit tissés, non-tissés ou tricotés. Le mode de fabrication influence les propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques du matériau. Les géotextiles tissés (figure 2-4a) sont préconisés pour des applications de renforcement et de séparation, tandis que les géotextiles non-tissés (figure 2-4b) sont optimisés pour des applications de séparation et de protection (Texel, 2017). Les géotextiles tricotés sont

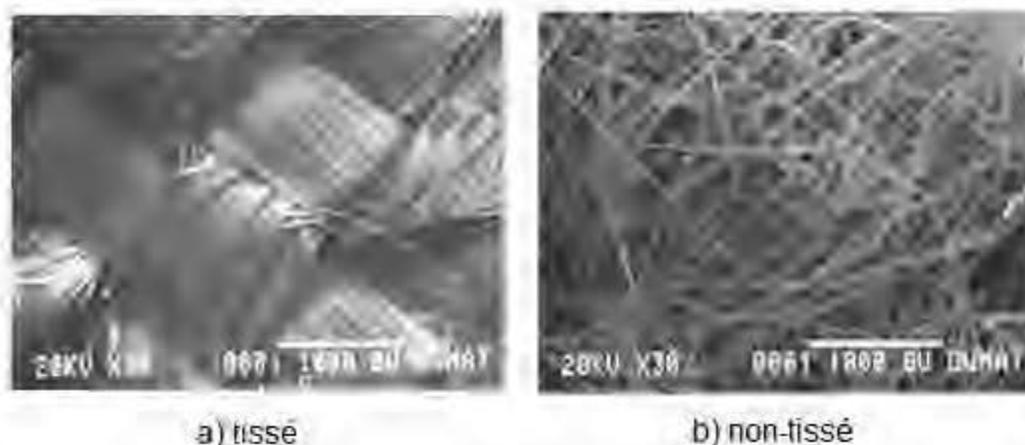


Figure 2-4 : Géotextile tissé et non tissé (Koerner, 2012)

souvent disponibles sous forme de tube, afin d'enrober des éléments (Sere, 1995). Pour cette raison, seules les deux premières familles de tissage sont utilisées dans la fabrication des GCB. Les principaux fournisseurs nord-américains de GCB détaillent leurs produits en deux assemblages de géotextiles typiques. Le premier utilise un géotextile non-tissé de  $200 \text{ g/m}^2$  sur la face supérieure et un géotextile tissé de  $105 \text{ g/m}^2$  sur la face inférieure, et le second, un géotextile non-tissé de  $200 \text{ g/m}^2$  sur la face supérieure et un géotextile non-tissé renforcé de  $200 \text{ g/m}^2$  sur la face inférieure. Le choix d'une combinaison de géotextile plutôt qu'une autre dépendra des propriétés mécaniques recherchées.

### 2.1.3 Aiguilletage

La résistance au cisaillement de la bentonite hydratée est très faible, c'est elle qui limite la résistance au cisaillement d'un GCB. Des méthodes de renforcement par collage, par couture ou par aiguilletage ont été développées au fil des ans afin d'améliorer la résistance au cisaillement interne du matériau. Les principaux fournisseurs nord-américains de GCB font tous mention de renforcement par aiguilletage dans la description de leur produit, tandis que l'utilisation de GCB renforcé par couture n'a été retrouvée que dans une publication décrivant ce type de produit comme un des plus courant en France (Didier et al., 2009). Aucune référence récente n'a été retrouvée dans la littérature sur des GCB collés. La présente section ne traite donc que du renforcement par aiguilletage.

L'aiguilletage d'un GCB consiste à faire pénétrer des aiguilles munies d'ardillons dans le géotextile non tissé du haut, puis dans la couche de bentonite et dans le géotextile inférieur (Koerner, 2012). Des fibres du géotextile du haut d'entremêlent alors dans les aiguilles, et sont entraînées jusqu'au géotextile du bas, en suivant l'axe de pénétration des aiguilles. Le procédé de renforcement par aiguilletage est schématisé à la figure 2-5.

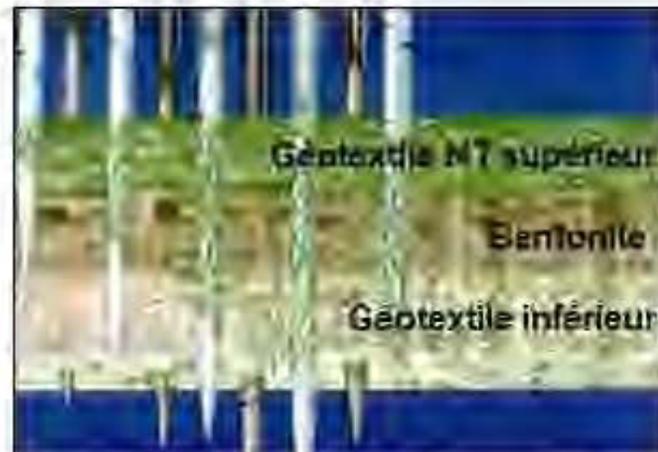


Figure 2-5 : Procédé de renforcement par aiguilletage (inspiré d'Autospec, 2017)

Plusieurs fabricants appliquent un traitement thermique au GCB après son aiguilletage, afin de fixer les fibres dans leur position d'aiguilletage et solidifier le lien entre les fibres du textile du haut mélangées à celles du bas (Terrafix, 2017).

## 2.2 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des GCB et, principalement, de la bentonite contenue dans le GCB, peuvent être utilisées tant pour le contrôle de la qualité du matériau que pour évaluer sa performance potentielle comme barrière aux fluides.

Les méthodes retrouvées dans la littérature afin d'évaluer les propriétés physiques des GCB sont majoritairement des normes de l'*American Society for Testing and Materials International* (ASTM). Quelques-unes correspondent à des normes couramment utilisées en géotechnique, telles que la D422 *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils* (norme retirée en 2016 mais non remplacée jusqu'à présent), la D2216 *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass* et la D4318 *Standard Test Methods for*

*Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, employées pour déterminer, respectivement, la granulométrie de la bentonite, sa teneur en eau, ses limites de liquidité et de plasticité et son indice de plasticité. Les autres méthodes ont été développées spécifiquement pour la caractérisation des géosynthétiques et des GCB et seules ces dernières méthodes seront décrites dans les sections qui suivent.

### **2.2.1 Épaisseur du GCB**

L'épaisseur est une propriété de base utilisée lors du contrôle de la qualité d'un géosynthétique. Elle varie toutefois selon la charge appliquée et la surface d'application de cette dernière. La norme ASTM D5199 *Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics* (ASTM, 2012a) a été développée pour le contrôle qualité des rouleaux de géotextiles et de géomembranes mais ne fait pas mention des GCB. Pour les géotextiles et géomembranes, la mesure de l'épaisseur doit être réalisée à l'aide d'une jauge d'épaisseur ayant un plateau inférieur d'au moins 56,4 mm de diamètre dans le cas d'un géotextile, et d'au moins 6,35 mm de diamètre dans le cas d'une géomembrane. Une pression doit ensuite être appliquée graduellement sur l'échantillon (2 kPa pour les géotextiles, 20 kPa pour les géomembranes) puis maintenue pendant 5 secondes. La valeur obtenue est considérée comme étant l'épaisseur du matériau.

Les valeurs d'épaisseurs de GCB rapportées par la littérature sont de l'ordre de 7 à 10 mm pour des GCB secs (GSI, 2016) et ont atteints des valeurs allant jusqu'à 13 mm pour des échantillons hydratés à l'eau déionisée, sous de faibles pressions de confinement (Petrov et al., 1997). Aucun détail n'est cependant fourni à savoir si la méthode précédente est appliquée ou non pour obtenir ces valeurs.

### **2.2.2 Diamètre des fibres aiguilletées**

L'aiguilletage réalisé sur un GCB varie d'une compagnie à une autre. Afin de déterminer la densité et la grosseur de cet aiguilletage, Rowe et al. (2017) proposent deux méthodes. La première consiste à placer un échantillon de 30 cm par 30 cm sur une table lumineuse installée dans une chambre noire, puis de prendre des photographies à hautes résolution (72 dpi) du GCB. La lumière circule au travers des fibres aiguilletées et correspond à des points blancs sur l'image, tandis que la bentonite bloque la lumière et correspond à des zones noires. Les photos ainsi obtenues peuvent être analysées numériquement afin de déterminer la dimension et la densité de l'aiguilletage. La

seconde méthode proposée est une méthode manuelle. Elle consiste à hydrater des échantillons de 0,07 m de diamètre placés dans un perméamètre à paroi flexible à l'aide d'un mélange d'eau et de teinture bleue. La saturation est complétée lorsque de l'eau bleue apparaît dans l'effluent. Cette opération permet de rehausser la différence visuelle entre les fibres et la bentonite. Les échantillons sont ensuite coupés en deux, de manière à exposer une surface représentative de l'échantillon, et au moins 20 fibres doivent être mesurées en utilisant, entre autres, un microscope stéréoscopique. Le nombre de fibres présent dans la surface exposée est également compté manuellement, au microscope stéréoscopique, ce qui permet d'estimer la densité de fibre aiguilletées. Rowe et al. (2017) ont obtenu des diamètres moyens d'aiguillette de 0,7 à 1,6 mm ainsi que des densités de 67 000 à 114 000 fibres/m<sup>2</sup> pour 4 modèles de GCB différents.

### 2.2.3 Masse surfacique

La masse surfacique de bentonite sodique n'a pas d'effet significatif sur la conductivité hydraulique à partir d'une valeur d'environ 2,7 kg/m<sup>3</sup> (Touze-Foltz et al., 2011; von Maubeuge, 2002), mais peut avoir un effet sur l'épaisseur finale d'un GCB hydraté. Cette dernière valeur peut pour sa part avoir un impact sur le gradient hydraulique (von Maubeuge & Ehrenberg, 2014) et le flux de diffusion de l'oxygène (Aubertin et al., 2000), au travers du GCB, comme il sera expliqué plus en détails aux sections 2.3 et 2.4. De plus, la masse surfacique est une propriété indiquée aux fiches techniques des divers GCB. Ce paramètre s'avère donc pertinent tant pour la caractérisation que pour le contrôle qualité des GCB utilisés.

La norme ASTM D5993 *Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners* (ASTM, 2014b) a été développée afin d'évaluer la masse surfacique sèche de bentonite dans un rouleau de GCB. Pour ce faire, 5 échantillons d'au moins 0,01 m<sup>2</sup> sont prélevés sur la largeur du rouleau, puis pesés, avant d'être séchés à une température de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , jusqu'à ce qu'une masse constante de chaque échantillon soit atteinte. Une masse surfacique de GCB sèche peut alors être calculée, en divisant la masse sèche d'un échantillon par sa superficie. La masse surfacique de bentonite est ensuite calculée en soustrayant les masses surfaciques nominales des géotextiles de la masse surfacique calculée du GCB.

Deux éléments doivent faire l'objet d'une attention particulière lors de la réalisation de cet essai. Tout d'abord, la perte de bentonite lors du découpage d'échantillons peut avoir un impact significatif sur la précision des résultats obtenus. Ensuite, le fournisseur de GCB devrait être en

mesure de confirmer que la masse surfacique réelle des géotextiles du GCB ne diffère pas de plus de 10% de la valeur nominale. En fait, il est recommandé d'utiliser les valeurs moyennes obtenues par le manufacturier pour le contrôle qualité du lot de géotextiles utilisés, plutôt que les valeurs nominales.

Les spécifications techniques des GCB disponibles sur le marché nord-américain indiquent des surfaces massiques minimales de 3,6 kg/m<sup>2</sup> ou de 4,3 kg/m<sup>2</sup>. Les données retrouvées dans la littérature indiquent un respect généralisé de ces spécifications ainsi que des valeurs pouvant être jusqu'à 25% supérieures à celles indiquées par le fabricant (Rowe et al., 2017).

#### 2.2.4 Teneur en eau initiale, actuelle et normalisée

L'évaluation de la teneur en eau de la bentonite renseigne sur l'état d'hydratation de cette dernière. La norme ASTM D5993 (ASTM, 2014b) présente une méthode de calcul de la teneur en eau initiale de la bentonite qu'un GCB contient, soit la teneur en eau avant une première hydratation. L'équation 2-3 est alors utilisée :

$$\omega_{bento} = \frac{(M_i/A) - m_{GCB}}{m_{bento}} * 100 \% \quad (2-3)$$

où  $M_i$  est la masse initiale de l'échantillon de GCB,

$A$  est l'aire de l'échantillon

$m_{GCB}$  est la masse surfacique du GCB

$m_{bento}$  est la masse surfacique de bentonite.

Les valeurs de teneurs en eau initiale de bentonite retrouvées dans la littérature sont de l'ordre de 7 à 13 % (Bouazza et al., 2007; Jo et al., 2001; Kashir & Yanful, 2001; Kolstad, Benson, & Edil, 2004; Shan & Lai, 2002; Touze-Foltz et al., 2016; Villar & Lloret, 2008).

Certains auteurs, tel que Mazzieri et al. (2013), présentent la teneur en eau initiale en faisant référence à la norme ASTM D2216 *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass* (ASTM, 2010a). Cette norme n'est pas spécifique aux géosynthétiques et permet de calculer la teneur en eau de la bentonite tout comme celle d'un GCB dans son ensemble, à l'état initial ou non, en utilisant l'équation 2-4 :

$$\omega (\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% \quad (2-4)$$

où  $M_w$  est la masse d'eau,

$M_s$  est la masse de l'échantillon sec

Le fait de faire circuler une solution saline ou contenant divers ions en solutions peut avoir un impact sur la masse sèche d'un échantillon de GCB. Bouazza et al. (2007) décrivent de manière détaillée les mécanismes menant à cette modification de masse, qui se résument par la précipitation d'éléments dissous présents dans le liquide interstitiel lors du séchage de l'échantillon, un séchage à des températures insuffisantes pour déshydrater complètement les sels en solutions et une modification de la densité spécifique de la montmorillonite due aux échanges cationiques. Cette dernière variation de masse est cependant minime. Afin de pouvoir comparer les teneurs en eau d'échantillons hydratés à l'eau DI et avec une solution ayant une grande force ionique, Bouazza et al. (2007) ont introduit le concept de masse sèche actuelle ( $M_a$ ). Cette masse sèche se calcule selon l'équation 2-5 :

$$M_{a-GCB} = \frac{M_w - fM_w c}{M_{s-GCB} + M_w c + M_w c f} = \frac{M_w(1-fc)}{M_{s-GCB} + M_w c(1+f)} \quad (2-5)$$

où  $M_{a-GCB}$  est la masse sèche actuelle du GCB

$M_{s-GCB}$  est la masse des solides du GCB

$f$  est fraction d'eau pure retenue par cristallisation

$c$  est la masse de sels anhydres par gramme d'eau pure de l'eau interstitielle.

et est utilisée à la place de la masse sèche réelle ( $M_s$ ) dans l'équation 2-4.

Lorsque divers échantillons de GCB n'ayant pas les mêmes propriétés physiques sont utilisés au cours d'expérimentations, il s'avère intéressant d'utiliser des teneurs en eau normalisées afin de comparer les résultats obtenus. La teneur en eau calculée est alors divisée par une teneur en eau de référence,  $\omega_{ref}$ , correspondant à la teneur en eau maximale du GCB lorsqu'hydraté avec un certain liquide, sous une certaine pression. Par exemple, Rayhani et al. (2011) ont utilisé des teneurs une  $\omega_{ref}$  correspond à l'immersion du GCB dans l'eau, sous une pression de confinement de 2 kPa dans le cadre de leur étude sur l'hydratation de divers GCB.

Les teneurs en eau de GCB à saturation retrouvées dans la littérature, lorsque hydratés avec de l'eau ayant une très faible force ionique, varient de 115% à 250% (Rayhani et al., 2011; Shackelford et al., 2000; Shan & Lai, 2002; Vasko et al., 2001).

## 2.2.5 Indice des vides apparent

Tout comme pour les teneurs en eau normalisées, il peut s'avérer avantageux de normaliser l'indice des vides de GCB ayant une masse surfacique et une épaisseur hydratée variable. Petrov et al. (1997) ont proposé l'utilisation d'un indice des vides apparent (*bulk void ratio*),  $e_B$ , pouvant se calculer avec les équations 2-6 et 2-7 :

$$e_B = \frac{h_{GCL} - h_s}{h} \quad (2-6)$$

$$h_s = \frac{m_{bento}}{\rho_{bento}(1+w_i)} + \frac{m_{géotex}}{\rho_{géotex}} \quad (2-7)$$

où  $h_{GCL}$  est la hauteur du GCB hydraté,

$h_s$  est la hauteur des composantes solides du GCB,

$m_{bento}$  est la masse surfacique initiales de la bentonite,

$m_{géotex}$  est les masses surfaciques initiales des géotextiles

$\rho_{bento}$  est la masse volumique des grains de bentonite dans le GCB

$\rho_{géotex}$  est la volumique des grains de bentonite des géotextiles du GCB

$w_i$  est la teneur en eau initiale de la bentonite.

## 2.3 Propriétés hydriques

Les GCB ont été développés afin d'agir comme barrière aux liquides et de remplacer les couches d'argile compactée. La connaissance et la caractérisation des propriétés hydriques du matériau sont donc primordiales afin de s'assurer qu'il rencontre les exigences voulues.

### 2.3.1 Gonflement libre

Tel qu'indiqué précédemment, la conductivité hydraulique d'un GCB est reliée au gonflement des minéraux argileux de la bentonite qu'elle contient (Egloffstein, 2001; Jae-Myung et al., 2005; Jo et al., 2001; Kolstad, Benson, & Edil, 2004; Lin & Benson, 2000; Shackelford et al., 2000; Shan & Lai, 2002). Egloffstein (2001), Eigenbrod (2003a) et Sari et Chai (2013) ont également démontré que la capacité d'auto-réparation d'un GCB est contrôlée par le gonflement de la bentonite.

La norme ASTM D5890 *Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners* (ASTM, 2011) est couramment utilisée afin d'évaluer le comportement gonflant de la bentonite contenue dans un GCB. Toutefois, l'essai consiste à évaluer le gonflement libre de 2 g de bentonite dans 100 ml d'eau, contrairement à la réalité où le gonflement est restreint par l'aiguilletage et la pression de confinement créée par les sols au-dessus du GCB. Les valeurs obtenues sont donc un indicatif de la capacité de la bentonite à s'hydrater. Dans le cadre de l'essai normé D5890, le terme « eau » réfère à une qualité d'eau pouvant être atteinte par distillation ou en passant de l'eau d'aqueduc au travers d'une résine échangeuse d'ions.

Les valeurs de gonflement libre pour de la bentonite sodique sont généralement supérieures à 30 ml/2g. La plupart des grands fournisseurs indiquent une valeur de gonflement minimale de 24 ml/2g pour leurs divers produits. À titre comparatif, une bentonite calcique possède un gonflement de l'ordre de moins de 10 ml/2g (Jo et al., 2001; Touze-Foltz, 2012). La figure 2-6 illustre cette différence : les essais réalisés avec de la bentonite sodiques sont indiqués par des flèches bleues, et l'essai avec de la bentonite calcique est pointé par une flèche rouge.



Figure 2-6 : Résultats d'essai de gonflement libre selon la norme ASTM D5890 (Touze-Foltz, 2012)

### 2.3.2 Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique est une propriété qui définit la capacité d'un fluide à circuler au travers d'un milieu poreux. Elle dépend des propriétés du fluide, de la distribution de la taille des pores, de la surface spécifique des grains et du degré de saturation du milieu (Mbonimpa et al., 2002).

La conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des échantillons de GCB peut être déterminée au laboratoire à l'aide d'essais en perméamètre à paroi flexible. Les deux normes encadrant ces essais sont la norme ASTM D5887 - *Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter* (ASTM, 2009) lors de perméation à l'eau DI, et la norme D6766 *Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions* (ASTM, 2012b) lors d'hydratation ou de percolation avec un incompatible, tel le drainage minier acide (DMA). Les montages utilisés pour la réalisation de ces essais sont présentés à l'annexe A. Tout comme leurs noms l'indiquent, les essais décrivent une procédure pour déterminer un flux au travers d'un GCB et non une  $k_{sat}$ . Cette dernière peut toutefois être calculée lorsque l'épaisseur du GCB est connue.

Les normes ASTM D5887 et D6766 prescrivent de placer un échantillon circulaire de GCB de  $100 \pm 2$  mm entre 2 papiers filtres et 2 pierres poreuses 100 mm de diamètre préalablement trempés dans le liquide utilisé pour l'hydratation. Une membrane flexible est ensuite placée autour du montage, et le tout est installé sur le piédestal du perméamètre. Le capuchon supérieur du perméamètre est alors mis en place au-dessus de la pierre poreuse, et des joints toriques sont installés à chaque extrémité de la membrane. Après le remplissage de la cellule avec de l'eau déionisée dégazéifiée, la pression de la cellule et des faces supérieures et inférieures de l'échantillon sont graduellement augmentées jusqu'à des valeurs respectives de 550 kPa, 515 kPa et 515 kPa. Cet état est maintenu pendant 40 h afin de permettre la consolidation, le gonflement, l'hydratation et la saturation de l'échantillon. L'essai de conductivité hydraulique débute en augmentant la pression à la base du spécimen à 530 kPa. Les essais D5887 et D6766 peuvent être réalisés à charge constante (méthode A), à charge variable (méthode B et C), ou à débit constant (méthode D), mais la méthode à charge variable est la plus fréquemment rencontrée dans la littérature. Dans ce dernier cas, les pressions appliquées initialement à la base et au sommet de l'échantillon (530 kPa et 515 kPa respectivement) varient au cours de l'essai, au fur et à mesure que le liquide perméant percole au travers de l'échantillon. Une attention particulière doit être portée afin que la différence de pression entre la base et le sommet ne soit jamais inférieure à 10 kPa.

Des critères d'achèvement des essais liés aux débits sont énoncés tant à la norme D5887 qu'à la norme D6766. Ces critères peuvent se résumer à l'obtention de 3 lectures consécutives indiquant

un ratio du débit entrant ( $Q_{in}$ ) sur le débit sortant ( $Q_{out}$ ) compris entre 0,75 et 1,25 sur un intervalle d'au moins 8h. Ces 3 lectures doivent également être comprises dans un intervalle allant de 0,75 à 1,25 fois la moyenne des débits. Des critères d'achèvement additionnels sont formulés à la norme D6766, soit la poursuite de l'essai jusqu'à ce l'équivalent de deux fois le volume des vides de l'échantillon (PVF, « *pore volumes of flow* ») ait circulé au travers de l'échantillon et que l'atteinte d'une différence de conductivité électrique (CE) entre le liquide entrant et sortant inférieure à 0,1. Ce dernier critère a été ajouté afin de poursuivre l'essai jusqu'à l'atteinte d'un équilibre chimique.

Les conductivité hydrauliques obtenues lors de la réalisation de l'essai D5887 sont généralement de l'ordre de  $10^{-10}$  à  $10^{-8}$  cm/s (Bouazza, 2002). Celles provenant d'essais réalisés en suivant la norme D6766 sont fortement influencés par la nature du liquide hydratant et perméant utilisés. Cet aspect sera traité plus en détails à la section 2.5.3.

L'ASTM précise que les valeurs de conductivité hydraulique obtenues à la suite de la réalisation des essais D5887 et D6766 ne sont pas représentatives des conditions d'utilisation du matériau et ne devraient pas être utilisées à des fins de conception. Il s'agit de valeurs obtenues sous certaines conditions précises d'expérimentation, et servant de base de comparaison, entre autres pour le contrôle de la qualité du matériau.

### 2.3.3 Courbe de rétention d'eau

Un GCB utilisé dans un contexte de recouvrement sera exposé à du drainage et possiblement du séchage, ce qui pourrait entraîner des variations de degré de saturation. Il est donc pertinent de connaître les propriétés de rétention d'eau du matériau. L'état de l'eau dans un sol peut être exprimé en termes d'énergie relative, dont le référentiel est le niveau d'énergie libre de l'eau pure à pression ambiante. Lors de la désaturation d'un sol, le niveau d'énergie de l'eau dans le sol est moindre que cet état de référence. Il est alors question de pression interstitielle négative aussi appelée succion (Mitchell & Soga, 2005) dans le sol. La succion totale ( $\psi_t$ ) peut être calculée à partir de la loi de Kelvin:

$$\psi_t = -\frac{RT}{vM_{vap}} \ln\left(\frac{p_{vap}}{p_{sat}}\right) = -\frac{RT}{vM_{vap}} \ln\left(\frac{RH}{100}\right) \quad (2-8)$$

où  $\psi_t$  est la succion totale (Pa)

R est la constante universelle des gaz parfaits ( $8,31432 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

T est la température absolue de l'échantillon de sol (K)

v est le volume spécifique de l'eau ( $1/\rho_w, \text{ m}^3/\text{kg}$ )

$M_{\text{vap}}$  est la masse moléculaire de la vapeur d'eau ( $18.016 \text{ kg/kmol}$ )

$p_{\text{vap}}$  est la pression partielle de vapeur (kPa)

$p_{\text{sat}}$  est la pression de vapeur saturante à la température T (kPa)

RH est l'humidité relative de l'air (%)

La  $p_{\text{sat}}$  peut pour sa part se calculer à l'aide de l'équation de Clausius-Clapeyron :

$$\ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2-9)$$

où  $p_1$  est la pression de vapeur saturante à la température  $T_1$  ( $101,325 \text{ kPa}$  à  $295 \text{ K}$ )

$p_2$  est la pression de vapeur saturante à la température  $T_2$

$\Delta H_{\text{vap}}$  est l'enthalpie de vaporisation du liquide ( $40,65 \text{ kJ/mol}$  pour de l'eau pure).

La  $\psi_t$  peut être définie de manière simplifiée par la somme de la succion matricielle  $\psi_m$  et osmotique  $\psi_o$ . La  $\psi_m$  est reliée à la dimension des vides entourant les grains d'un sol et aux tensions de surface développées à l'interface air-eau dans ce sol. Plus l'espace entre les grains de sol est petit et mieux l'eau y est retenue. La  $\psi_o$  est pour sa part reliée à la présence de sels dans l'eau interstitielle, ce qui est surtout observé dans les argiles plastiques (Tang et al., 2002). Plus la concentration en ions sera élevée entre les feuillets d'argile, plus l'eau aura tendance à être retenue dans le sol en raison du gradient de concentration entre l'eau interfoliaire et l'eau libre adjacente (Laloui, 2013). La  $\psi_m$  et la  $\psi_o$  sont indépendantes l'une de l'autre. Les variations de  $\psi_o$  sont généralement faibles en comparaison des variations de  $\psi_m$  et les courbes de succions totales et matricielles en fonction de la teneur en eau sont congruentes (Fredlund et al., 2012). Il est donc couramment considéré que la variation de succion totale est égale à la variation de succion matricielle.

Afin de relier les propriétés hydrogéologiques du sol aux forces de succion, deux fonctions hydriques sont couramment utilisées : la courbe de rétention d'eau (CRE) et la fonction de perméabilité. La CRE décrit l'évolution de la teneur en eau ou de la saturation en fonction de la succion. Un point d'intérêt de cette courbe est la valeur d'entrée d'air (AEV). Il s'agit de la succion qui doit être appliquée sur un sol pour que l'air y pénètre et que l'eau qui s'y trouve s'évacue. Si la succion appliquée sur un sol est en deçà de l'AEV, le sol maintiendra un degré de saturation élevé (généralement >90%) malgré la succion appliquée (Corey, 1957; Matyas, 1967). La fonction de perméabilité présente la conductivité hydraulique du sol en fonction de la succion. Puisqu'elle est complexe à déterminer, elle est généralement calculée à l'aide de méthodes indirectes, à partir de la CRE (Brooks & Corey, 1964; Fredlund et al., 1994; Mbonimpa, Aubertin, & Bussière, 2006; Mualem, 1976).

Un GCB est un assemblage de deux matériaux ayant des propriétés hydrauliques forts différentes. Le géotextile possède des propriétés similaires à un matériau grossier et se désature rapidement, dès l'application d'une faible succion, tandis que la bentonite possède une bonne capacité de rétention d'eau (Abuel-Naga & Bouazza, 2010). Cette différence est illustrée à la figure 2-7a. La présence d'aiguilletage au sein d'un GCB vient pour sa part limiter la capacité de gonflement de la bentonite et sa teneur en eau à saturation par le fait même. Cela confère au GCB une CRE différente de la CRE de la bentonite seule (Beddoe et al., 2011). Abuel-Naga et Bouazza (2010) proposent que la double porosité du matériel soit reflétée par une CRE bimodale, comme celle illustrée à la figure 2-7b.

Aucune norme ASTM ne décrit la manière de procéder afin de déterminer la CRE d'un GCB spécifiquement. Toutefois, depuis une dizaine d'années, de plus en plus d'études sont publiées sur le sujet, et les méthodes utilisées par les auteurs sont similaires à celles utilisées pour des sols fins. Les méthodes utilisées en laboratoire afin de déterminer la CRE des sols peuvent être divisées en deux grandes catégories, soit celles où la succion est contrôlée et celles où l'humidité relative est contrôlée (Abuel-Naga & Bouazza, 2010; Beddoe et al., 2010; Fredlund et al., 2012). Les méthodes utilisant un contrôle de la succion consistent à imposer une succion constante à un échantillon et de suivre l'évolution de sa teneur en eau et de son volume, tandis que les méthodes avec contrôle de l'humidité fixent la teneur en eau d'un échantillon et mesurent la succion obtenue à l'équilibre.

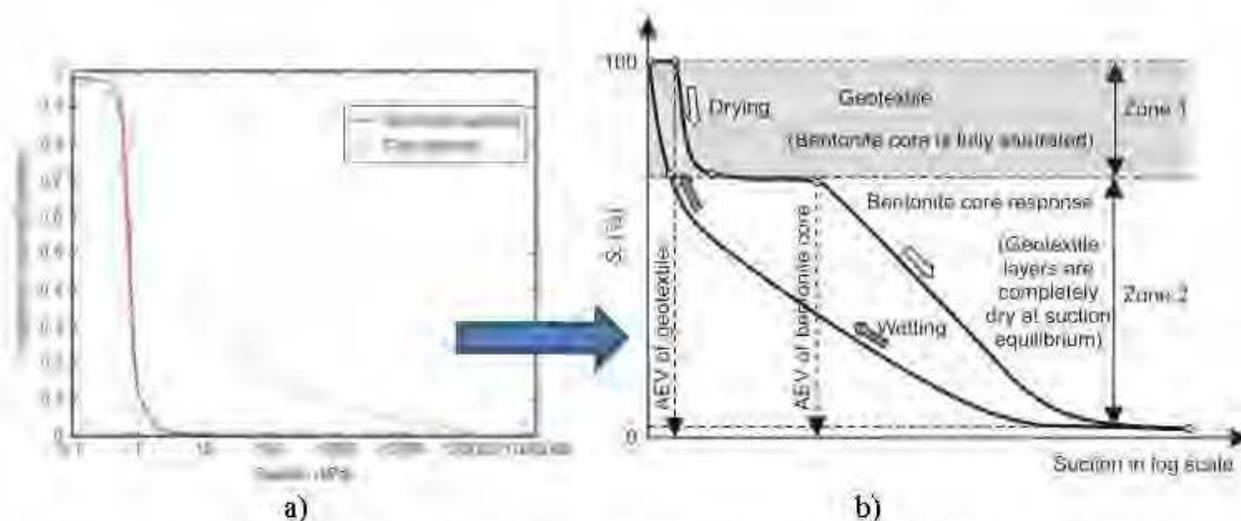


Figure 2-7 : Propriétés hydrauliques non saturées d'un GCB : a) courbes de rétention d'eau typiques d'un géotextile et d'une argile (Beddoe et al., 2010) et b) courbe de rétention d'eau conceptuelle d'un GCB - pas à l'échelle (Abuel-Naga & Bouazza, 2010)

Le tableau 2-1 présente les diverses méthodes retrouvées dans la littérature ainsi que le paramètre contrôlé par ces méthodes (suction ou humidité). Les principales méthodes s'y trouvant seront décrites sommairement aux sections qui suivent. La figure 2-8 illustre l'intervalle de succions couvert par les méthodes présentées au tableau 2-1 ainsi que le type de suction mesurée. La figure 2-8 illustre également le besoin de combiner diverses méthodes afin d'obtenir la CRE complète d'un GCB. Il est à noter que l'appareil WP4C de Decagon utilise la méthode de la température du miroir refroidi au point de rosé (« chilled-mirror dew-point method », non illustrée à la figure 2-8) et couvre un intervalle de suction allant de 1 à 300 MPa.

Bien que pour les sols non compressibles, les CRE s'expriment habituellement en termes de teneur en eau volumique ( $\theta$ ) en fonction de  $\psi$ , les CRE des GCB retrouvées dans la littérature sont majoritairement présentées sous forme de teneur en eau massique ( $\omega$ ) en fonction de  $\psi$ . Toutefois, dans le cas de matériaux compressibles tels que la bentonite, l'AEV est mieux définie en utilisation la courbe  $S_r(\psi)$  que les courbes  $\omega(\psi)$  (Mbonimpa, Aubertin, Maqsoud, et al., 2006; Wijaya et al., 2015).

Tableau 2-1 : Études portant sur la courbe de rétention d'eau des GCB

Auteurs	Méthode de mesure de la succion*	Pression verticale appliquée (kPa)	Cycle
Daniel (1993)	Psychromètre (SC) et équilibre de vapeur (MC)	0	Mouillage
Southen et Rowe (2004)	Translation d'axe - Plaque pression (SC)	0	Séchage
Barroso et al. (2006)	Papier filtre (MC)	0	Mouillage
Bouazza, Gates, et al. (2006)	Psychromètre à thermocouples (MC)	0	Mouillage
Southen et Rowe (2007)	Translation d'axe - Plaque pression (SC) et extracteur à membrane (SC)	0, 0.5, 3 et 10	Séchage
Abuel-Naga et Bouazza (2010)	Psychromètre à thermocouples (MC) et sondes capacitives d'humidité relative (MC)	50	Mouillage
Beddoe et al. (2010)	Tensiomètre à haute capacité (MC) et sondes capacitives d'humidité relative (MC)	2	Séchage
Beddoe et al. (2011)	Tensiomètre à haute capacité (MC) et sondes capacitives d'humidité relative (MC)	2	Mouillage et séchage
Hanson et al. (2013)	Translation d'axe - Plaque pression (SC), papier filtre (MC) et sondes capacitives d'humidité relative (MC)	0	Mouillage et séchage
Bannour et al. (2014)	Équilibre de vapeur (SC) et technique osmotique avec polyéthylène glycol (PEG)	0, 10, 50, 100 et 200	Mouillage
Rouf et al. (2014)	Équilibre de vapeur (SC)	0 et 20	Mouillage
Yesiller et al. (2014)	Plaque pression (SC), papier filtre (MC) et tensiomètre (MC)	0	Mouillage et séchage
Acikel et al. (2015)	Papier filtre (MC)	1	Mouillage
Lu et al. (2017)	Température du miroir refroidi au point de rosé avec un WP4C de Decagon (MC)	Variable (Volume constant)	Mouillage
Leong et al. (2018)	Température du miroir refroidi au point de rosé avec un WP4C de Decagon** (MC)	Variable (Volume constant)	Mouillage
Lu et al. (2018)	Température du miroir refroidi au point de rosé avec un WP4C de Decagon (MC)	Variable (Volume constant)	Mouillage
Rajesh et Khan (2018)	Équilibre de vapeur (SC) et papier filtre (MC)	0 et 20	Mouillage

\* SC = Méthode par contrôle de la succion. MC = Méthode par contrôle de l'humidité

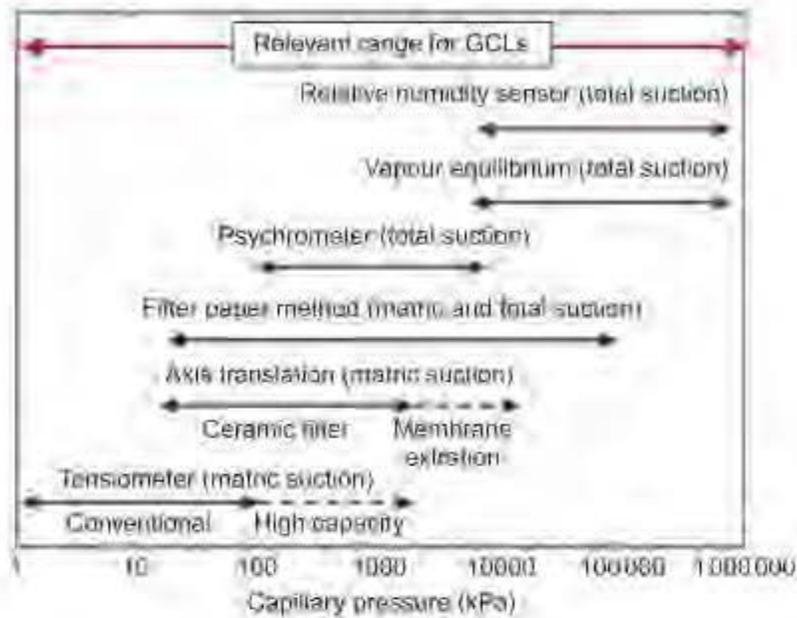


Figure 2-8 : Intervalle de succions couvert par méthode (Beddoe et al., 2010)

### 2.3.3.1 Papier filtre

La méthode du papier filtre est une méthode simple et peu coûteuse de mesure indirecte de la suction. Elle est encadrée par la norme ASTM D5298 *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper* (ASTM, 2016b). La méthode des papiers filtres se divise en 2 sous-méthodes qui se basent sur l'utilisation d'un papier filtre dont la CRE est connue (déterminée en laboratoire ou basée sur des équations recommandées par la norme ASTM ou dans la littérature). La première consiste à mettre directement en contact une pile de 3 papiers filtres avec un échantillon de sol ayant une teneur en eau désirée, en appliquant une pression de 1 kPa sur les papiers filtres. Le tout est ensuite placé dans un contenant hermétique permettant de limiter l'évaporation. Lorsque l'équilibre des succions est atteint, le papier filtre au centre de la pile de 3 est pesé puis séché afin d'en connaître la teneur en eau. La suction du papier filtre peut être connue grâce à sa CRE et cette suction correspond également à la suction matricielle de l'échantillon puisque le système est à l'équilibre. La deuxième méthode diffère de la première uniquement en ne mettant pas directement en contact l'empilement de 3 papiers filtres avec l'échantillon. La suction obtenue correspond alors à la suction totale. La qualité des résultats obtenue dépend de la précision de la courbe de calibration utilisée, qui peut être influencée par plusieurs facteurs (Power et al., 2008). Bannour et al. (2014) ont également fait mention du développement de champignons

sur les papiers filtres lors d'essais de longue durée avec des GCB, ce qui a pu affecter les résultats obtenus.

### 2.3.3.2 Translation d'axes

La méthode de la translation d'axes consiste à installer un échantillon sur une plaque poreuse ou une membrane saturée, connectée à une sortie d'eau à la pression atmosphérique (pression d'eau  $u_w$  nulle). Cette plaque ou membrane se trouve pour sa part dans une enceinte hermétique ayant une entrée d'air pressurisée. Une pression d'air supérieure à la pression d'eau ( $u_a > 0$ ) est appliquée dans la chambre où se trouve l'échantillon, ce qui revient à imposer artificiellement une succion de valeur positive (Delage & Cui, 2000) égale à  $u_a - u_w$ .

Une partie de l'eau contenue dans l'échantillon est évacuée au travers de la plaque poreuse ou de la membrane, jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. La surpression peut être transposée en succion et associée à la teneur en eau obtenue à l'équilibre, ce qui donne un point de la CRE. Les instruments utilisant la translation d'axe sont l'extracteur à pression (plaque pression) et la cellule pression (cellule Tempe). L'essai avec extracteur à pression peut être réalisés pour des succions allant de 0 à 1500 kPa avec une plaque en céramique, mais l'utilisation d'une membrane permet pour sa part de couvrir un intervalle de succion allant de 1500 kPa à 10 000 kPa (Riskin, 2014). Divers appareils pouvant être utilisés sont illustrés à la figure 2-9.

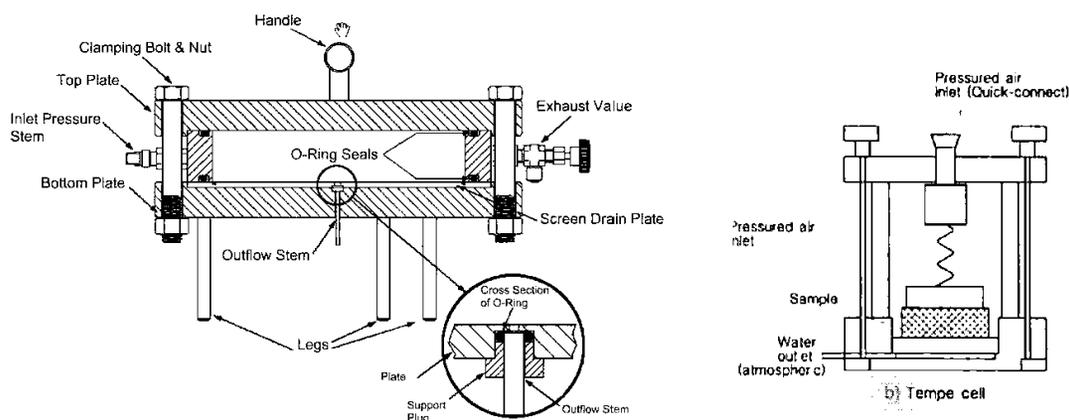


Figure 2-9 : Appareils utilisés pour la méthode par translation. a) Extracteur à pression (Southen & Rowe, 2007) b) Cellule pression (Tempe Cell) (Aubertin et al., 1998).

Les essais avec extracteurs à pression sont encadrés par méthode C de la norme ASTM D6836 *Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge* (ASTM, 2016d). L'essai en cellule pression (*Tempe Cell*) utilise pour sa part une procédure inspirée de cette norme (Aubertin et al., 1998). La cellule Tempe n'utilise qu'un échantillon pour toute la durée de l'essai, tandis que l'extracteur à pression utilise habituellement un échantillon par palier de pression, bien qu'il soit tout de même possible d'utiliser un échantillon pour tous les paliers de pression. Les extracteurs à pression et cellules pression ne permettent généralement pas l'application d'une pression de confinement pendant l'essai.

Le temps requis pour atteindre l'équilibre varie grandement selon le type de sol. La norme ASTM propose d'utiliser les critères présentés au tableau 2-2 afin de déterminer le moment d'atteinte de l'équilibre.

Tableau 2-2 : Critère d'atteinte de l'équilibre (ASTM, 2016d)

Succion	Temps sans changement à l'interface air-eau
Moins de 500 kPa	24 h
500 à 1000 kPa	48 h
Plus de 1000 kPa	96 h

### 2.3.3.3 Sondes capacitives d'humidité relative

Il est possible de déterminer les teneurs en eau à de fortes succions ( $> 1500$  kPa) en utilisant des sondes capacitives d'humidité relative. Cette sonde consiste en un condensateur fait d'un matériau diélectrique hygroscopique placé entre deux électrodes. Lorsque l'humidité augmente, la capacitance du condensateur augmente, et le signal est converti en humidité selon la température et la pression ambiante (Rtonic, 2017).

Beddoe et al. (2010, 2011) ont utilisé le montage illustré à la figure 2-10 afin de déterminer la teneur en eau de divers échantillons de GCB. La sonde était placée au-dessus de l'échantillon, sans toutefois lui toucher, et chaque essai avait une durée minimale de 12 h, pendant lesquelles la température et l'humidité relative étaient également enregistrés.

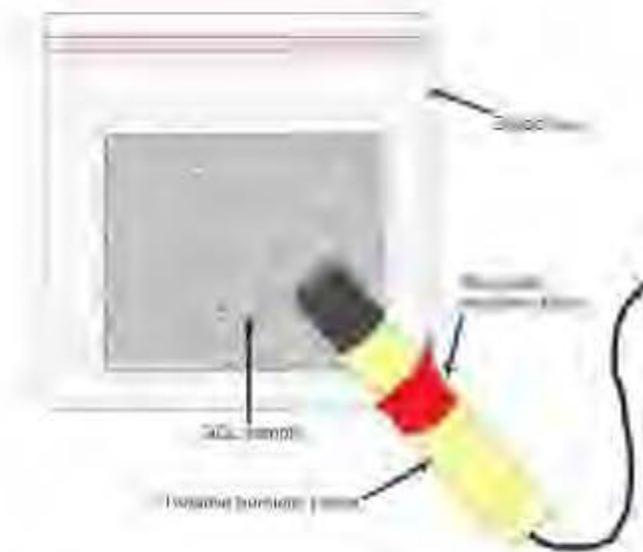


Figure 2-10 : Montage pour l'essai avec sonde capacitive d'humidité relative (Beddoe et al. 2010)

#### 2.3.3.4 Équilibre de la pression des vapeurs

La méthode d'équilibre de la pression des vapeurs consiste à placer un échantillon dans une chambre confinée dont l'humidité est contrôlée par une solution saline saturée exerçant une certaine pression partielle de vapeur d'eau. Les transferts d'eau entre l'échantillon et la vapeur d'eau s'effectue jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint (typiquement de 1 à 2 mois) (Tang et Cui, 2005), ce qui s'observe par une stabilisation de la masse de l'échantillon à l'étude. Puisque la température a un impact important sur la pression de vapeur saturante, la température doit idéalement être contrôlée pendant l'essai. La succion peut ensuite être déterminée à partir de la loi de Kelvin (équation 2-6).

Cette méthode est généralement utilisée pour l'évaluation de la teneur en eau à des succions de plus de 3 MPa, et peut imposer des succions allant jusqu'à plus de 300 MPa (Delage et Cui, 2000). La succion est fonction du sel utilisé. La figure 2-11 illustre un montage utilisant un dessiccateur sans l'application d'une pression de confinement, tandis que la figure 2-12 illustre un montage possible pour la réalisation de l'essai avec application d'une pression de confinement, en combinant un dessiccateur à une cellule œdométrique.

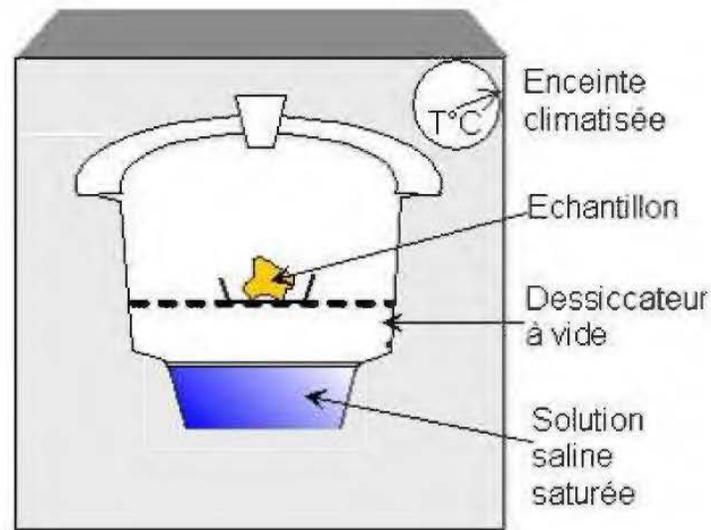


Figure 2-11 : Contrôle de la succion par équilibre des vapeurs à l'aide d'un dessiccateur et de solution saline saturée (Benchouk, 2005).

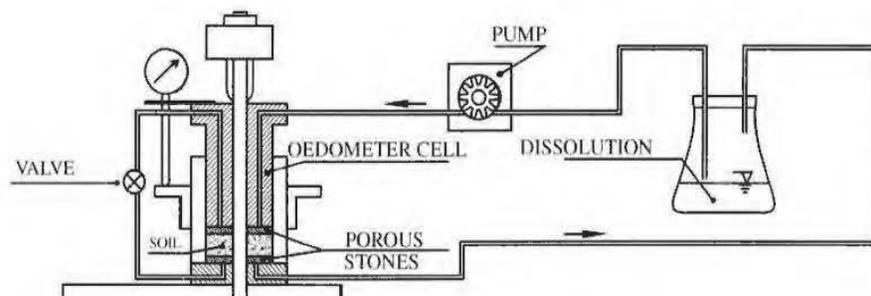


Figure 2-12 : Contrôle de la succion par équilibre des vapeurs avec application d'une pression de confinement (Pintado et al., 2009).

### 2.3.3.5 Température du miroir refroidi au point de rosé

Dans la méthode de la température du miroir refroidi au point de rosé, la teneur en eau de l'échantillon est connue et fixée, la pression partielle de vapeur varie jusqu'à atteinte d'un équilibre et la pression partielle à l'équilibre est utilisée afin de déterminer la succion totale correspondante, à l'aide de la loi de Kelvin (équation 2-6). Pour ce faire, l'échantillon ayant la teneur en eau désirée

est placée dans une chambre scellée contenant un miroir dont la température peut être contrôlée avec précision. La chambre est également équipée d'un détecteur de condensation sur le miroir. Lorsque l'équilibre est atteint entre l'échantillon et l'air ambiant de la chambre scellée, la température du miroir est abaissée jusqu'à ce que de la condensation se forme à sa surface, ce qui correspond au point de rosée. La  $p_{\text{sat}}$  au point de rosée est égale à la  $p_{\text{vap}}$  de l'échantillon, tandis que la  $p_{\text{sat}}$  à la température de l'échantillon peut être déterminée à partir de la formule de Clausius-Clapeyron (équation 2-7).

La détermination d'une CRE à l'aide de la méthode de la température du miroir refroidi au point de rosée est encadré par la méthode D de la norme ASTM D6836 (ASTM, 2016d). Lorsqu'un même échantillon est utilisé pour réaliser une CRE, il est recommandé de sceller l'échantillon après un ajout d'eau ou une période de séchage et de le laisser reposer 24h afin que la teneur en eau soit uniforme au sein de l'échantillon.

L'appareil WP4C de Decagon (devenu METER Group en 2016), utilisant la méthode de la température du miroir refroidi au point de rosée, a été utilisé dans le cadre de plusieurs études sur les CRE de GCB au cours des dernières années. Cet appareil permet l'analyse d'échantillons de 38 mm de diamètre et d'environ 8 mm de hauteur. La figure 2-13 illustre la configuration du WP4C. La précision de l'appareil est de 0,05 MPa pour des succions de 0-5 MPa et de 1% pour des succions de 5 à 300 MPa. L'appareil ne peut pas déterminer des succions supérieures à 300 MPa.

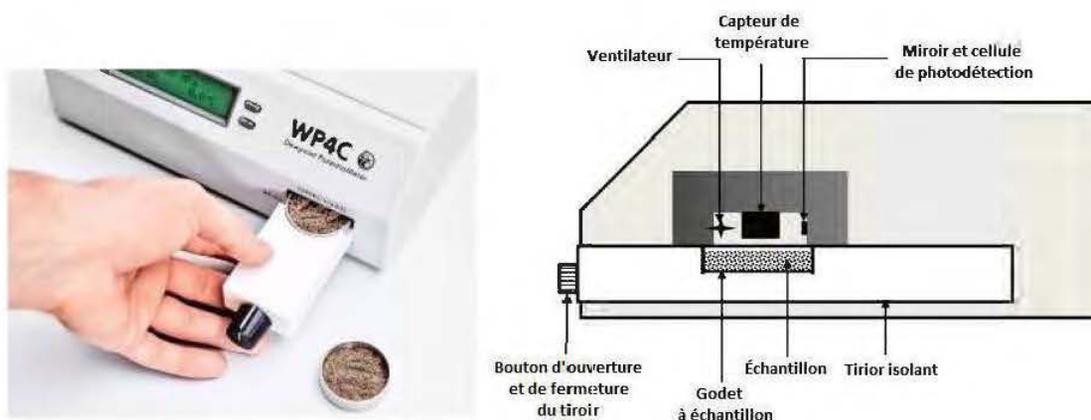


Figure 2-13 Appareil WP4C et composantes internes (Edaphic Scientific, 2018; Lu et al., 2017)

### 2.3.3.6 Choix de la méthode et interprétation

Le choix de la méthode utilisée pour l'élaboration d'une CRE d'un GCB dépendra de la plage de succion à évaluer ainsi que du besoin d'appliquer une pression de confinement ou non pendant l'essai. La réalisation d'essais avec une pression de confinement peut s'avérer intéressante dans le cadre d'études sur les GCB puisque ce paramètre a une grande influence sur le comportement du matériau (voir section 2.5.2).

Une revue des principales méthodes utilisées en laboratoire afin de déterminer la CRE de sols a été réalisée par Abuel-Naga et Bouazza (2010), afin de déterminer quelles méthodes étaient davantage appropriées pour déterminer la CRE d'un GCB. Au niveau des méthodes avec contrôle de la succion, la méthode de la translation d'axe a été identifiée comme étant peu recommandable pour des GCB considérant leur structure composite. En effet, pour que cette méthode soit efficace, il est important d'avoir une continuité entre la plaque ou membrane connectée à la sortie d'eau à la pression atmosphérique et l'eau interstitielle de l'échantillon analysé. Toutefois, la présence du géotextile entre la bentonite et la plaque ou la membrane peut créer un bris de capillarité et empêcher cette continuité, tout particulièrement lorsque les succions sont élevées. Ce phénomène a d'ailleurs été observé par Southen et Rowe (2007) lors d'essais avec une plaque pression. La technique osmotique avec polyéthylène glycol n'est pas recommandée pour les mêmes raisons. La technique de l'équilibre des pressions de vapeur a pour sa part été identifiée par Abuel-Naga et Bouazza (2010) comme étant fiable puisque le développement d'un bris de capillarité avec les géotextiles n'est pas possible. Les méthodes avec contrôle de l'humidité ont été considérées comme étant généralement plus appropriées pour l'évaluation de la CRE de GCB puisque le mouillage ou séchage direct des échantillons n'est pas affecté par la tendance des géotextiles à former des bris de capillarité. Bien que la méthode du papier filtre soit simple à appliquer, la réussite de l'essai et la qualité des résultats dépend grandement de la courbe de calibrage utilisée (Rajesh & Khan, 2018). Jusqu'à présent, la méthode a connu un succès limité lorsqu'utilisée avec des GCB (Acikel et al., 2015).

La méthode du tensiomètre haute capacité a été décrite par Beddoe et al. (2010) ne faisait pas l'objet de la revue de méthodes de Abuel-Naga et Bouazza (2010). Selon ses auteurs, cette méthode permettrait d'obtenir des résultats plus rapidement que par translation d'axe. Toutefois, le

tensiomètre n'est en contact qu'avec la bentonite du GCB, ce qui ne permet pas de considérer la structure composite du matériau.

Le choix d'un modèle afin de représenter la CRE d'un GCB est complexe considérant sa forme bimodale. Abuel-Naga et Bouazza (2010) recommandent d'utiliser le modèle de Gitirana et Fredlund (2004) plutôt qu'un modèle comme celui de van Genuchten (1980) pour tracer la CRE, afin de tenir compte de cette bimodalité anticipée lors du drainage. Toutefois, la majorité des résultats disponibles sont issus de cycles de mouillage, afin de documenter l'hydratation des GCB à partir de l'humidité contenue dans la couche de sol sous-jacente au matériau. La forme bimodale de la CRE en séchage n'a donc pas été confirmée par des essais de laboratoires et l'utilisation des modèles de van Genuchten (1980) et de Fredlund et Xing (1994) ont donné de bons ajustements à Bannour et al. (2014) pour les résultats obtenus lors de cycles de mouillage.

## 2.4 Propriétés diffusives

Les principaux mécanismes de migration de gaz observés dans un milieu poreux sont l'advection et la diffusion. Le premier résulte d'un gradient de pression, tandis que le second découle d'un gradient de concentration (Fredlund et al., 2012). Lorsque le degré de saturation du milieu est élevé (> 80-85%), la phase gazeuse est occluse. La perméabilité à l'air est alors très faible, le gaz peut difficilement circuler par advection, et les mécanismes de diffusion sont prédominants. Considérant qu'il est attendu qu'un GCB maintienne un degré de saturation élevé dans un contexte de recouvrement, l'évaluation du flux diffusif d'oxygène au travers du GCB permet d'évaluer la performance du matériau comme barrière à l'oxygène.

Le flux diffusif de l'oxygène (équation 2-10) peut être évalué avec la première loi de Fick (Aachib et al., 2004) :

$$F(z, t) = -D_e \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} = -\theta_{eq} D^* \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \quad (2-10)$$

où F est le flux diffusif

$D_e$  est le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène

$D^*$  est le coefficient de diffusion apparent de l'oxygène

C est la concentration en oxygène

$z$  est la profondeur

$t$  est le temps

$\theta_{eq}$  est la porosité effective

La porosité effective,  $\theta_{eq}$ , est un paramètre développé afin de tenir compte à la fois de la diffusion dans l'air et dans l'eau qui se calcule à l'aide de l'équation 2-11 (Aubertin et al., 2000):

$$\theta_{eq} = \theta_a + H\theta_w \quad (2-11)$$

où  $\theta_a$  est la teneur en air volumique

$\theta_w$  est la teneur en eau volumique

$H$  est la constante d'Henry dans le cas de la dissolution de l'oxygène dans l'eau ( $\approx 0,03$ )

Divers modèles prédictifs ont été développées afin d'estimer le  $D_e$  de l'oxygène. Un modèle fréquemment utilisé dans le contexte de recouvrement minier est celui de Aachib et collaborateurs (Aachib et al., 2002; Aachib et al., 2004) :

$$D_e = \frac{1}{n^2} (D_a^0 \theta_a^{p_a} + HD_w^0 \theta_w^{p_w}) \quad (2-12)$$

où  $n$  est la porosité du sol

$D_a^0$  est le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air ( $1,8 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s à 20°C)

$D_w^0$  est le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau ( $2,5 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s à 20°C)

$p_a$  et  $p_w$  sont des paramètres liés à la tortuosité définis par les équations :

$$p_a = 1,2010 \theta_a^3 - 1,5150 \theta_a^2 + 0,9870 \theta_a + 3,119 \quad (2-13)$$

$$p_w = 1,2010 \theta_w^3 - 1,5150 \theta_w^2 + 0,9870 \theta_w + 3,119 \quad (2-14)$$

L'équation 2-12 est applicable pour des porosités allant de 0,1 à 0,8 et des degrés de saturations supérieurs à 10%. Une valeur de 3,4 représente généralement une bonne estimation de  $p_a$  et  $p_w$  (Aachib et al., 2004).

Un nombre limité d'études a été réalisé sur la migration des gaz au travers des GCB (Aubertin et al., 2000; Bouazza & Vangpaisal, 2003; Didier et al., 2000; Rouf et al., 2016; Shan & Yao, 2000),

et que parmi le lot, seule l'étude d'Aubertin et al. (2000) s'intéresse au flux diffusif au travers d'un GCB. Afin de déterminer ce flux, le coefficient de diffusion effectif du GCB,  $D_e$ , doit être connu. L'essai décrit par Aubertin et al. (2000) permet d'en faire l'évaluation en utilisant le montage illustré à la figure 2-14.

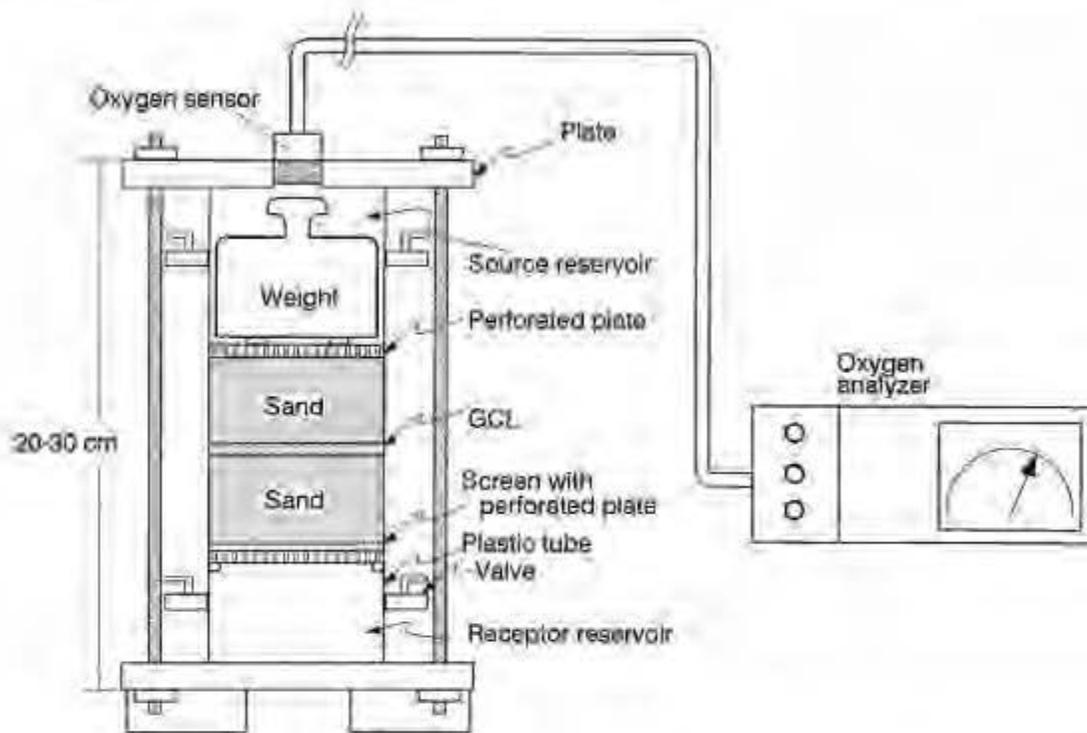


Figure 2-14: Représentation schématique de la cellule de diffusion (Aubertin et al., 2000)

La cellule de diffusion utilisée par Aubertin et al. (2000) était un cylindre de PVC ayant un diamètre intérieur de 8,5 cm et une hauteur de 20-30 cm. Une plaque perforée (50 trous de 0,5 cm de diamètre) a tout d'abord été installée dans le bas de la cellule, puis recouverte d'un géotextile et de 5 cm de sable sec dont la relation  $D_e - S_r$  était connue. Du sable à béton ayant 85% de ses grains de diamètre inférieur à 1 mm et une faible pression d'entrée d'air a été utilisé. Un échantillon circulaire de GCB de 8,5 cm a ensuite été installé sur le sable sec. Afin d'assurer un bon contact entre la paroi de la cellule et l'échantillon, la paroi de la cellule a préalablement été graissée, et de la bentonite en poudre a été ajoutée à proximité des parois. Le GCB en place a finalement été recouvert de 5 cm du même sable, d'une autre plaque perforée, et d'une charge exerçant une pression de 10 à 30 kPa. Un espace d'environ 0,5 cm a été maintenu entre la plaque et la charge.

afin d'assurer une bonne circulation de l'oxygène. Quatre valves se trouvaient sur le tube de PVC afin de pouvoir purger le système à l'azote.

La première étape de l'essai a consisté à amener au niveau de saturation désiré l'échantillon de GCB installé dans la cellule. Lorsque l'hydratation a été complétée, la cellule a été purgée à l'azote. L'essai a débuté en ouvrant rapidement le réservoir du haut, de manière à ce que les conditions atmosphériques soient atteintes. La variation de concentration en oxygène dans ce réservoir en fonction du temps a ensuite été enregistrée périodiquement, à l'aide d'une sonde installée dans la plaque du haut du montage.

Les résultats obtenus ont finalement été traités à l'aide du logiciel POLLUTE, permettant de déterminer une courbe théorique s'ajustant bien aux données enregistrées, et d'en déduire la valeur de  $D_e$  pour le GCB. Il a été possible d'observer deux phases de diffusion dans les courbes obtenues, soit une première, relativement courte, correspondant à la diffusion au travers du sable, puis une seconde phase correspondant à la diffusion au travers du GCB.

Les valeurs de  $D_e$  obtenues par Aubertin et al. (2000) pour divers échantillons d'un même GCB à un degré de saturation de 100% varient de  $0,8 \times 10^{-11}$  à  $8,6 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. Un essai a été réalisé à un degré de saturation de 71%, et la valeur de  $D_e$  obtenue était de  $9,5 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s.

## **2.5 Facteurs d'influence des propriétés et du comportement**

Les propriétés des GCB présentées précédemment peuvent être affectées par des facteurs intrinsèques, en lien avec les matériaux contenus dans le GCB et son mode de fabrication, des facteurs externes ayant une influence à court terme sur les GCB, soit ceux liés à l'installation et la première hydratation du GCB, et des facteurs externes menant à des conséquences à plus long terme (Touze-Foltz, 2012). Ces facteurs d'influences sont présentés aux prochaines sections.

### **2.5.1 Facteurs intrinsèques**

#### **2.5.1.1 Minéralogie de la bentonite**

Tel que mentionné précédemment, le terme bentonite désigne une argile colloïdale composée majoritairement de minéraux gonflants du groupe des smectites. La performance de la bentonite comme barrière à l'eau dépend du pourcentage de montmorillonite qu'elle contient (Lee & Shackelford, 2005). Tandis que certains fournisseurs indiquent dans leurs fiches techniques un

pourcentage minimal de montmorillonite dans leurs produits, d'autres indiquent un pourcentage en smectite minimal ou simplement, un gonflement libre minimal devant être atteint (24 ml / 2 g dans tous les cas). Divers assemblages de minéraux peuvent mener au respect des critères du fournisseur, tout en ayant des propriétés différentes. Par exemple, l'impact de la minéralogie sur le gonflement libre, la CEC et la conductivité hydraulique sont illustrés aux figures 2-15 et 2-16.

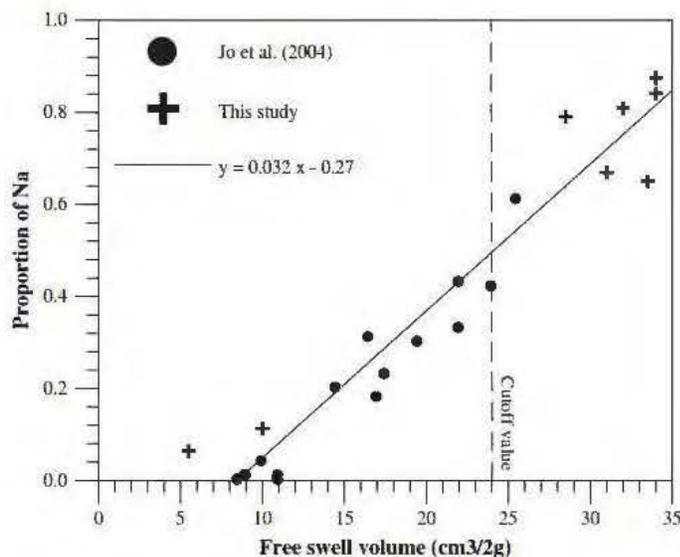


Figure 2-15 : Gonflement libre de la bentonite en fonction de la proportion de sodium échangeable (Guyonnet et al., 2009)

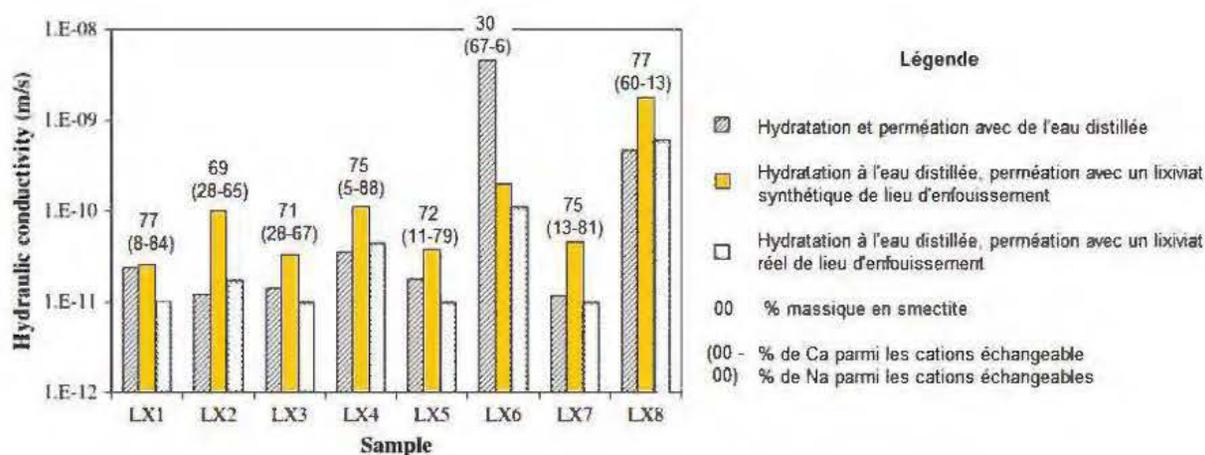


Figure 2-16 : Conductivité hydraulique saturée de GCB en fonction de la minéralogie et des liquides de d'hydratation et de perméation (adapté de Guyonnet et al., 2009)

### **2.5.1.2 Texture de la bentonite**

La bentonite contenue dans un GCB peut être manufacturée sous forme de poudre (70% des particules passant le tamis 0,075 mm), sous forme granulats fins (0,075 mm – 0,475 mm), ou sous forme de granulats grossiers (>0,475 mm). La bentonite en granulats présente l'avantage de générer moins de pertes de bentonite et moins de poussières lors de l'installation de GCB. Toutefois, certains auteurs ont rapporté une hétérogénéité de l'hydratation plus élevée dans les GCB utilisant ce dernier type de granulats. Après une période d'hydratation et de perméation adéquate, les valeurs de  $k_{sat}$  obtenues sont généralement similaires pour tous les types de bentonite (Abichou et al., 2002).

### **2.5.1.3 Masse surfacique**

Tel que mentionné précédemment, la masse surfacique de bentonite peut influencer l'épaisseur d'un GCB saturé, pour une même pression de confinement. Ainsi, bien que la  $k_{sat}$  ne varie pas significativement avec la masse surfacique de la bentonite, le gradient hydraulique au travers du GCB varie, ce qui a un effet sur le débit de percolation. Ce phénomène est illustré à la figure 2-17.

Pour des raisons similaires, le  $D_e$  d'un GCB ne devrait pas être influencé par la masse surfacique de bentonite, mais le flux diffusif d'oxygène pourrait l'être.

### **2.5.1.4 Grosseur et densité d'aiguilletage du GCB**

Scalia et Benson (2010) et Benson et al. (2010) ont documenté la présence d'écoulements préférentiels le long de fibres aiguilletées de GCB ayant subi des échanges cationiques. La présence de ces écoulements se traduit par une conductivité hydraulique plus élevée. Les auteurs ont posé l'hypothèse que les écoulements préférentiels étaient attribuables à un échange cationique se produisant en premier le long des fibres en question, empêchant l'hydratation osmotique de la bentonite située à proximité des fibres. Les raisons de l'occurrence du phénomène sur certains GCB et sur certaines fibres plutôt que sur d'autres ne sont toutefois pas encore clairement identifiées.

Rowe et al. (2017) ont procédé à l'évaluation de 4 types de GCB ayant été enterrés pendant 5 et 7 ans sur un site témoin en Ontario, Canada. Les GCB à l'étude possédaient des dimensions et densité d'aiguilletage différentes. Des essais de conductivité hydraulique ont été réalisés sur les divers échantillons, et il s'est avéré qu'aucun écoulement préférentiel ne s'est produit le long des fibres

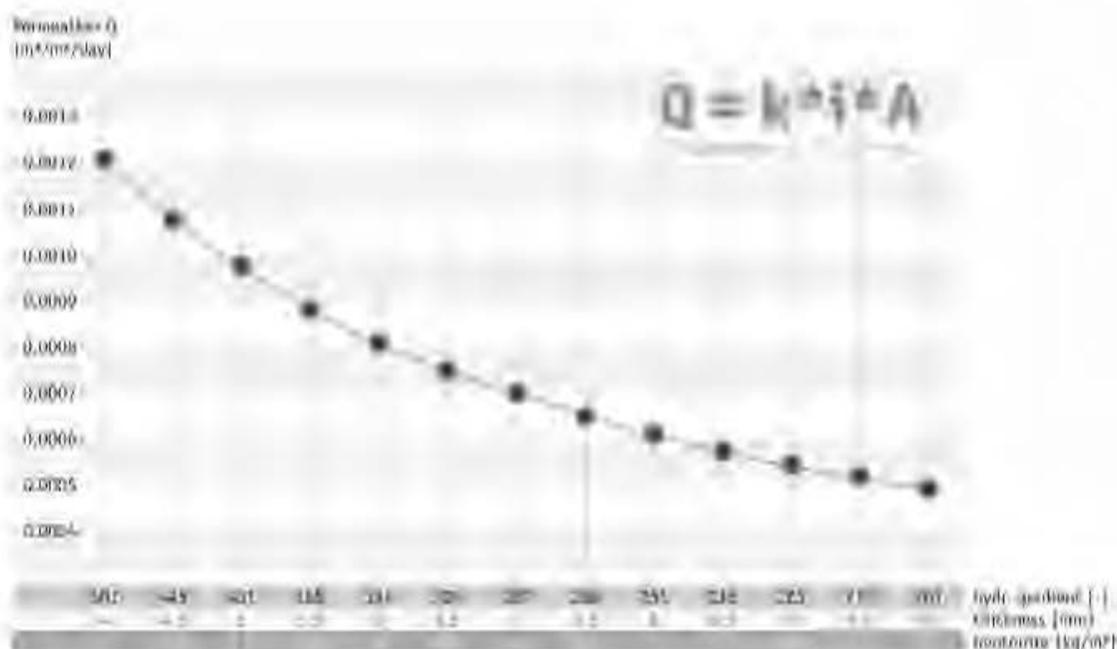


Figure 2-17 : Débit de percolation en fonction de la masse surfacique, pour une même conductivité hydraulique (von Maubeuge & Ehrenberg, 2014)

du GCB ayant les plus petites fibres aiguilletées et la plus faible densité d'aiguilletage, peu importe le gradient hydraulique utilisé. Les autres GCB ont maintenus leur conductivité hydraulique à de faibles gradients, mais un écoulement préférentiel produisant une augmentation de conductivité hydraulique de 2 à 3 ordres de grandeur s'est produit pour les gradients plus élevés. Les principaux résultats de cette étude sont présentés au tableau 2-3, pour les GCB exhumés après 7 ans et soumis à des gradients hydrauliques de 9 et 158.

Tableau 2-3 : Diamètre et densité de fibres aiguilletées (Rowe et al., 2017)

Échantillon	Diamètre moyen des fibres	Densité surfacique de fibres	% de la surface occupée par des fibres	$k_{sat}$ (cm/s)	
				Gradient de 9	Gradient de 158
GCL1	0,7 ± 0,2 mm	114 000 fibres / m <sup>2</sup>	4 %	1,4 × 10 <sup>-8</sup> cm/s	4,1 × 10 <sup>-8</sup> cm/s
GCL2	1,1 ± 0,5 mm	94 000 fibres / m <sup>2</sup>	9 %	5,4 × 10 <sup>-8</sup> cm/s	5,2 × 10 <sup>-7</sup> cm/s
GCL3	1,2 ± 0,2 mm	80 000 fibres / m <sup>2</sup>	9 %	3,8 × 10 <sup>-8</sup> cm/s	7,3 × 10 <sup>-6</sup> cm/s
GCL4	1,6 ± 0,5 mm	67 000 fibres / m <sup>2</sup>	14 %	1,1 × 10 <sup>-8</sup> cm/s	4,9 × 10 <sup>-5</sup> cm/s

## 2.5.2 Facteurs externes ayant une influence à court et moyen terme

### 2.5.2.1 Pression de confinement

Lors de l'hydratation d'un GCB, les forces associées au gonflement de la bentonite s'opposent à celles de l'aiguilletage. L'application d'une pression de confinement sur un GCB vient donc augmenter les forces agissant contre le gonflement. Petrov et Rowe (1997b) et Lake et Rowe (2000) ont étudié l'effet de la pression de confinement sur l'indice des vides et la  $k_{sat}$  d'échantillons de GCB. Leurs travaux ont tout d'abord démontré qu'une augmentation de la pression a pour effet de diminuer l'indice des vides final ainsi que la  $k_{sat}$  de l'échantillon, toute chose étant égales par ailleurs. De plus, le fait d'appliquer la pression de confinement pendant l'hydratation plutôt qu'après une hydratation libre a pour effet de diminuer l'indice des vides final. L'effet sur la  $k_{sat}$  n'est cependant pas aussi clairement défini, avec des variations de  $k_{sat}$  de l'ordre d'un facteur 3. Les principaux résultats obtenus par Petrov et Rowe (1997b) et Lake et Rowe (2000) sont illustrés à la figure 2-18. Des tendances similaires ont également été observées par d'autres auteurs (Bouazza, 2002; Chevrier et al., 2012; Sari & Chai, 2013).

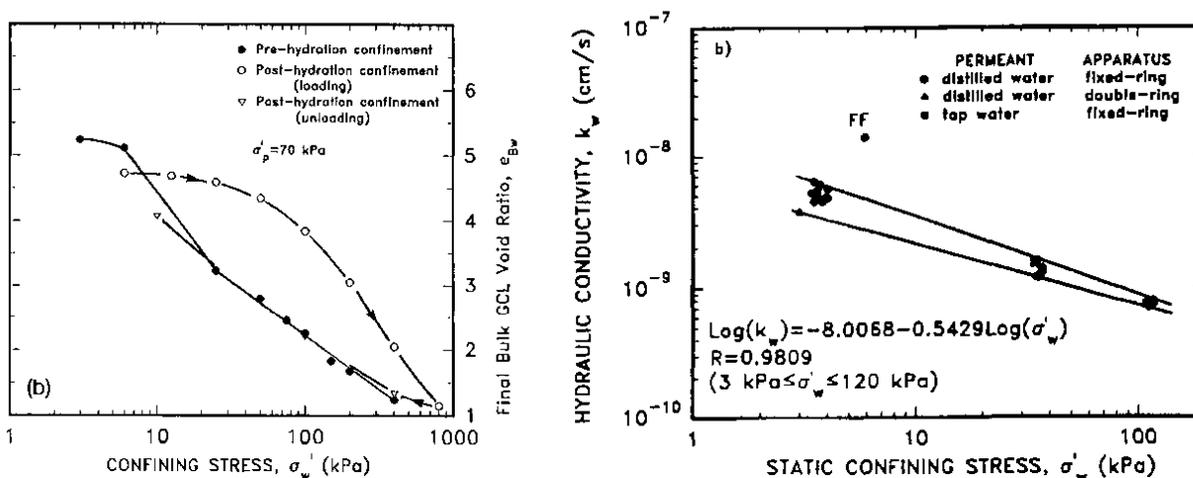


Figure 2-18 – Relations entre la pression de confinement, l'indice des vides apparents et la conductivité hydraulique saturée (Petrov & Rowe, 1997a; Petrov & Rowe, 1997b)

Conzelman et al. (2017) a également réalisé des essais de perméabilité sur des échantillons de GCB avec 2 liquides incompatibles. Dans un premier cas, la norme ASTM D6766 a été suivie tandis que dans le second cas, la contrainte effective moyenne a été maintenue à 27,6 kPa, mais des pressions

de confinement de 0 à 35 kPa (au lieu de 515 à 550 kPa) ont été appliquées. Les valeurs de conductivités hydrauliques saturée des échantillons soumis à de basses pressions se sont avérées de 50 à 100 fois plus élevées que pour les échantillons soumis à de fortes pressions, malgré l'atteinte de degrés de saturation similaires.

La teneur en eau d'un matériau à une succion donnée est reliée, entre autres, à son indice des vides. Il est donc attendu qu'une variation de pression de confinement ait un effet sur la CRE d'un GCB. Les résultats obtenus par Bannour et al. (2014) confirment cet effet, et une diminution de la teneur en eau à saturation ainsi qu'un aplatissement de la CRE sont observés avec l'augmentation de la pression de confinement (figure 2-19).

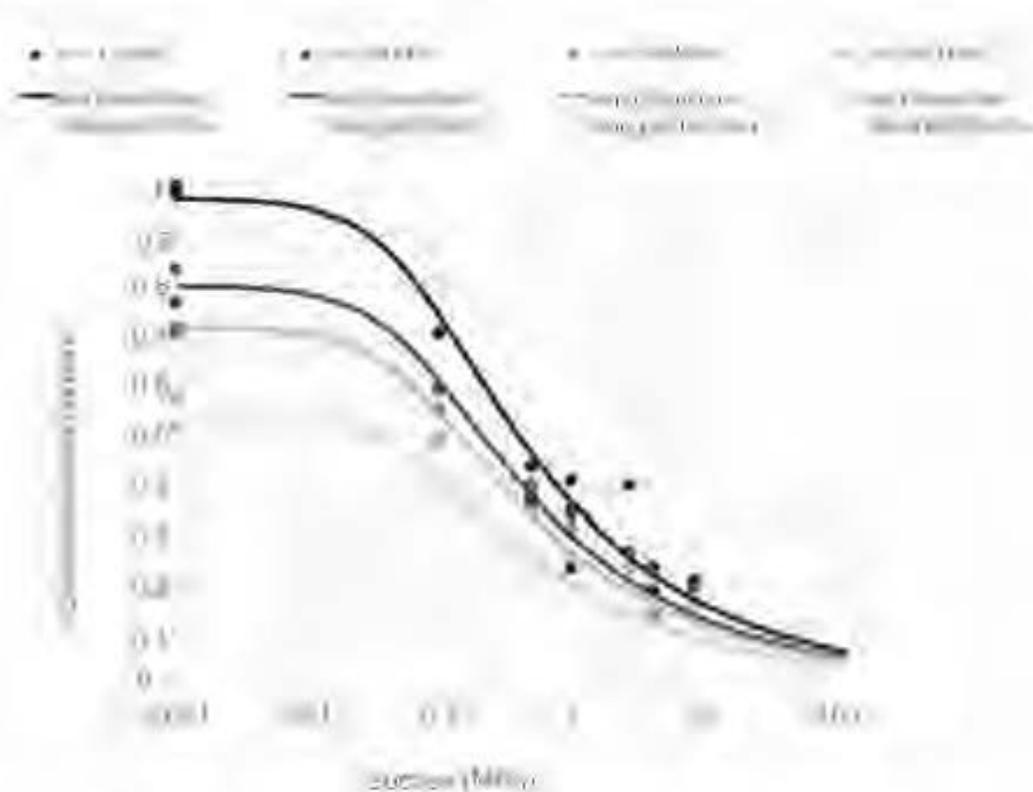


Figure 2-19 : Courbe de rétention d'eau obtenues par séchage, pour diverses pressions de confinement (Touze-Foltz et al., 2016)

La pression de confinement influence également la capacité d'auto-réparation de GCB perforés (Mazzieni & Pasqualini, 2000; Sari & Chai, 2013). Cette dernière a été évaluée en mesurant la permittivité après saturation de la zone trouée du GCB. Mazzeri et Pasqualini (2000) ont réalisés

des essais sur des GCB ayant des perforations de 1 mm et en appliquant des pressions de confinement allant jusqu'à 500 kPa, tandis que Sari et Chai (2013) ont réalisés leurs essais sur des GCB ayant des perforations allant de 0 à 50 mm de diamètre et en appliquant des pressions de confinement de 0 à 200 kPa. Les résultats obtenus indiquent une même tendance, soit une diminution de la conductivité hydraulique ou de la permittivité vis-à-vis l'endroit perforé pour un pression de confinement allant jusqu'à 200 kPa, pour un même diamètre initial de perforation constant. La figure 2-20 présente certains résultats de ces expérimentations.

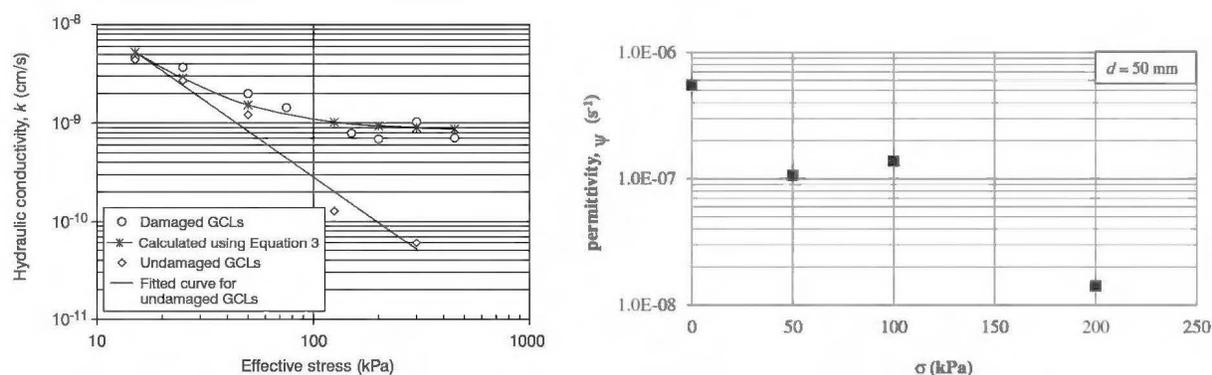


Figure 2-20 : Effets de la pression de confinement sur la conductivité hydraulique pour une perforation a) de 10 mm (Mazzieri & Pasqualini, 2000) et b) de 50 mm de diamètre (Sari & Chai, 2013)

### 2.5.2.2 Protection du GCB

La nature, la granulométrie et le niveau de compaction des matériaux mis en place de part et d'autre d'un GCB peuvent avoir un effet localisé sur son épaisseur (Dickinson & Brachman, 2006; Fox et al., 2000; Shan & Chen, 2003) ou entraîner des perforations. Une diminution de l'épaisseur du GCB correspond à une diminution de la masse surfacique de bentonite à cet endroit (voir section 2.5.1.2), ce qui pourrait entraîner une diminution de l'épaisseur du GCB hydraté et une augmentation locale du débit de percolation de l'eau et de la diffusion d'oxygène au travers du GCB. Toutefois, les essais réalisés en laboratoire par Fox et al. (2000) et Shan et Chen (2003) avec échantillons de GCB placés sous des granulats ayant un diamètre allant jusqu'à 76 mm indiquent que la conductivité hydraulique globale d'un échantillon de GCB est peu affectée par les variations d'épaisseur locales.

Une série d'études réalisées en laboratoire et sur le terrain a pour sa part documenté les conséquences liées au fait de laisser un GCB exposé dans une pente, sans le recouvrir rapidement d'une couche de protection (Ashe et al., 2014, 2015; Rowe et al., 2014; Rowe et al., 2016a; Rowe et al., 2016b). Il a été observé que la bentonite contenue dans le GCB peut migrer vers le bas de la pente après avoir subi plusieurs cycles de mouillage-séchage. La migration de la bentonite peut être assez importante pour résulter en l'absence complète de bentonite à certains endroits.

### 2.5.2.3 Hydratation initiale

La nature du liquide utilisé lors de la première hydratation d'un GCB a un impact significatif sur sa  $k_{sat}$ . Un échantillon ayant une importante hydratation osmotique lors de sa première hydratation pourrait subir une augmentation de  $k_{sat}$  lors d'une perméation subséquente avec un liquide incompatible. Ce  $k_{sat}$  final aurait toutefois tendance à être plus faible que lors d'une hydratation initiale avec le même liquide incompatible (Lin & Benson, 2000). Les résultats de diverses études démontrant ce phénomène sont compilés au tableau 2-4. Il est à noter que ce tableau compare des résultats issus d'une même méthode de réalisation d'essai (même temps d'hydratation et pressions de confinement), mais que les méthodes utilisées varient d'une étude à l'autre.

Tableau 2-4 : Conductivité hydraulique saturée d'échantillons hydratés avec divers liquides

Étude	Liquide hydratant	Liquide perméant	$k_{sat}$ (cm/s)
Petrov et Rowe (1997b)	Eau DI	0,6 mol/l NaCl	$8,0 \times 10^{-8}$ cm/s
	0,6 mol/l NaCl	0,6 mol/l NaCl	$4,0 \times 10^{-7}$ cm/s
	Eau DI	2,0 mol/l NaCl	$4,7 \times 10^{-8}$ cm/s
	2,0 mol/l NaCl	2,0 mol/l NaCl	$1,2 \times 10^{-6}$ cm/s
Shackelford et al. (2000)	Eau DI	6,7 mol/l CaCl <sub>2</sub>	$10^{-8}$ cm/s
	6,7 mol/l CaCl <sub>2</sub>	Eau DI	$10^{-6}$ cm/s
	Eau DI	pH 8,7 et 330 mg/l	$7 \times 10^{-9}$ cm/s
	pH 8,7 et 330 mg/l	pH 8,7 et 330 mg/l	$9 \times 10^{-6}$ cm/s
Shan et Lai (2002)	Eau dure	Eau dure	$4,4 \times 10^{-9}$ cm/s
	Eau dure	Eau de mer	$2,3 \times 10^{-8}$ cm/s
	Eau de mer	Eau de mer	$1,7 \times 10^{-5}$ cm/s
Shackelford et al. (2010)	Eau souterraine	Eau souterraine	$1,7 \times 10^{-9}$ cm/s
	Eau souterraine	DMAS	$7,9 \times 10^{-7}$ cm/s
	DMAS	DMAS	$3,9 \times 10^{-6}$ cm/s

Sur le terrain, un GCB s'hydratera à partir de l'eau interstitielle contenue dans les sols installés de part et d'autre. Un GCB s'hydratant à partir de l'eau contenue dans des sols en contact avec des sols naturels aura tendance à échanger ses cations  $\text{Na}^+$  avec des cations divalents tels que le  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , ces derniers se trouvant généralement en plus grande proportion dans les sols naturels. Par exemple, Rowe et al. (2017) ont exhumé des GCB ayant été exposés aux intempéries pendant 5 et 7 ans et ont vu le pourcentage de cations échangeable passer de plus de 60% à 0% pour le  $\text{Na}^+$ , et d'un peu moins de 25% à plus de 70% pour le  $\text{Ca}^{2+}$ . Des échanges du même ordre de grandeur ont également été rapportés par Egloffstein (2001), Meer et Benson (2007) et Scalia et Benson (2011). La figure 2-21 illustre l'évolution dans le temps de la distribution des cations d'un GCB sur un lieu d'enfouissement en Allemagne. Comme la figure l'indique, les échanges se sont produits sur une période de plus d'un an avant de se stabiliser, ce qui est similaire aux résultats obtenus par Bradshaw et al. (2013). La vitesse et le niveau d'échange cationique auront tendance à augmenter lorsque le GCB est adjacent à un sol ayant une humidité élevée (Scalia et Benson, 2011).

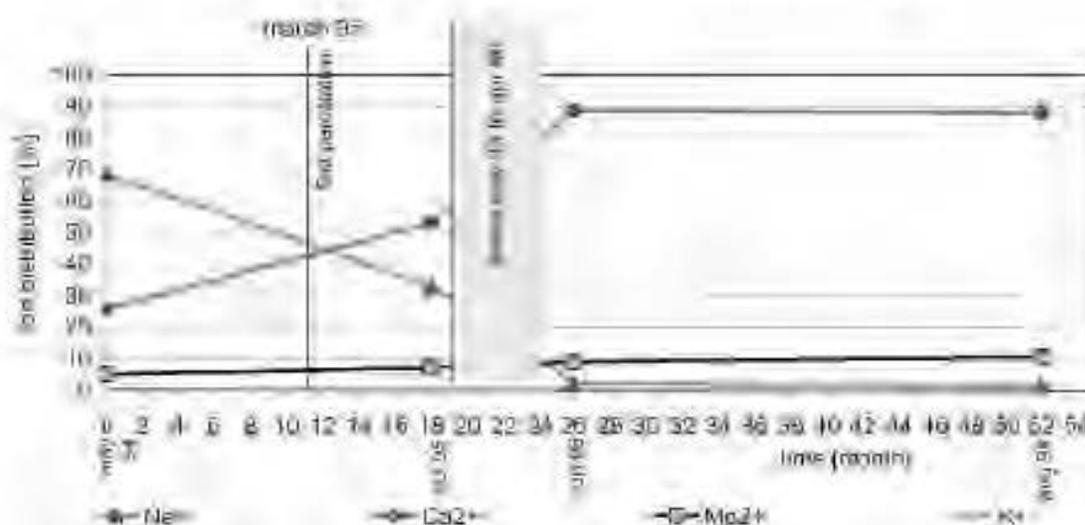


Figure 2-21 : Évolution de la distribution des cations d'un GCB (Egloffstein, 2001)

À moins de ne se trouver dans un contexte géologique particulier, la charge ionique des eaux en contact avec les sols naturels est généralement faible (2-3 mM). Les essais de conductivité hydraulique réalisés sur des GCB sodiques ayant subi des échanges cationiques soit sur le terrain, soit en laboratoire, avec des solutions ayant la force ionique de l'eau interstitielle typiquement contenue dans les sols naturels, ont généralement conduit à des valeurs de conductivités

hydrauliques similaires à celles d'un GCB sodique hydraté à l'eau dure (Rowe et al., 2017) ou déionisée (Bradshaw et al., 2013).

De nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de l'hydratation et/ou de la perméation de GCB avec des liquides fortement incompatibles. Les tableaux 2-5 à 2-7 ont été extraits de deux études ayant grandement contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine, soit Jo et al. (2001), où les effets des cations monovalents, divalents, trivalents et du pH sur la conductivité hydraulique a été étudié, et Kolstad et al. (2004) qui a étudié l'influence des liquides inorganiques contenant un mélange de plusieurs espèces de cations sur la  $k_{sat}$ . Dans ces deux études, les essais de perméabilité ont été réalisés directement avec le liquide perméant, sans préhydratation à l'eau déionisée. Dans un contexte de recouvrement minier, un GCB pourrait également être hydraté à partir d'un liquide incompatible si le matériau est posé directement sur des résidus miniers, ou si les fluctuations saisonnières de la nappe phréatique entraînent un contact entre l'eau des résidus miniers et le GCB.

Un GCB hydraté avec un liquide incompatible aura un gonflement moindre que s'il était hydraté avec de l'eau DI. La capacité de la bentonite à réparer les fissures ou perforations sera alors affectée (Egloffstein, 2001). Une diminution de la limite de liquidité de la bentonite a également été observée lors d'une hydratation avec un liquide ayant des concentrations de 1000 ppm en Cu, Zn ou Pb (Dutta, 2016). La limite de liquidité est alors passée de plus de 500 % à 300%.

Tableau 2-5 : Conductivités hydrauliques de GCB hydratés et perméés avec diverses solutions inorganiques (Jo et al., 2001)

Permeant liquid	Hydraulic Conductivity [(cm/s) M]				
	1 M	0.1 M	0.025 M	0.01M	0.005 M
LiCl	$8.5 \times 10^{-7}$	$8.3 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-8}$	—	—
LiCl	$9.5 \times 10^{-8}$	$8.3 \times 10^{-8}$	—	—	—
NaCl	$7.9 \times 10^{-7}$	$6.6 \times 10^{-8}$	—	—	—
KCl	$8.3 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-7}$	—	—	—
CaCl <sub>2</sub>	$8.7 \times 10^{-7}$	$6.3 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-7}$
CaCl <sub>2</sub>	$7.4 \times 10^{-7}$	$6.3 \times 10^{-7}$	—	—	—
MgCl <sub>2</sub>	$2.1 \times 10^{-7}$	$7.0 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$
MgCl <sub>2</sub>	$9.7 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-7}$	—	—	—
ZnCl <sub>2</sub>	$8.0 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$4.2 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-7}$
ZnCl <sub>2</sub>	$7.0 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$	—	—	—
CuCl <sub>2</sub>	$6.5 \times 10^{-7}$	$7.6 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-7}$
CuCl <sub>2</sub>	$6.9 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-7}$	—	—	—
LiCl	—	$1.1 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$	—
DI water	$1.5 \times 10^{-7}$ – $9.1 \times 10^{-8}$				

Tableau 2-6 : Conductivités hydrauliques de GCB hydratés et perméés avec des solutions inorganiques à divers pH (Jo et al., 2001)

pH	Hydraulic Conductivity (cm/s)		
	DI water	0.01 M CaCl <sub>2</sub>	0.025 M CaCl <sub>2</sub>
1.0	$1.5 \times 10^{-7}$	—	—
2.0	$3.0 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-7}$
2.0	$1.2 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-7}$
4.0	$1.3 \times 10^{-7}$	—	—
5.4	—	—	$2.6 \times 10^{-7}$
5.6	—	$1.2 \times 10^{-7}$	—
6.5	$1.5 \times 10^{-7}$	—	—
6.5	$9.1 \times 10^{-8}$	—	—
12.0	$1.1 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-7}$
13.0	$2.2 \times 10^{-7}$	—	—

Tableau 2-7 : Conductivités hydrauliques de GCB hydratés et perméés avec des solutions inorganiques multi-espèces à diverses concentrations

bore strength (M)	RSD (mM <sup>2</sup> )	Hydraulic conductivity (cm/s)		
		Li-Cy solutions	Fe-Mg solutions	Li-Fe-Ca-Mg solutions
0.05	0.03	$3.6 \times 10^{-10}$	—	—
	0.43	$1.1 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-10}$	—
	0.20	$3.6 \times 10^{-10}$	—	—
	0.00	$9.2 \times 10^{-10}$	—	—
0.1	1.02	$2.4 \times 10^{-9}$	$8.9 \times 10^{-10}$	—
	1.12	$2.3 \times 10^{-9}$	—	$4.8 \times 10^{-10}$
	0.88	$8.3 \times 10^{-10}$	—	—
	0.82	$7.2 \times 10^{-10}$	$6.5 \times 10^{-10}$	—
	0.78	$9.5 \times 10^{-10}$	—	—
	0.16	$9.1 \times 10^{-10}$	—	$2.1 \times 10^{-10}$
	0.08	$1.1 \times 10^{-9}$	$8.5 \times 10^{-10}$	—
	0.00	$1.1 \times 10^{-9}$	—	—
0.3	1.87	$2.8 \times 10^{-9}$	—	—
	0.89	$2.5 \times 10^{-9}$	$3.6 \times 10^{-10}$	—
	0.40	$4.0 \times 10^{-9}$	—	$5.3 \times 10^{-10}$
	0.00	$1.0 \times 10^{-9}$	—	—
0.5	1.02	$2.4 \times 10^{-9}$	—	$9.1 \times 10^{-10}$
	1.24	$8.5 \times 10^{-10}$	$4.2 \times 10^{-10}$	—
	0.48	$3.0 \times 10^{-9}$	—	$8.5 \times 10^{-10}$
	0.00	$1.0 \times 10^{-9}$	—	—

Note: Hydraulic conductivity to distilled water =  $9.0 \times 10^{-10}$  cm/s; RSD = Relative standard deviation of measurement and divided z-axis.

## 2.5.3 Facteurs externes ayant une influence à long terme

### 2.5.3.1 Cycles de gel et dégel

Lors du gel de pâtes et de gels de bentonite et de montmorillonite, des changements de structure commencent à apparaître lors de la formation de cristaux de glace. L'eau contenue entre les feuillets d'argile a alors tendance à migrer vers ces cristaux qui grossissent (Anderson & Hoekstra, 1965; Norrish & Rausell-Colom, 1962; Svensson & Hansen, 2010). Il en résulte une diminution de l'eau

adsorbée sur les feuillets d'argile et une structure alvéolée, telles que représentées à la figure 2-22 (Norrish & Rausell-Colom, 1962). Lors du dégel, la structure initiale de l'argile est restaurée. Anderson et Hoekstra (1965) ont étudiés la variation de l'espacement basal des feuillets ( $d_{001}$ ) lors du gel et dégel de gels et de pâtes de bentonite homoionique (Li, K, Na ou Ca) préparés avec de l'eau déionisée, à l'aide d'un diffractomètre à rayon X (radiation  $K\alpha$  du cuivre). La contraction des feuillets dus à la nucléation de la glace a été observé à des températures d'environ  $-5^{\circ}\text{C}$  (Anderson & Hoekstra, 1965). Lors du dégel, l'espacement des feuillets était restauré à partir d'une température d'environ  $0^{\circ}\text{C}$  (Anderson & Hoekstra, 1965). La variation de l'espacement basal des feuillets de bentonite sodique en fonction de la température obtenu au DRX par Anderson et Hoekstra (1965) est illustré à la figure 2-23. Il est à noter que dans cette étude, la variation de l'espacement basal de la pâte de bentonite calcique était d'environ  $3A$ , comparativement à une variation de près de  $20A$  pour la pâte de bentonite sodique.

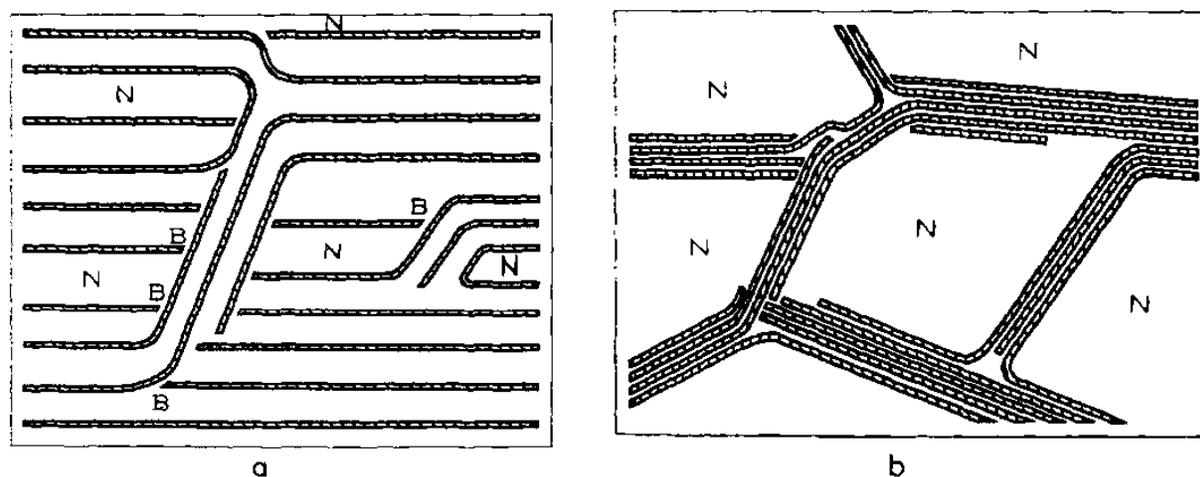


Figure 2-22 : Représentation schématique des changements structuraux dans l'argile dus à la migration de l'eau pendant le gel (N : noyau de glace) : a) avant le gel; b) après le gel (Norrish & Rausell-Colom, 1962)

Des essais réalisés en laboratoire et sur le terrain ont indiqué que l'exposition à des cycles de gel-dégel d'un GCB hydraté avec de l'eau très faiblement chargée en cations n'a pas d'effet sur sa  $k_{\text{sat}}$  (Kraus et al., 1997; Podgorney & Bennett, 2006). En fait, une légère diminution de  $k_{\text{sat}}$  a même été observée après un premier cycle de gel-dégel. Le maintien d'une faible  $k_{\text{sat}}$  a été expliquée par la fermeture des fissures créées par le gel grâce au gonflement de la bentonite lors du dégel (Eigenbrod, 2003b).

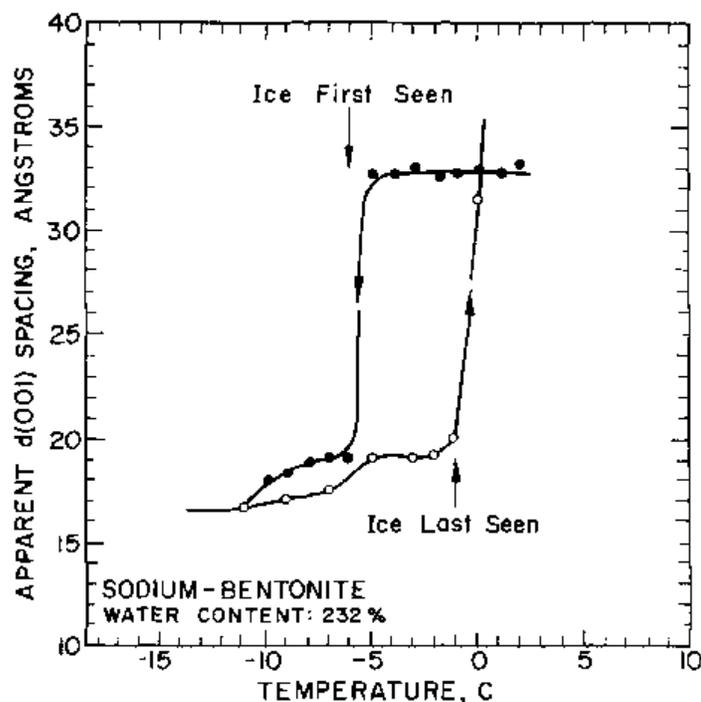


Figure 2-23 Évolution de l'espacement basal du réseau cristallin de la bentonite sodique pendant un cycle de gel-dégel (Anderson & Hoekstra, 1965)

La baisse de  $k_{sat}$  parfois observée après le premier cycle a pour sa part été attribuée à un réarrangement et une consolidation de la bentonite lors de la phase de dégel (Kraus et al., 1997; Podgorney & Bennett, 2006).

Finalement, une étude préliminaire a été menée par St-Laurent et Chevé (2015), dans laquelle des échantillons de GCB hydratés avec de l'eau souterraine légèrement acide et charg e en métaux dissous ont été exposés à 1, 4 et 10 cycles de gel-dégel. La  $k_{sat}$  de l'échantillon soumis à 4 cycles de gel-dégel a augment e d'un facteur 400, tandis que celle de l'échantillon soumis à 10 cycles de gel-dégel n'a subi aucune augmentation. La raison de cette différence n'a pu être expliqu e sur la base des résultats disponibles.

### 2.5.3.2 Cycles de mouillage et séchage

Depuis le début des années 1990, de nombreuses expérimentations en laboratoire et sur le terrain ont été réalisées sur des GCB afin d'évaluer leur comportement lorsque soumis à des cycles de mouillage-séchage, et les impacts sur la performance en découlant. Shan et Daniel (1991) ainsi que Boardman et Daniel (1997) ont réalisé des essais de mouillage-séchage avec de l'eau d'aqueduc. Dans les deux cas, des fissures de dessiccation se sont formées lors du séchage, mais ces dernières se sont refermées après le cycle de mouillage. La  $k_{sat}$  de  $10^{-9}$  cm/s est demeurée inchangée avant et après l'essai. Les études portant sur les effets combinés de l'échange cationique et des cycles de mouillage et séchage sur la conductivité hydraulique des GCB (Benson & Meer, 2009; Bouazza, Vangpaisal, et al., 2006; Egloffstein, 2001; Lin & Benson, 2000; Meer & Benson, 2007) ont pour leur part démontré une diminution de la capacité d'auto-réparation des fissures de dessiccation induites par le séchage d'un GCB, au fil de la perméation de ce GCB avec un liquide incompatible. Benson et Meer (2009) ont indiqué que dans le cadre de leurs expérimentations que le RMD contrôlait la capacité de gonflement finale de la bentonite et la conductivité hydraulique finale du GCB à la suite de 5 et 9 cycles, tandis que la  $I$  affectait la vitesse à laquelle les changements de propriété se produisaient.

La géométrie des fissures développées lors du séchage a un effet sur la perméabilité à l'eau et à l'air des GCB. Tant que la bentonite séchée n'a pas adsorbé suffisamment d'eau pour se gonfler, se plastifier et refermer les fissures en place, une augmentation du débit d'eau et d'air s'écoulant au travers du GCB peut être attendues. Toutefois, la réparation d'un réseau de nombreuses fissures fines devrait induire une augmentation de débit plus faible que pour un réseau de quelques larges fissures (Egloffstein, 2001, Bouazza et al., 2007).

### 2.5.3.3 Cycles combinés de gel-dégel et mouillage-séchage

Une étude préliminaire sur les effets combinés des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage a été réalisée par St-Laurent et Chevé (2015) afin de déterminer le  $k_{sat}$  obtenu à la suite de la combinaison de ces phénomènes. Trois lixivats ont été utilisés dans le cadre de cette étude, soit de l'eau déionisée, de l'eau de pluie synthétique, et de l'eau souterraine contamin e en métaux issue d'un site minier. Les essais ont été réalisés pour 1, 4 et 10 cycles et les résultats obtenus sont présentés à la figure 2-24.

Les résultats obtenus pour les cycles combinés de gel-dégel et de mouillage-séchage avec hydratation à l'eau souterraine ont indiqué des augmentations de  $k_{sat}$  d'un facteur 5 après 4 cycles, et d'un facteur 2000 après 10 cycles combinés. Ces augmentations étaient toutefois respectivement 100 fois et 2 fois inférieures à celles obtenues pour l'exposition à des cycles de mouillage-séchage uniquement. La cause des différences de  $k_{sat}$  obtenues pour les divers essais n'a cependant pas pu être identifiée avec la quantité limitée de résultats disponibles.

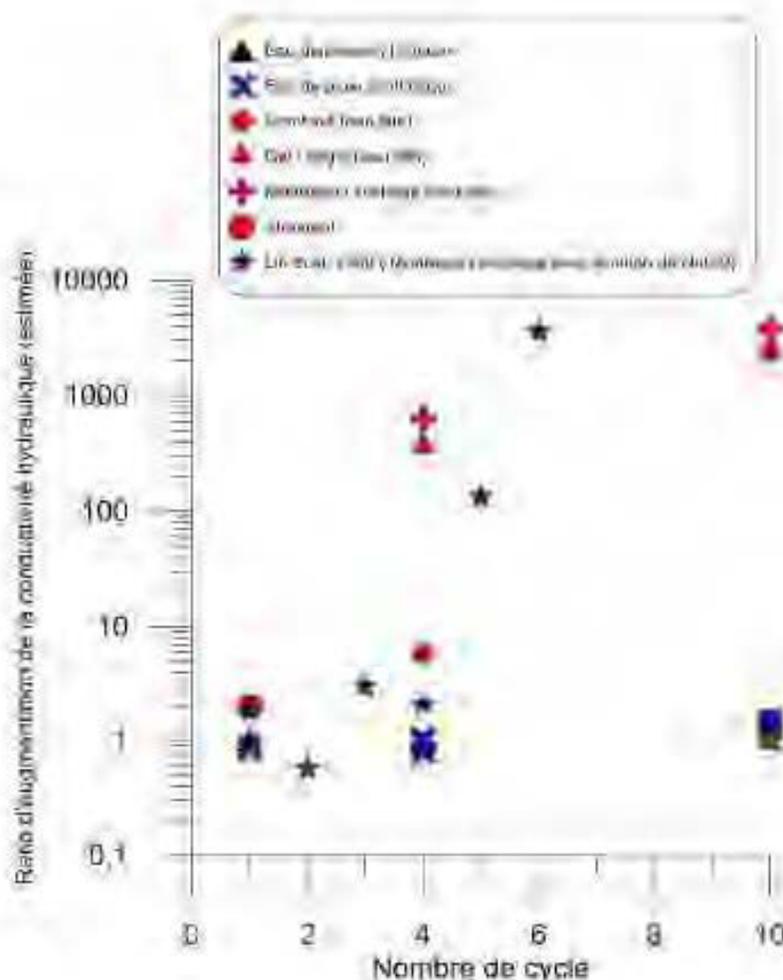


Figure 2-24 : Variation de conductivité hydraulique saturée en fonction du nombre de cycles (Si-Laurent et al., 2015)

## 2.6 Besoins en recherche

Le GCB est un matériau de plus en plus considéré comme couche de faible  $k_{sat}$  au sein de recouvrement miniers multicouches. Bien que le matériau ait démontré son efficacité comme barrière aux liquides dans le domaine de l'enfouissement municipal, l'utilisation de GCB comme recouvrement minier vient pousser l'utilisation du matériau au-delà de ses limites bien documentées et testées (Bouazza, 2018; Hornsey et al., 2010).

La revue de littérature a permis d'identifier trois principaux besoins en recherche qui permettraient d'évaluer la capacité du matériau à agir comme barrière aux fluides au-dessus de résidus miniers PGA :

- Évaluer les propriétés hydriques de GCB en contact avec du DMA représentatif de celui retrouvé dans plusieurs mines du Québec exploitant des gisements de sulfures massifs, soit ayant un pH faible et de fortes concentrations en fer et en sulfates.
- Déterminer l'influence des cycles de gel et dégel sur la  $k_{sat}$  de GCB hydratés avec du DMA.
- Déterminer l'influence d'une hydratation au DMA sur les propriétés diffusives d'un GCB ayant un degré de saturation élevé.

Le présent mémoire vise à combler en partie ces besoins en recherche, en mettant l'accent sur les travaux à l'échelle du laboratoire.

## CHAPITRE 3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

L'objectif du présent projet de recherche est d'évaluer en laboratoire la performance d'un GCB comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement de rejets miniers générateurs d'acide. De manière plus spécifique, les propriétés hydrauliques et diffusives à l'oxygène d'un GCB non tissé et renforcé (SRNW) sont étudiées. Pour ce faire le projet a été divisé en deux volets : la caractérisation en laboratoire du GCB utilisé et plus particulièrement, de la bentonite qu'il contient, puis l'étude en laboratoire des propriétés hydrauliques et diffusives à l'oxygène d'échantillons de GCB hydratés à l'eau ou au drainage minier acide (DMA).

Dans les sections qui suivent, les méthodes utilisées pour caractériser les matériaux utilisés lors des expérimentations seront décrits, ainsi que les méthodes employées pour réaliser les essais permettant de répondre aux objectifs du projet.

### 3.1 Caractérisation des échantillons solides

#### 3.1.1 Provenance des échantillons

Les échantillons solides utilisés proviennent tous du même rouleau de GCB non tissé et renforcé (SRNW). Ce rouleau de 4,7 m x 45,7 m a été expédié sur un site minier situé en Abitibi-Témiscamingue (Québec, Canada) dans le cadre de travaux de recouvrement de cellules expérimentales contenant des résidus miniers générateurs d'acide. Un morceau d'environ 3 m de longueur a été prélevé du rouleau lors du recouvrement des cellules, en octobre 2016, afin d'être acheminé à l'UQAT. Ce morceau a par la suite été découpé en morceaux d'au moins 45 cm x 45 cm qui ont été entreposés au laboratoire, à plat.

#### 3.1.2 Préparation des échantillons

Trois types d'échantillons solides ont été préparés dans le cadre du projet de recherche, soit des échantillons de GCB, de bentonite et de géotextiles.

Les échantillons de GCB ont été préparés selon les méthodes décrites dans les normes ASTM 5887 (ASTM, 2016c) *Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter* ou ASTM (ASTM, 2012b) *Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially*

*Incompatible Aqueous Solutions.* Des échantillons de GCB de  $100 \pm 2$  mm de diamètre ont été taillés à l'aide d'un couteau de précision au centre des morceaux d'au moins 45 cm X 45 cm. Le géotextile du haut a tout d'abord été coupé en suivant un gabarit circulaire de coupe. De l'eau déionisée (DI) ou du drainage minier acide synthétique (DMAS) a ensuite été appliqué dans la ligne de coupe du géotextile supérieure afin d'humidifier la bentonite et ainsi éviter les pertes lors du découpage. Après un temps de repos d'au moins 3 à 5 minutes, la préparation de l'échantillon circulaire de GCB a été complété en découpant la bentonite et le géotextile inférieur. Quatre mesures de diamètre et 8 mesures d'épaisseur ont été prises sur chaque échantillon ainsi obtenu.

Les échantillons de bentonite sèche ont été obtenus de deux manières différentes. La bentonite perdue lors du découpage de l'échantillon sec de 4,7 m x 3 m de longueur en morceaux d'au moins 45 cm x 45 cm a été récupérée et l'échantillon composite ainsi obtenu a été homogénéisé. Les essais de caractérisation de l'état initial du matériau ont été réalisés à partir de cet échantillon, nommé ci-après « Bnt-Ref ». Pour ce qui a trait à la caractérisation de la bentonite à la suite d'essais de perméabilité, les échantillons de GCB humides ont tout d'abord été séchés à l'étuve, à 65°C ou 110°C. Une température de 65°C a été utilisée pour les échantillons sur lesquels des analyses minéralogiques devaient être réalisées, tandis que tous les autres échantillons ont été séchés à une température de 110°C. Les géotextiles situés de part et d'autre des échantillons séchés ont ensuite été retirés et la bentonite restante a été écrasée jusqu'à l'obtention de particules d'environ 1 mm et moins. Lorsque discernables, les fils d'aiguilletage situés au travers de la bentonite ont été retirés de l'échantillon.

Les échantillons de géotextiles ayant fait l'objet d'analyses ont été obtenus en suivant le même protocole que pour les échantillons de GCB secs taillés dans un échantillon de 45 cm x 45 cm, sans toutefois humidifier le pourtour de ces derniers. L'échantillon de GCB a ensuite été secoué afin de le vider de son contenu en bentonite, puis coupé en son centre, au niveau de l'aiguilletage. Chaque géotextile a finalement été nettoyé à l'aide d'un pinceau sec puis à l'air comprimé, afin d'enlever un maximum de bentonite pouvant s'y loger. Seuls des essais de caractérisation physique de l'état initial ont été réalisés sur les échantillons de géotextiles constituant le GCB.

### 3.1.3 Masse surfacique de bentonite sèche

La masse surfacique de la bentonite contenue dans les échantillons de GCB a été évaluée en se basant sur la norme *ASTM D5993 Standard Test Method for Measuring Mass Per Unit of Geosynthetic Clay Liners* (ASTM, 2014b). La masse surfacique a été obtenue en soustrayant la masse surfacique des géotextiles de la masse surfacique des échantillons de GCB secs. Toutefois, la masse surfacique des géotextiles mesurée en laboratoire a été utilisée pour le calcul de la masse de bentonite sèche, plutôt que la masse surfacique nominale.

La masse surfacique des échantillons de GCB secs a été estimée à partir de 5 échantillons de 100 mm de diamètre. Des valeurs allant de 5554 à 5800 g/m<sup>2</sup> ont été obtenues, avec une valeur moyenne de 5700 kg/m<sup>2</sup>.

La masse surfacique des 2 géotextiles (et des fibres d'aiguilletage, considérant la méthode de préparation décrite à la section 3.1.2) a été calculée à partir de 3 échantillons de 75 à 100 mm de diamètre. Des valeurs allant de 497 à 506 g/m<sup>2</sup> ont été obtenues, avec une valeur moyenne de 502 g/m<sup>2</sup>.

La masse surfacique de bentonite sèche a été estimée à partir des 5 échantillons utilisés pour le calcul de la masse surfacique des GCB. Considérant les masses surfaciques des GCB et des géotextiles précédents, la masse surfacique de bentonite sèche varie de 5047 à 5302 g/m<sup>2</sup>, avec une valeur moyenne de 5195 g/m<sup>2</sup>.

Il est à noter que la fiche technique du GCB TM600 SRNW indique des valeurs de 200 g/m<sup>2</sup> pour le géotextile tissé et non-tissé renforcé, donc de 400 g/m<sup>2</sup> pour la combinaison des 2 géotextiles, et une masse surfacique de bentonite sèche de 4100 g/m<sup>2</sup>.

### 3.1.4 Teneur en eau initiale

Les méthodes de calcul de la teneur en eau initiale ont été présentées à la section 2.2.4. Dans le cadre de la présente étude, la teneur en eau initiale de la bentonite ( $\omega_{i-bento}$ ) a été calculée en se basant sur la norme *ASTM D2216 (ASTM, 2010a)*. Cette méthode a été privilégiée à celle décrite à la méthode *ASTM D5993 (ASTM, 2014b)* puisqu'elle utilise des masses directement mesurées sur un échantillon plutôt que des masse surfaciques obtenues par mesures indirectes. L'équation 3-1 a été utilisée :

$$\omega_{initiale} = \frac{M_{i-ben} - M_{s-bento}}{M_{s-ben}} * 100\% \quad (3-1)$$

où  $M_{i-bento}$  est la masse de la bentonite, à l'air ambiant du laboratoire

$M_{s-bento}$  est la masse de la bentonite séchée à l'étuve, à 110°C.

La teneur en eau initiale a été évaluée sur 3 sous-échantillons de bentonite provenant de Bnt-Ref. Les valeurs obtenues variaient de 6,1 % à 7,6 %, avec une valeur moyenne de 7,1 %, ce qui correspond à la limite inférieure des valeurs retrouvées dans la littérature (section 2.2.4).

### 3.1.5 Densités relatives ( $G_s$ )

La densité relative ( $G_s$ ) de la bentonite a été évaluée par un laboratoire externe (SGS Canada) à l'aide d'un pycnomètre à gaz. Le  $G_s$  des 2 échantillons analysés était de 2,51. Le  $G_s$  des géotextiles a également été mesuré à l'aide d'un pycnomètre à gaz, aux laboratoires de l'UQAT (UltraPic 1200e de Quantachrome instruments, précision de 0,045 %), en suivant la méthode ASTM D5550 *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer* (ASTM, 2014a). Les valeurs obtenues étaient de 0,973 et 0,962.

La densité relative du GCB a été calculée à partir des densités relatives de la bentonite et des géotextiles ainsi que de la masse surfacique moyenne des géotextiles ( $M_{s\_geotex}$ ) et de la masse sèche d'échantillons de GCB ( $M_{dry\_GCB}$ ), selon la formule 3-2 :

$$G_{s\_GCB} = \frac{M_{s\_GCB}}{V_{s\_geotex} + V_{s\_bento}} = \frac{M_{s\_GCB}}{\frac{A_{GCB} * m_{geotex}}{G_{s\_geotex}} + \frac{M_{s\_GCB} - A_{GCB} * m_{geotex}}{G_{s\_bento}}} \quad (3-2)$$

où  $G_{s\_GCB}$  est la densité relative du GCB

$M_{s\_GCB}$  est la masse sèche d'un échantillon de GCB

$V_{s\_geotex}$  est le volume des grains solides de géotextiles

$V_{s\_bento}$  est le volume des grains solides de bentonite

$A_{GCB}$  est l'aire de l'échantillon de GCB

$m_{geotex}$  est la masse surfacique moyenne des géotextiles (502 g/cm<sup>2</sup>)

$G_{s\_geotex}$  est la densité relative moyenne des géotextiles (0,97)

$G_{s\_bento}$  est la densité relative de la bentonite (2,51)

La densité relative du GCB a été estimée à partir de 5 échantillons et a mené à des valeurs variant de 2,19 à 2,21, avec une valeur moyenne de 2,20.

### 3.1.6 Analyse granulométrique de la bentonite

La granulométrie apparente de la bentonite a été déterminée à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser (Mastersizer S de Malvern Panalytical, United Kingdom). Cet appareil peut être utilisé pour des particules de 0,05  $\mu\text{m}$  à 900  $\mu\text{m}$  et les résultats obtenus ont une précision de  $\pm 2\%$ . Le fonctionnement du granulomètre repose sur le fait que lorsqu'un faisceau laser rencontre une particule, l'angle de l'onde diffusée est grand pour une petite particule et petit pour une grosse particule. En connaissant les propriétés optiques du milieu dispersant et en utilisant une approche itérative afin de déterminer les propriétés optiques des particules contenues dans ce milieu, il est alors possible de calculer la distribution granulométrique volumique des particules sur la base d'un modèle sphérique équivalent (Malvern Panalytical, 2019; Merkus, 2009). Le liquide utilisé comme milieu dispersant ne doit permettre ni la dissolution, ni le gonflement du matériau analysé (HORIBA Instruments, 2013). Puisque la bentonite a tendance à gonfler dans l'eau, les analyses granulométriques ont été réalisées dans l'isopropanol (Boulanger-Martel, 2015; Taylor-Lange et al., 2015).

Les essais ont été réalisés sur 2 échantillons intacts de granulats de bentonite (Bnt-Ref-01 et Bnt-Ref-02, non désagglomérée), et les résultats obtenus sont illustrés à la figure 3-1 et détaillés à l'annexe B. La taille des granulats de bentonite est majoritairement comprise entre 75  $\mu\text{m}$  et 475  $\mu\text{m}$ , ce qui équivaut à un sable fin selon la norme ASTM D2487 (ASTM, 2017) et une classification de bentonite à granulats fins par le fait même. Les résultats obtenus sont similaires à ceux d'échantillons de bentonite à granulats fins présentés par Shackelford et al. (2000) et Rowe et al. (2011) (illustrés à la figure 3-1).

### 3.1.7 Limites d'Atterberg de la bentonite

Les limites d'Atterberg ont été déterminées en suivant la norme CAN/BNQ 2501-092/2006 *Détermination de la limite de liquidité à l'aide du pénétromètre à cône et de la limite de plasticité* (BNQ, 2006). La limite de liquidité ( $\omega_l$ ) a été déterminée en utilisant la méthode à plusieurs points. Pour ce faire, la pénétration d'un cône d'une hauteur d'au moins 20 mm, pesant 60 g et dont la tête

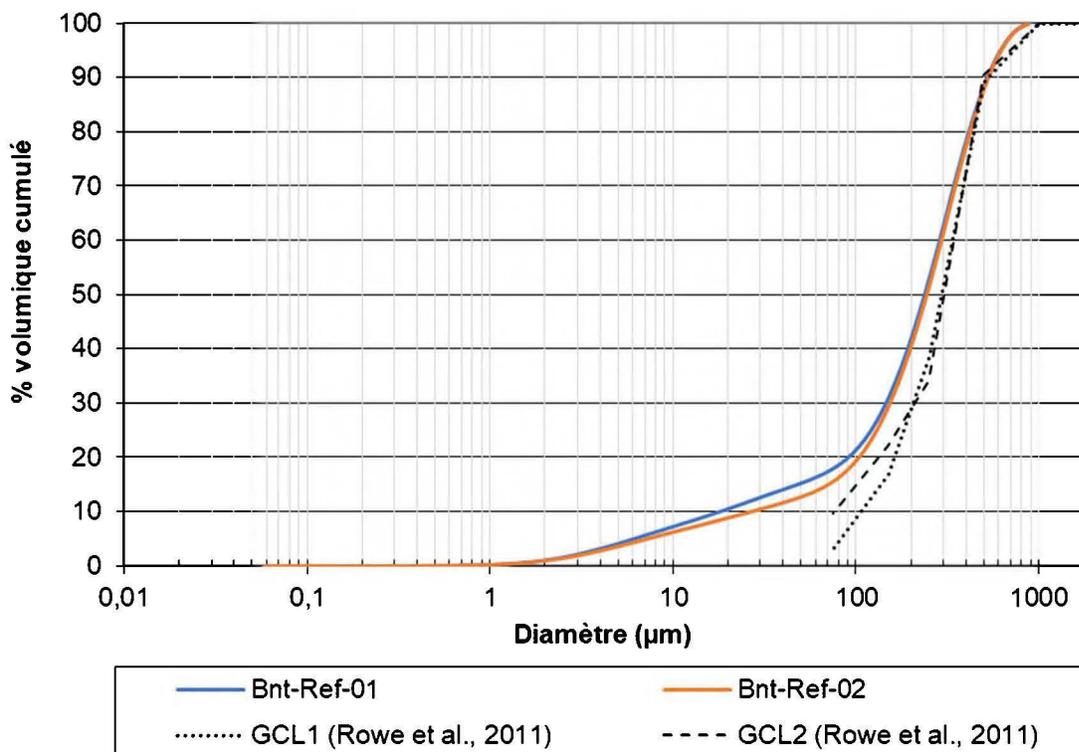


Figure 3-1 : Granulométrie apparente d'échantillons de bentonite

forme un angle de  $60^\circ$  a été mesurée dans des échantillons de bentonite mis en place dans un moule semi-sphérique. Les teneurs en eau correspondant à un certain enfoncement moyen ont été calculées, puis la relation teneur en eau versus enfoncement moyen a été tracée sur un graphique pour les enfoncements compris entre 7 mm et 15 mm. La limite de liquidité est la valeur de teneur en eau correspondant à une pénétration de 10 mm selon la droite de régression obtenue. La limite de plasticité ( $\omega_p$ ) a pour sa part été obtenue en évaluant la teneur en eau à laquelle un rouleau de matériau de 3 mm de diamètre se brise en morceaux de 3 à 10 mm de longueur. L'indice de plasticité ( $I_p$ ) se calcule en soustrayant la limite de plasticité de la limite de liquidité.

Les  $\omega_l$  et  $\omega_p$  de la bentonite ont été évaluées pour une hydratation avec de l'eau DI pour 2 échantillons, et les valeurs obtenues sont une  $\omega_l$  de 433% et une  $\omega_p$  de 35%, ce qui correspond à un  $I_p$  de 398%. Les résultats détaillés sont insérés à l'annexe B.

### 3.1.8 Analyses élémentaires de la bentonite

Les principaux éléments chimiques constituant la bentonite comprise dans le GCB a l'étude ont été déterminés par spectrométrie d'émission atomique au plasma à couplage inductif (ICP-AES) et par fluorescence au rayon X (XRF). Les échantillons ont préalablement été pulvérisés à l'aide d'un broyeur planétaire (PULVERISETTE 5 de FRITSCH, Allemagne).

Pour les analyses à l'ICP-AES (Skoog et al., 2017), les échantillons ont d'abord été digérés au four à micro-ondes avec du HNO<sub>3</sub>, du Br<sub>2</sub>, du HF et du HCl. Les échantillons ont ensuite été analysés avec un appareil Perkin Elmer Optima 3100 RL pour 22 éléments : Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, S, Si, Ti et Zn. La précision des mesures obtenues est d'environ 10% pour tous les éléments analysés, à part le K dont la précision est estimée à 15% (CEAEQ, 2018).

Les analyses XRF (Skoog et al., 2017) ont été réalisées par un laboratoire externe (SGS Canada). Les échantillons ont été dissous dans des sels de borate puis moulés en un disque de verre afin d'être analysé. Les concentrations, exprimées en pourcentage d'oxyde, ont été obtenues pour 12 éléments : Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Ti et V. La perte au feu (LOI) a également été évaluée. La précision des résultats obtenus dépend du pourcentage massique et de l'oxyde analysé (SGS Canada, communication personnelle, 18 décembre 2018). Elle varie généralement entre 2% et 5% pour des pourcentages d'oxyde de 1% et plus.

Les principaux résultats d'analyse élémentaire sont présentés au tableau 3-1, en mg/kg. L'échantillon Bnt-Ref-03 a été analysé à l'ICP-AES tandis que les échantillons Bnt-Ref-04 et Bnt-Ref-05 ont été analysés à la XRF. Les limites de détections et résultats d'analyse XRF ont été converties en concentrations élémentaires pour fin de comparaison.

Tableau 3-1 : Composition élémentaire de la bentonite (en g/kg)

Éléments	Al	Ba	Ca	Cr	Fe	K	Li	Mg
LDR ICP-AES	0,06	0,005	0,06	0,005	0,01	0,001	0,005	0,02
LDR XRF	0,05	n.a	0,07	n.a	0,07	0,08	n.a	0,06
Bnt-Ref-03	107,30	0,197	9,54	0,029	24,00	3,970	0,041	11,86
Bnt-Ref-04	100,83	n.a	8,79	n.a	26,54	4,39	n.a	13,30
Bnt-Ref-05	97,39	n.a	10,86	n.a	27,84	4,65	n.a	13,63

LDR : Limite de détection rapportée

n.a : non analysé

Tableau 3-1 (suite) : Composition chimique de la bentonite (en g/kg)

Éléments	Mn	Na	P	S	Si	Ti	Zn
LDR ICP-AES	0,005	0,001	n.a	0,2	n.a	0,03	0,06
LDR XRF	0,08	0,07	0,04	n.a	0,05	0,06	n.a
Bnt-Ref-03	0,22	12,50	n.a	2,8	n.a	0,55	0,07
Bnt-Ref-04	0,16	15,88	0,22	n.a	269,25	0,84	n.a
Bnt-Ref-05	0,16	13,58	0,22	n.a	281,87	0,84	n.a

LDR : Limite de détection rapportée

n.a : non analysé

### 3.1.9 Minéralogie de la bentonite

Puisque le minéral qui procure des propriétés avantageuses à la bentonite est la montmorillonite, diverses méthodes ont été utilisées afin de quantifier la proportion relative de ce minéral dans la bentonite des GCB à l'étude. L'accent a également été mis sur la quantification de la proportion d'autres minéraux gonflants appartenant à la famille des smectites, et sur la quantification des minéraux porteurs de carbonates pouvant éventuellement neutraliser du DMA.

#### 3.1.9.1 Analyse au diffractomètre de rayons X (DRX)

La composition minéralogique de la bentonite a été évaluée qualitativement par analyses au diffractomètre de rayons X (DRX), à partir de 2 sous-échantillons de Bnt-Ref. La méthode du DRX consiste à bombarder un échantillon de rayons X et à évaluer les angles et l'intensité des rayons diffractés. Un diffractogramme est obtenu en illustrant graphiquement l'intensité des rayons en fonction de l'angle formé par le faisceau incident et le faisceau diffracté ( $2\theta$ ) (Skoog et al., 2017). Puisque chaque phase cristalline possède un diffractogramme qui lui est propre, il est possible d'identifier les principales phases minérales présentes dans un échantillon en comparant les pics

du diffractogramme de l'échantillon à ceux d'un catalogue de fiches de minéraux. Deux échantillons de bentonite ont fait l'objet d'analyse DRX. La préparation ainsi que l'analyse qualitative de ces échantillons ont été réalisées par un laboratoire externe (Université Laval). Les échantillons transmis ont été broyés jusqu'à l'obtention d'une poudre avec des particules de moins de 100  $\mu\text{m}$ . Des analyses DRX ont ensuite été réalisées sur les échantillons en poudre et 2 diffractogrammes ont été obtenus. Les analyses qualitatives réalisées par l'Université Laval sur ces diffractogrammes ont permis l'identification de montmorillonite 15A (sodique), de beidellite 12 A (sodique), de quartz, de cristobalite, d'albite et de calcite dans les deux échantillons de bentonite. Les résultats détaillés sont présentés à l'annexe C.

Les minéraux argileux sont faiblement cristallisés et ont une structure feuilletée. L'identification des espèces minérales en place à partir d'échantillon en poudre peut donc s'avérer difficile. Afin d'amplifier la réfraction des minéraux argileux présents dans les échantillons de bentonite, des analyses DRX sur lames orientées ont été réalisées. Ces dernières ont été préparées avec la fraction argileuse des échantillons, extraite par centrifugation.

Divers traitements peuvent également être appliqués à une lame orientée afin de modifier les propriétés des minéraux s'y trouvant. Il est ensuite possible d'identifier certains minéraux argileux en comparant le diffractogramme d'une lame orientée « naturelle » à celui obtenu à la suite d'un traitement. Dans le cadre de la caractérisation minéralogique des échantillons de bentonite, des traitements au glycérol (gonflement des smectites) ainsi que par chauffage (destruction de la kaolinite et des chlorites, déshydratation des vermiculites et des smectites) ont été appliqués à chaque lame orientée. Les résultats d'analyses, insérés à l'annexe C, confirment la présence de smectites, et plus spécifiquement, de montmorillonite.

### **3.1.9.2 Analyse semi-quantitative des diffractogrammes**

Une analyse semi-quantitative des minéraux présents dans les échantillons de bentonite a été réalisée par un laboratoire externe (SGS Minerals Services Lakefield), à partir des diffractogrammes des analyses sur poudres réalisés par l'Université Laval et des résultats d'analyses chimiques du tableau 3-1. Les diffractogrammes ont été analysés à l'aide du logiciel Topas®. Ce dernier utilise la méthode Rietveld (Serna et al., 2014; Yong, 1995) qui consiste à simuler un diffractogramme à partir de phases minérales sélectionnées, puis à estimer par une approche itérative les proportions relatives de chaque phase jusqu'à ce que le diffractogramme

simulé soit le plus proche possible du diffractogramme de référence. La précision des résultats ainsi obtenus est de l'ordre de 1% massique. L'interprétation ne reflète toutefois pas la présence de minéraux amorphes et les résultats sont normalisés à une valeur de 100% pour la liste des minéraux identifiés. Les résultats de l'analyse semi-quantitative réalisée par SGS Minerals sont présentés au tableau 3-2.

Tableau 3-2: Proportion relative des minéraux cristallisés (par SGS Minerals Services Lakefield)

Échantillon	Majeurs (>30%)	Moyen (10-30%)	Mineur (2-10%)
Bnt-Ref-06	Montmorillonite (15A)	Beidellite sodique (12A)	Quartz Cristobalite Orthoclase Albite Calcite
Bnt-Ref-07	Beidellite sodique (12A)	Montmorillonite (15A)	Quartz Cristobalite Orthoclase Albite Calcite

Afin de tenter de préciser les proportions relatives de minéraux obtenus par SGS, une analyse semi-quantitative a également été réalisée à partir de la liste des pics identifiés par l'Université Laval (Annexe C). Des pics propres à chaque minéral ont été identifiés sur le diffractogramme, puis l'intensité de ces pics (en excluant le bruit de fond) a été comparé à l'intensité de ce pic dans un diagramme de diffraction de référence du minéral (Barthelmy, 2012). Les proportions relatives des minéraux estimées par cette méthode sont présentées au tableau 3-3, tandis que le détail des calculs est présenté à l'annexe C.

Tableau 3-3: Proportions relatives estimées des minéraux dans la bentonite (en %)

Échantillon	Minéral						
	Mnt 15A	Beid 12A	Quartz	Cristobalite	Albite	Calcite	Orthose
Bnt-Ref-06	40	19	19	5	10	5	2
Bnt-Ref-07	30	37	18	3	4	2	6
Moyenne	35	28	19	4	7	4	4

### **3.1.9.3 Analyse au microscope électronique à balayage (MEB) couplé à la spectrométrie X par dispersion en énergie (EDS)**

Des analyses minéralogiques ont été réalisées au MEB-EDS afin de déterminer la composition élémentaire de la montmorillonite et de la beidellite contenue dans la bentonite, avant et après une hydratation avec du DMAS. Ces analyses ont été réalisées dans les laboratoires de l'UQAT avec un MEB Hitachi S-3500N (Hitachi High-Technologies Corporation, Japon) couplé à un spectromètre EDS X-Max Silicon Drift Detector (Oxford Instruments, Royaume-Uni) et dans un laboratoire externe (IOS Services Géoscientifiques inc) utilisant un MEB EVO® MA 15 (Zeiss, Allemagne).

Un microscope électronique à balayage (MEB) est un instrument permettant de documenter la morphologie et la composition chimique d'un objet en utilisant les interactions électrons-matière. Un filament de tungstène est chauffé, ce qui produit un faisceau d'électrons primaires qui est accéléré puis concentré grâce à une série de lentilles électromagnétiques. Lorsque le faisceau entre en contact avec la matière, il pénètre dans celle-ci et il en résulte, entre autres, la rétrodiffusion des électrons incidents ainsi que l'émission d'électrons secondaires, d'électrons Auger et de photons de fluorescence X (Skoog et al., 2017). L'analyse des électrons secondaires permet de déterminer la morphologie de l'endroit analysé tandis que les électrons rétrodiffusés renseignent sur la composition atomique. Dans ce dernier cas, les zones constituées d'éléments ayant un faible numéro atomique apparaissent dans une teinte de gris pâle tandis que les zones plus foncées sont associées à des éléments ayant un numéro atomique plus élevé. Il est possible de quantifier la composition élémentaire de la zone pointée par le faisceau en analysant rayons X émis par la matière avec un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS). Cette méthode permet la quantification des éléments présents en quantité supérieure à environ 0,2%.

Les analyses au MEB-EDS ont été réalisées sur des sous-échantillons provenant de Bnt-Ref (granulats fins, diamètre < 1mm). Les essais faits à l'UQAT ont été réalisés sur des échantillons collés sur un support cylindrique à l'aide d'un collant double face conducteur, puis recouverts d'une fine couche de carbone. Les essais faits par IOS Services Géoscientifiques ont pour leur part été réalisés sur des sections polies préparées à leur laboratoire.

Lors de l'analyse des sous-échantillons de Bnt-Ref au MEB-EDS, des minéraux ayant des compositions élémentaires similaires à la montmorillonite 15A et à la beidellite 12A ont été

identifiés, sans toutefois pouvoir clairement être différenciés. La composition élémentaire des points d'analyse sont présentés au tableau-3-4, ainsi que celle de la montmorillonite 15A et de la beidellite 12A, à titre indicatif. De la calcite a également été identifiée lors d'une analyse au MEB réalisée par IOS Services Géoscientifiques inc. (14,87% C, 33,46% Ca et 51,66% O).

Tableau 3-4 : Composition élémentaire de la montmorillonite et/ou beidellite contenue dans un sous-échantillon de Bnt-Ref

Point analysé au MEB	Composition élémentaire (en% massique)						
	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe
UQAT-5418	51,99	0,23	0,51	19,34	25,99	0,56	1,38
UQAT-5421	55,26	0,62	1,06	20,77	18,56	0,13	3,02
UQAT-5422	47,16	0,21	1,26	13,36	34,16	1,03	2,44
IOS- U74459	45,03	0,35	1,82	13,95	34,52	0,37	3,88
Moyenne	49,86	0,35	1,16	16,86	28,31	0,52	2,68
Mnt 15A	55,55	1,71	---	13,38	27,86	---	---
Beidellite 12A	58,28	1,57	---	12,28	25,58	---	---

### 3.1.9.4 Réconciliation des résultats chimiques et minéralogiques

Les résultats obtenus par analyses chimiques, DRX et MEB ont été rassemblés afin de tenter de déterminer plus précisément le pourcentage massique de montmorillonite, de beidellite et de calcite dans la bentonite. Pour ce faire, une comparaison a été faite entre les pourcentages massiques des éléments obtenus par analyse semi-quantitative et les résultats d'analyses chimiques. Les pourcentages massiques ont été ajustés de manière itérative, jusqu'à l'obtention d'une bonne concordance. Plus de détails sur cette méthode sont disponibles dans Chopard (2017) et Bouzazhah (2013).

Dans le cadre de la présente analyse, les compositions élémentaires obtenues au MEB ont été utilisées pour les smectites (montmorillonite et beidellite, indifférenciées) et la calcite, tandis que les compositions proposées sur la base de données minéralogique *webmineral* (Barthelmy, 2012) ont été utilisées pour les autres minéraux. Les résultats de la réconciliation minéralogique indiquent un contenu de 65% en smectites, 15% en quartz et cristobalite (indifférenciés), 12% en albite, 4% en feldspath potassique, 2% en calcite, et 2% en autres minéraux dans la bentonite. Les détails de la réconciliation minéralogique se trouvent à l'annexe C. Le contenu en smectites de 65% est plutôt faible comparativement aux valeurs retrouvées dans la littérature pour de la bentonite sodique. Ces dernières se situent majoritairement entre 70%-90% (Bouazza et al., 2007; Jae-Myung et al., 2005;

Rowe et al., 2017; Shackelford et al., 2000; Shackelford et al., 2016). Il est d'ailleurs à noter que la fiche technique du GCB analysé indique que la bentonite contenue dans le matériau a un contenu minimal en smectites de 90%.

## 3.2 Caractérisation des échantillons liquides

### 3.2.1 Préparation du drainage minier acide synthétique (DMAS)

Le drainage minier acide synthétique (DMAS) utilisé pour la réalisation de divers essais en laboratoire a été inspiré des résultats d'analyses chimiques d'échantillons de DMA prélevés sur une mine d'or localisée en Abitibi-Témiscamingue. Les tableaux 3-5 et 3-6 présentent les résultats d'analyses du DMA prélevé sur le terrain (échantillon DMA<sub>Réf</sub>). Seuls les métaux en concentration supérieure à 1 mg/l dans le DMA de référence ont été sélectionnés pour faire partie du DMAS. Ce dernier a été préparé en ajoutant des sels ou solutions aqueuses à de l'eau DI. Le tableau 3-7 liste les composantes utilisées dans l'élaboration du DMAS ainsi que les concentrations utilisées. Afin de maximiser la dissolution des composantes solides, le mélange obtenu à la suite de l'ajout de toutes les composantes a été agité pendant au moins une heure puis placé dans un bain à ultrasons pendant au moins 30 minutes. Le mélange a ensuite été filtré et mis dans des bouteilles de plastique de 1L pour conservation. Au total, 6 lots de DMAS d'un volume variant de 1,5 L à 4,0 L ont été préparés. Il est à noter les résultats présentés à la section 4 du présent mémoire ont été obtenus avec les lots de DMAS #2 à #5 (utilisation de moyennes pondérées en fonction des volumes utilisés).

Tableau 3-5 : Composition chimique du DMA de référence (en mg/l)

Élément	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr
LDR	0,010	0,060	0,001	0,001	0,020	0,030	0,003	0,004	0,003
DMA <sub>Réf</sub>	128	<0,06	0,038	<0,001	<0,02	431	0,192	0,212	0,399

Élément	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni
LDR	0,003	0,006	n/d	n/d	0,001	0,002	0,009	n/d	0,004
DMA <sub>Réf</sub>	5,47	1890	6,01	0,142	69,7	7,04	<0,009	5,43	0,678

Élément	Pb	S	Se	Si	Sr	Te	Ti	Zn	
LDR	0,020	0,090	0,100	0,040	n/d	n/d	0,002	0,005	
DMA <sub>Réf</sub>	0,979	1000	<0,1	53,8	0,705	0,000	<0,002	128	

LDR = Limite de détection rapportée

Tableau 3-6 : Paramètres électrochimiques du DMA de référence (à 25°C)

Paramètre	Valeur
Conductivité électrique (CE)	4,83 mS
Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)	698 mV (ENH)
pH	3,1

Tableau 3-7 : Composantes du DMAS

Composante	Quantité / l
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·xH <sub>2</sub> O	17,80 g
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,98 g
AlCl <sub>3</sub> ·6 H <sub>2</sub> O	1,15 g
Zn(SO <sub>4</sub> )·7H <sub>2</sub> O	0,56 g
Mn*	0,70 ml
K*	0,60 ml
Cu*	0,55 ml
Na*	0,54 ml

\* Utilisation d'une solution contenant 10 000 ppm de l'élément dans du HNO<sub>3</sub> (2%)

### 3.2.2 Analyses chimiques et électrochimiques du DMAS

L'analyse élémentaire des échantillons liquides a été effectuée par ICP-AES. Les échantillons ont été filtrés avec un filtre de 0,45 µm puis acidifiés avec 2% d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>). La concentration de 26 éléments a été analysée, soit : Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, S, Se, Si, Sr, Te, Ti et Zn.

L'analyse des anions a été réalisée sur des échantillons filtrés mais non acidifiés par chromatographie ionique sur le lot 6 uniquement. Les échantillons ont été filtrés avec un filtre de 0,45 µm puis analysés pour les 3 principaux anions pouvant se trouver dans le DMAS soit les chlorures (Cl<sup>-</sup>), les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

Les paramètres électrochimiques évalués sur certains échantillons liquides sont la conductivité électrique (CE), le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et le pH. La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un appareil portable CON 6+ Meter (Oakton Instruments, États-Unis) ayant une précision est de ±0,5%. Le potentiel d'oxydoréduction et le pH ont respectivement été mesurés à l'aide d'une sonde WD-35805 (Oakton Instruments, États-Unis) et d'une sonde avec

compensation automatique de la température Orion Green pH Electrodes (Thermo Fisher Scientific, États-Unis), toutes deux connectées à un dispositif de mesure pour paillasse VWR sympHony® B30PCI (VWR International, États-Unis). La précision des mesures est de l'ordre de  $\pm 0,05\%$  pour l'Eh et de  $\pm 0,02$  pour le pH.

Les résultats d'analyses élémentaires, des anions et des paramètres électrochimiques des lots de DMAS sont présentés aux tableaux 3-8 à 3-10. Les échantillons ont été prélevés pour analyses moins de 2 heures après la filtration du mélange. Bien que les résultats obtenus soient satisfaisants considérant les objectifs du projet de recherche, ils mettent en lumière certaines problématiques reliées à la préparation des lots de DMAS :

- Différence de concentration obtenues selon la source utilisée (même contenant de fer ferreux utilisé pour les lots # 1 à 4 et #6, mais autre contenant utilisé pour le lot #5).
- Utilisation de verrerie ayant une faible précision au niveau du volume (5-10%) et dilution dans l'eau DI approximative.
- Erreurs de calculs des quantités de sels et solutions aqueuses à ajouter, conduisant à des concentrations élevées en métaux (Lot #6).
- Présence d'impureté dans les sels, conduisant à la présence d'éléments, en faible concentrations, ne faisant pas partie des composantes du tableau 3-7.
- Différence de concentrations obtenues selon l'ordre d'ajout des composantes du tableau 3-7 (solutions aqueuses ajoutées avant les sels lors de la préparation du Lot #2, et sulfate ferrique ajouté à la fin du mélange).

Toutefois, il importe de rappeler que des variations en termes de composition chimique du DMA d'un site minier peuvent être observées issue au fil des saisons et des années. Les autres résultats d'analyses électrochimiques réalisées sur des échantillons liquides seront présentés aux sections 4 et 5, en lien avec le suivi de la conductivité hydraulique des GCB.

Tableau 3-8 : Composition chimique des lots de DMAS (en mg/l)

Lot	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
LDR	0,010	0,060	0,001	0,001	0,020	0,030	0,003	0,004	0,003	0,003	0,006	n/d	n/d
DMA <sub>Ref</sub>	128	<0,06	0,038	<0,001	<0,02	431	0,192	0,212	0,399	5,47	1890	6,01	0,142
Lot 1	124	<0,06	0,042	<0,001	<0,02	448	<0,003	0,164	0,427	6,70	2470	6,98	0,014
Lot 2	107	<0,06	0,063	<0,001	0,028	605	<0,003	0,170	0,364	6,28	1410	7,49	0,010
Lot 3	126	<0,06	0,065	<0,001	0,093	543	<0,003	0,175	0,419	5,92	1720	8,03	0,015
Lot 4	130	<0,06	0,075	<0,001	0,105	514	<0,003	0,115	0,331	8,87	2140	8,38	0,012
Lot 5	148	<0,06	0,097	<0,001	<0,02	551	<0,003	0,681	1,45	10,4	3530	8,40	0,018
Lot 6	156	<0,06	0,074	<0,001	<0,02	642	<0,003	0,182	0,719	8,80	2210	12,4	0,022

LDR : Limite de détection rapportée

Lot	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	Pb	S	Se	Si	Sr	Te	Ti	Zn
LDR	0,001	0,002	0,009	n/d	0,004	0,020	0,090	0,100	0,040	n/d	n/d	0,002	0,005
DMA <sub>Ref</sub>	69,7	7,04	<0,009	5,43	0,678	0,979	1000	<0,1	53,8	0,705	0,000	<0,002	128
Lot 1	288	12,5	<0,009	6,82	0,689	0,133	2980	<0,1	2,75	0,084	0,000	0,004	140
Lot 2	398	10,7	<0,009	6,62	0,756	0,068	2310	<0,1	18,8	0,122	0,000	0,010	111
Lot 3	385	11,9	<0,009	4,71	0,851	0,093	2700	<0,1	24,3	0,112	0,000	0,023	138
Lot 4	345	7,76	<0,009	6,00	0,638	0,201	3040	<0,1	20,4	0,100	0,000	0,018	145
Lot 5	453	26,7	<0,009	22,4	0,818	0,270	3830	<0,1	27,5	0,138	0,000	82,7	175
Lot 6	447	21,9	<0,009	17,7	0,559	0,114	3070	<0,1	18,3	0,192	0,000	3,82	184

LDR : Limite de détection rapportée

Tableau 3-9 : Composition anionique des lots de DMAS (en mg/l)

Lot	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Lot 5	662	125	10517
Lot 6	836	151	8189

Tableau 3-10 : Composition électrochimique des lots de DMAS

Lot	CE (mS)	Eh (mV)	pH
DMA <sub>Réf</sub>	4,83	698	3.10
Lot 1	8.28	759	2.18
Lot 2	8.82	829	2.44
Lot 3	8.32	783	2.32
Lot 4	8.50	705	2.31
Lot 5	9.34	662	2.47
Lot 6	9.41	726	2.31
Moyenne - Lots 1 à 6	8.78	744	2.34

### 3.2.3 Force ionique et quantité relative de cations monovalents et multivalents

La force ionique (I) ainsi que la quantité relative de cations monovalents et multivalents (RMD) ont été présentés à la section 2.1.3 et les équations 2-1 et 2-2 indiquent comment calculer ces paramètres. Ces derniers ont été estimés pour le DMA<sub>réf</sub> et pour chaque lot de DMAS.

Le RMD a été évalué à partir des résultats d'analyses présentés au tableau 3-8, des couples Eh-pH présentées au tableau 3-6 et des diagrammes de Pourbaix de l'*Atlas of Eh-pH diagrams* du *Geological Survey of Japan* (Takeno, 2005). Ces derniers illustrent les domaines de prédominances des différentes formes d'un élément X à une concentration de 10<sup>-10</sup> mole/kg, pour des systèmes X-H-O à une température de 25°C et pression atmosphérique de 100 kPa. La charge ionique attribuée à chaque élément listé au tableau 3-11 est celle du domaine de prédilection de l'élément au couple Eh-pH de son lot. La concentration molaire de chaque cation ainsi que le RMD ont ensuite été calculés (tableau 3-12).

La force ionique a été calculée à partir des résultats d'analyse chimique présentés aux tableaux 3-8 et 3-9. Les anions des lots #1 à 4 n'ayant pas été analysés, la concentration en sulfate de chaque lot a été estimée à partir de la concentration en soufre de chaque lot, et les valeurs moyenne des

Tableau 3-11 : Charge ionique prédominante supposée

Élément	Al	Ba	Bi*	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
Charge ionique	3+	2+	1+	2+	2+	2+	3+	2+	3+	1+	1+

Élément	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	S*	Si*	Sr	Ti*	Zn
Charge ionique	2+	2+	1+	2+	2+	2-	0	2+	0	2+

\* Éléments présents sous forme de  $\text{BiO}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  et  $\text{TiO}_2$

Tableau 3-12: Concentration molaires totales des cations monovalents ( $M_M$ ), multivalents ( $M_D$ ) et RMD

Lot	$M_M$ (mol/l)	$M_D$ (mol/l)	RMD (mol/l) <sup>1/2</sup>
DMA <sub>ref</sub>	0,0004	0,0544	0,0018
Lot 1	0,0005	0,0743	0,0018
Lot 2	0,0005	0,0627	0,0019
Lot 3	0,0004	0,0673	0,0016
Lot 4	0,0005	0,0727	0,0018
Lot 5	0,0029	0,1046	0,0091
Lot 6	0,0011	0,0831	0,0038

Tableau 3-13 : Force ionique du DMA<sub>ref</sub> et des lots de DMAS (en mol/l)

Lot	Force ionique (I)
DMA <sub>ref</sub>	0,27
Lot 1	0,83
Lot 2	0,64
Lot 3	0,74
Lot 4	0,83
Lot 5	0,63
Lot 6	0,87

résultats des lots #5 et 6 ont été utilisés pour le  $\text{Cl}^-$  et le  $\text{NO}_3^-$ . Les résultats obtenus sont présentés au tableau 3-13.

Une valeur de 0 a été attribuée aux concentrations situées sous la limite de détection rapportée tant pour le calcul de I que du RMD. Les valeurs de I et de RMD calculées sont approximatives

puisque'elles sont basées sur une liste non exhaustive des ions en solution, et sur des diagrammes de Pourbaix ne considérant pas le mélange des éléments. Toutefois, il est attendu que les ions non considérés soient présents en faible quantité et que les ordres de grandeur de I et du RMD soient adéquats.

### 3.2.4 Masse volumique du DMAS

La masse volumique du DMAS a été évaluée sur 4 échantillons de 10 ml de DMAS, soit 2 provenant du lot #3 et 2 du lot #5. Pour chaque échantillon, 10 ml de DMAS a été prélevé à l'aide d'une pipette de précision et a été déposé dans un tube gradué préalablement pesé. La masse de DMAS calculée a ensuite été divisée par le volume de DMAS, soit 10 cm<sup>3</sup>. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 3-14.

Tableau 3-14 : Masse volumique du DMAS

Lot et Échantillon	Masse de 10 ml de DMAS (g)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
Lot #3 – Échantillon 1	10,2466	1,025
Lot #3 – Échantillon 2	10,2502	1,025
Lot #5 – Échantillon 1	10,3539	1,035
Lot #5 – Échantillon 2	10,3631	1,036

Les résultats de masse volumique obtenus sont cohérents avec les concentrations en métaux des lots #3 et #5 présentées au tableau 3-8. En effet, une masse volumique plus élevée est obtenue pour le lot de DMAS #5 ayant des concentrations élémentaires plus élevées.

## 3.3 Évaluation des propriétés hydrogéologiques

### 3.3.1 Essais de perméabilité

La  $k_{sat}$  des échantillons de GCB a été déterminée à l'aide d'essais en perméamètre à paroi flexible inspirés des normes présentées au chapitre 2, soit la D5887 (ASTM, 2009) et la D6766 (ASTM, 2012b). Dans le cadre de la présente étude, 2 types de montages ont été utilisés, soit des cellules triaxiales de Karol Warner (KW) connectées à un panneau de contrôle manuel et une cellule triaxiale de GDS utilisant le logiciel GDSLAB pour le contrôle de l'essai et l'acquisition des données. Le panneau de contrôle manuel ne permet que la réalisation d'essais à charge variable (méthodes ASTM B et C). Toutefois, puisque l'utilisation du panneau manuel ne permet pas

l'application le maintien d'une charge constante en aval (méthode B), les essais avec les cellules KW ont été réalisés selon la méthode C à charge variable (diminution de la charge en amont et augmentation de la charge en aval). De son côté, le logiciel GDSLAB ne permet que la réalisation d'essais selon la méthode à charge constante (méthode A des normes ASTM). Cette méthode a donc été utilisée pour les essais réalisés avec la cellule GDS et le logiciel GDSLAB. L'équipement et les montages utilisés afin de réaliser les divers essais de conductivité hydraulique sont illustrés aux figure 3-2 et 3-3.

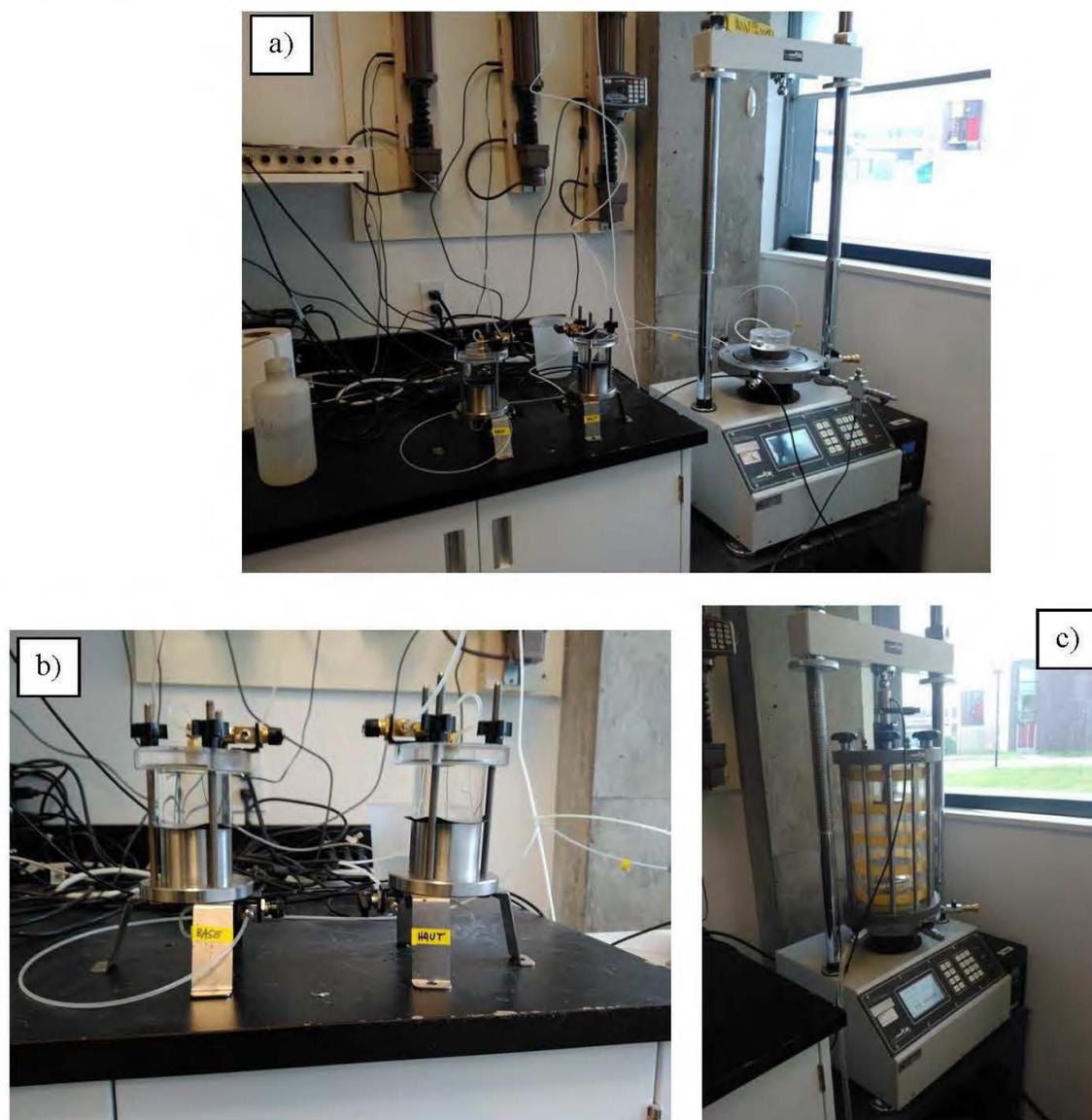


Figure 3-2 : Montage utilisé pour l'essai de conductivité hydraulique avec perméamètre à paroi flexible inspiré de la norme ASTM 6766 : a) montage global; b) vessies; c) cellule triaxiale GDS.



Figure 3-3 : Montage utilisé pour l'essai de conductivité hydraulique avec perméamètre à paroi flexible inspiré de la norme ASTM 5887 : a) panneau de contrôle manuel; b) cellules KW

Les essais de perméabilité ont été réalisés à de faibles pressions de confinement afin de se rapprocher des conditions rencontrées dans un recouvrement minier et d'éviter l'obtention de conductivité hydrauliques faibles dues à l'utilisation de pressions confinement élevées (Conzelmann, 2017). Considérant que l'hydratation d'un GCB dans un contexte de recouvrement minier se fait entre autres par percolation de liquide au travers du matériau plutôt que par le maintien d'une colonne d'eau au-dessus du matériau, les essais de perméabilités ont débuté en faisant directement circuler de l'eau DI ou du DMAS au travers de l'échantillon à l'étude, sans procéder préalablement à la période de préhydratation de 40h prescrite par les normes ASTM. Pour les essais réalisés selon la méthode à charges variables, une pression cellulaire de  $38 \pm 2$  kPa a été utilisée, ainsi que des pressions initiales à la base et au sommet de, respectivement,  $18 \pm 2$  kPa et  $3 \pm 2$  kPa. Une attention particulière a été portée aux essais afin que la différence de pression entre la base et le sommet de soit jamais inférieure à 10 kPa. La contrainte effective initiale appliquée était d'environ 27,5 kPa, soit similaire à celle des normes ASTM D5887 et D6766, et a varié entre 22,3 et 31,1 kPa pendant les essais. Pour les essais réalisés selon la méthode à pression constante, une pression cellulaire de 40 kPa a été appliquée conjointement à des pressions à la base et au sommet de 20kPa et 5 kPa. Ces pressions ont été maintenues tout au long des essais avec des variations de  $\pm 1$  kPa enregistrées à l'occasion, ce qui correspond également à l'application d'une contrainte effective de l'ordre de 27,5 kPa. Les essais ont été réalisés jusqu'à l'atteinte des critères d'achèvement applicables spécifiés dans les normes ASTM D5887 et D6766. Pour les essais réalisés avec du DMAS, les critères d'achèvement en lien avec le pH recommandés par Shackelford et al. (1999) et présentés à la section 2 ont initialement été considérés mais ont été abandonnés en cours d'essais (détails à la section 4). Des échantillons liquides ont également été collectés régulièrement à la sortie de la cellule triaxiale, pendant la réalisation de l'essai de perméabilité, afin d'évaluer le pH et la conductivité électrique du liquide sortant des échantillons de GCB et l'évolution de ces paramètres électrochimiques. Il est à noter que lorsque le liquide hydratant était de l'eau déionisée, cette dernière était dégazée afin de limiter les erreurs pouvant survenir lors de la mesure de la  $k_{sat}$ . Toutefois, lors d'hydratation avec du DMAS, ce dernière n'a pas été désaérée afin d'éviter la modification de ses caractéristiques (p.e, potentiel d'oxydoréduction).

Puisque la perméation de la bentonite peut entraîner des modifications au niveau du volume de l'échantillon, le calcul de la conductivité hydraulique a été réalisé à partir de la superficie et de la

hauteur finale des échantillons de GCB, après les avoir retirés des cellules triaxiales. La  $k_{sat}$  a été évalué à l'aide de l'équation 3-6 lors des essais à charge variable:

$$k_{sat} = \frac{a_{in}a_{out}H}{At(a_{in}a_{out})} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (3-6)$$

- où  $k_{sat}$  est la conductivité hydraulique saturée en (cm/s),  
 $a_{in}$  est l'aire du réservoir contenant le liquide entrant (en cm<sup>2</sup>),  
 $a_{out}$  est l'aire du réservoir contenant le liquide sortant (en cm<sup>2</sup>),  
 $H$  est l'épaisseur moyenne de la bentonite (en cm),  
 $A$  est l'aire de l'échantillon de GCB (en m<sup>2</sup>),  
 $h_1$  est la charge au temps  $t_1$  (en cm),  
 $h_2$  est la charge au temps  $t_2$  (en cm) et  
 $t$  est le temps écoulé entre  $t_1$  et  $t_2$  (en s).

Pour les essais à charge constante, l'équation 3-7 est utilisée :

$$k_{sat} = \frac{QH}{Ath} \quad (3-7)$$

- Où  $Q$  est un volume de liquide (en cm<sup>3</sup>), correspondant à la moyenne du volume de liquide entrant et sortant de l'échantillon,  
 $t$  est l'intervalle de temps (en s) pendant lequel  $Q$  se produit et  
 $h$  (en cm) est la différence de charge appliquée entre la base et la tête de l'échantillon.

Il est à noter que pour faciliter la comparaison des résultats, les divers paramètres mentionnés à la présente section ont été exprimés aux sections 4 et 5 en termes de volume de liquide circulant au travers de l'échantillon plutôt qu'en terme de temps. L'unité utilisée pour exprimer ce volume est le PVF (pour « pore volume of flow »), où 1 PVF correspond au volume des vides de l'échantillon.

### 3.3.2 Effet des cycles de gel et dégel sur la conductivité hydraulique saturée

L'effet des cycles de gel-dégel sur la  $k_{sat}$  a été investiguée sur 3 échantillons de GCB, en s'inspirant de la norme ASTM D6035 *Standard Test Method for Determining the Effect of Freeze-Thaw on*

*Hydraulic Conductivity of Compacted or Intact Soil Specimens Using a Flexible Wall Permeameter* (ASTM, 2013). Un échantillon a été hydraté avec de l'eau DI tandis que les 2 autres l'ont été avec du DMAS. La  $k_{sat}$  a été déterminée sur chaque échantillon après 3, 5 et 10 cycles de gel-dégel.

Les échantillons testés ont été soumis à un gel et du dégel unidimensionnel, dans un système fermé. Le dispositif ayant été utilisé est celui développé par Boulanger-Martel et al. (2014), illustré à la figure 3-4. Chaque échantillon a tout d'abord fait l'objet d'un essai de conductivité hydraulique saturé en suivant la méthodologie décrite à la section 3.3.1. L'échantillon saturé a ensuite été pesé et mesuré, puis installé sur la thermistance se trouvant sur l'anneau inférieur de polystyrène assurant l'isolation de la base de l'échantillon. L'isolation latérale a été réalisée à l'aide d'anneaux en mousse polystyrène d'environ 35 cm de diamètre extérieur et 11 cm de diamètre intérieur, ainsi que de la laine minérale insérée entre l'échantillon de GCB et l'anneau de polystyrène.

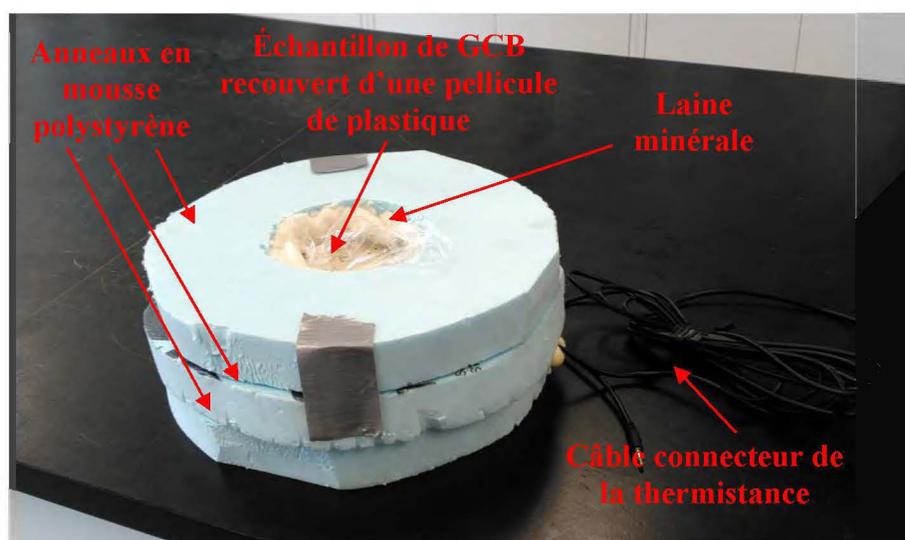


Figure 3-4 : Dispositif utilisé pour le gel et dégel unidimensionnel des échantillons

Le gel de l'échantillon a été réalisé en plaçant le montage dans un congélateur ayant une température de  $-15^{\circ}\text{C}$ , jusqu'à ce que la base de l'échantillon atteigne une température d'au moins  $-5^{\circ}\text{C}$ . Cette dernière température a été sélectionnée puisqu'elle correspond à la température à laquelle la majorité des changements structuraux dus au gel sont observés dans des échantillons de

montmorillonite sodique (section 2.5.3.1). Le dégel a pour sa part été réalisé en plaçant le montage à la température de la pièce (20-23°C), jusqu'à ce qu'une température d'au moins 3°C soit atteinte à la base de l'échantillon. Le temps minimal requis pour compléter un cycle de gel-dégel respectant les critères précédents a varié de 6 à 12 heures, selon la teneur en eau de l'échantillon. L'évolution de la température à la base de l'échantillon GCB 24 (hydraté à l'eau DI) a été enregistrée aux 10 minutes pendant la majeure partie des cycles # 1 et 2 de gel-dégel, et les résultats obtenus sont présentés à la figure 3-5. Les températures mesurées à la base de tous les échantillons, au début et à la fin de chaque cycle de de gel-dégel, sont pour leur part présentés à l'annexe D

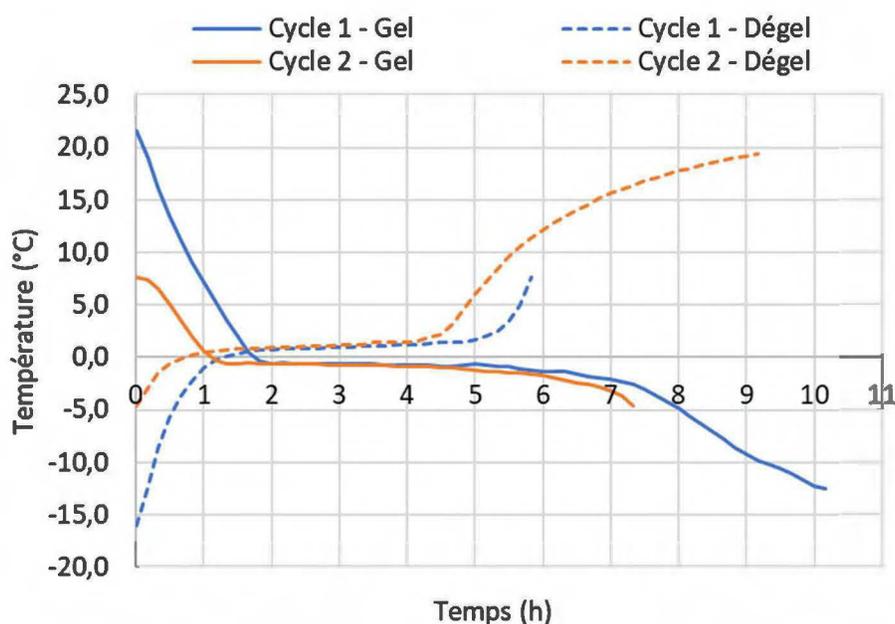


Figure 3-5 : Évolution de la température pendant les cycles de gel-dégel #1 et 2 de l'échantillon hydraté à l'eau DI

Comme le montre la figure 3-4, une pellicule plastique a été placée au-dessus de l'échantillon de GCB subissant des cycles de gel-dégel afin de limiter la sublimation et l'évaporation. Une attention particulière a également été portée au dégel des échantillons, afin de limiter le temps d'exposition à la température ambiante et l'évaporation par le fait même. Malgré ces précautions, le suivi de la masse du montage indique de légères pertes de masses, généralement inférieures à 1,0 g, à chaque gel et dégel d'échantillon.

L'épaisseur des échantillons de GCB a été mesurée à 8 emplacements à la fin de chaque série de cycles de gel-dégel.

### 3.3.3 Teneur en eau, porosité et degré de saturation

La teneur en eau massique ( $\omega$ ), la porosité ( $n$ ) ainsi que le degré de saturation ( $S_r$ ) des échantillons de GCB ont été évalués à la fin de chaque essai de perméabilité ainsi qu'à la suite de chaque série de cycles de gel-dégel.

Pour les échantillons de GCB hydratés avec de l'eau DI,  $\omega$ ,  $n$  et  $S_r$  ont été calculés à l'aides l'équation 2-4 et des équations 3-8 et 3-9 :

$$n = \frac{V_v}{V_{t-GCB}} = \frac{(V_{t-GC} + V_{s-GCB})}{V_{t-GC}} = \frac{(V_{t-GCB} + \frac{M_{s-GCB}}{G_{s-GCB}})}{V_{t-G}} \quad (3-8)$$

où  $V_v$  est le volume des vides,

$V_{t-GCB}$  est le volume total de l'échantillon de GCB,

$V_{s-GCB}$  est le volume occupé par les solides du GCB,  $M_{s-GCB}$  est la masse sèche du GCB et

$G_{s-GCB}$  est la densité relative moyenne des GCB (calculée à la section 3.1.5).

Le volume total de l'échantillon,  $V_{t-GCB}$ , a été calculé à partir du diamètre ( $d$ ) et de l'épaisseur ( $H$ ) moyen des échantillons de GCB.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{(M_{h-GCB} - M_{s-GCB}) \times \rho_w}{V_v} \quad (3-9)$$

où  $V_w$  est le volume d'eau et

$\rho_w$  est la masse volumique de l'eau, estimée à 1,000 g / cm<sup>3</sup>

Tel que mentionné à la section 2.2.4, le fait d'hydrater un GCB avec du DMAS plutôt que de l'eau DI a un impact sur sa masse sèche. Une masse sèche actuelle plutôt que réelle a donc été utilisée dans les calculs de relation de phase. Les valeurs  $n$  et  $S_r$  des échantillons perméés au DMAS ont donc été calculés en substituant  $M_{s-GCB}$  par  $M_{a-GCB}$  dans les équations 3-8 et 3-9. Le calcul de  $M_{a-GCB}$  (équation 2-5) a été fait, dans le cadre de la présente étude, en supposant que la fraction d'eau pure retenue par cristallisation après séchage était négligeable et que  $f$  était égal à 0. La valeur de  $c$  a pour sa part été déterminée à partir des masses volumiques du DMAS présentées à la section 3.2.4. Une valeur de  $c$  de 0,025 g/g a été utilisée lorsque l'essai de  $k_{sat}$  d'un échantillon a été complété avec les lots de DMAS #1 à 4 ou #6, tandis qu'une valeur de 0,035 g/g a été utilisé avec le lot de DMAS #5. Somme toute, il est estimé que l'incertitude sur le  $S_r$  calculé est d'environ 4%.

### 3.3.4 Courbe de rétention d'eau

Des courbes de rétentions d'eau d'échantillons de GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS ont été obtenues en combinant les résultats obtenus sur divers échantillons de GCB, à l'aide de diverses méthodes. La méthode de l'extracteur à pression a été sélectionnée pour couvrir l'intervalles de succions allant de 0 à 1500 kPa, tandis qu'un appareil WP4C de Decagon a été utilisé pour les succions allant de 1 MPa à 300 MPa (essais réalisés au laboratoire de Génie de l'environnement de l'Université de Carleton, ci-après LGEUC). Des essais sur un GCB hydraté à l'eau DI ont également été réalisés avec la méthode des pressions de vapeur. Dans tous les cas, les essais ont été réalisés sans application de pression de confinement.

Deux échantillons de GCB saturés à l'eau DI ont fait l'objet d'essais avec un extracteur à pression d'une capacité nominale de 100 bars, muni d'une membrane en cellulose à sa base (Soilmoisture Equipment Corp., États-Unis). La pression dans l'extracteur a été bâtie à l'aide d'azote comprimée et mesurée à l'aide de manomètres. Le montage utilisé pour la réalisation des essais est illustré à la figure 3-6.



Figure 3-6 : Montage utilisé pour les essais à l'extracteur à pression

Le premier échantillon (GCB 07) a été saturé en respectant les pressions prescrites par la norme ASTM 5887, tandis que le second (GCB 18) a été saturé en utilisant la méthode modifiée, utilisant de faibles pressions de confinement. Les paliers de pression réalisés sur chaque échantillon sont présentés au tableau 3-15. Chaque palier a été poursuivi jusqu'à ce que la masse de l'échantillon se stabilise ( $\pm 0,5$  g), ce qui correspond à des délais supérieurs à ceux de la norme ASTM D6836

(tableau 2-2). La stabilisation de la masse n'a cependant pas été atteinte pour le dernier palier de pression de chaque série d'essais. Dans le cas de l'essai sur le GCB 07 à 1380 kPa, une fuite dans le système n'a pas permis le maintien de cette pression jusqu'à la stabilisation de la masse, malgré un changement de membrane. Dans le cas de l'essai sur le GCB 18, l'essai a été abandonné à la suite de l'observation de plusieurs gains de masse de l'échantillon. Il est à noter que la membrane était humectée avec de l'eau déionisée à chaque pesée, avant de refermer l'extracteur à pression, et que cette eau semble être à la source du gain de masse observé. Cet aspect sera discuté plus en détails au chapitre 5.

Tableau 3-15 : Essais à l'extracteur à pression

Échantillon	Méthode de saturation	Paliers de pression (kPa)
GCB 07	ASTM 5887	14 – 138 – 300 – 627 – 1000 – 1380*
GCB 18	ASTM 5887 modifiée	100 – 510 – 1175*

L'échantillon GCB 18 a été pesé puis coupé en deux après la série de mesures à l'extracteur à pression. Chaque moitié d'échantillon a alors été placée dans un dessiccateur contenant une solution saturée en sel. Les deux solutions salines utilisées étaient du sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) et du nitrate de potassium ( $\text{KNO}_3$ ). Leur humidité relative a été estimée à 98,0% et 92,6% respectivement (Wexler & Hasegawa, 1954; Young, 1967), pour une température de 22,5 °C, ce qui correspond à des succions de l'ordre de 2,7 MPa et 10,5 MPa. Les essais ont été arrêtés après 106 jours et 69 jours respectivement, alors que la masse des échantillons était stable à  $\pm 0,1$  g depuis 14 jours.

Deux échantillons ont fait l'objet d'analyses avec un WP4C (METER Group Inc, États-Unis) soit le GCB20, saturé avec du DMAS selon la norme ASTM D6766 modifiée, et le GCB23, saturé avec de l'eau déionisée selon la norme ASTM D5887 modifiée. Les échantillons ont été transportés dans du papier cellophane jusqu'au LGEUC afin de limiter la désaturation des échantillons durant le transport. Une fois au laboratoire, trois échantillons de 38 mm de diamètre ont été taillés avec un couteau de précision dans chaque GCB hydraté (sous-échantillons A, B et C). Ce diamètre est celui du godet à échantillon. Bien que ce godet ait une hauteur de 13 mm, il ne peut contenir des échantillons de plus de 7-8 mm sans risque de contamination des capteurs présents dans la chambre scellée. Le GCB 23 ayant une épaisseur initiale d'environ 9 mm à son arrivée au LGEUC, deux modes de préparation des échantillons ont été utilisés afin de pouvoir réaliser des mesures sur cet échantillon. Les sous-échantillons 23A et 23B ont été écrasés à l'aide d'un pilon à bout plat

d'environ 35 mm de diamètre, jusqu'à l'atteinte d'une épaisseur inférieure à 8 mm. La bentonite dépassant des géotextiles à la suite de l'écrasement de l'échantillon a ensuite été retirée à l'aide d'un couteau de précision, pour ramener le pourtour des échantillons à un diamètre de 38 mm. Pour sa part, l'échantillon 23C a été mis à sécher à l'étuve pendant 2h, puis à la température ambiante jusqu'à l'atteinte d'une hauteur de 7,9 mm. Le GCB 20 avait pour sa part une épaisseur initiale d'environ 8 mm à son arrivée au LGEUC. Afin de comparer adéquatement les résultats du GCB20 avec ceux du GCB23, le sous-échantillon 20B a été écrasé au pilon jusqu'à l'atteinte une épaisseur inférieure à 7 mm. Les échantillons 20A et 20C ont été mis à sécher à température ambiante jusqu'à l'atteinte d'une hauteur de 7,5 mm environ.

À la suite d'une lecture réalisé au WP4C, un sous-échantillon était pesé, son diamètre était mesuré en deux endroits, et son épaisseur en six endroits. Le sous-échantillon était ensuite placé dans une étuve à 105 °C, jusqu'à ce qu'une perte de masse d'au moins 0,3 g soit mesurée. L'échantillon était ensuite transféré au réfrigérateur dans un contenant de plastique scellé pour 30 à 60 minutes, avant d'être placé à la température de la pièce, toujours dans le contenant scellé, pendant au moins deux heures. Cette méthode a été utilisée afin d'accélérer le temps de réalisation des essais en laboratoire. La teneur en eau au sein des échantillons analysés devait être moins uniforme que si la norme ASTM avait été suivie (période de repos de 24h après un séchage), ce qui s'est traduit par des temps d'analyses de 2 à 4 heures, plutôt que de 10 à 15 minutes tel qu'indiqué dans le manuel du fabricant (Devices, 2010). La figure 3-7 illustre l'équipement et les sous-échantillons utilisés lors des essais avec le WP4C.

### **3.4 Évaluation des propriétés diffusives**

Le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène a été mesuré expérimentalement à l'aide d'un montage similaire à celui utilisé par Aubertin (2000) (figure 2-14). Une cellule à deux chambres de diffusion et à un port d'échantillonnage, ayant un diamètre intérieur de 10,0 cm et une hauteur de 27,6 cm, a été utilisé pour la réalisation des essais. Un géotextile de 10 cm de diamètre a tout



Figure 3-7 : Analyse de la succion d'échantillon de GCB à l'aide d'un WP4C (LGEUC)

d'abord été placé sur la plaque perforée inférieure de la cellule. Ce géotextile a été recouvert d'environ 5,0 cm de sable légèrement compacté et préalablement pesé dont la granulométrie était connue (sable caractérisé par Ait Khouia, 2019), puis du GCB à l'étude. Une pâte de bentonite hydratée a ensuite été placée sur le pourtour de l'échantillon de GCB, afin d'éviter les écoulements préférentiels le long de la paroi de la cellule. L'échantillon de GCB a été recouvert d'environ 5,0 cm de sable légèrement compacté, puis de la plaque perforée supérieure. Les couches de sables situées de part et d'autre du GCB agissent comme bris de capillarité afin de limiter la désaturation du GCB en cours d'essai (Aachib et al., 2004). Deux ressorts ayant une constante de rappel de 4,55 N/mm ont été placés au-dessus de la plaque perforée, de manière à ce qu'une contrainte de 15 kPa soit appliquée sur le système lorsque la cellule était fermée. Avec ce montage, la chambre de diffusion inférieure avait une hauteur de 6,3 cm tandis que la chambre supérieure mesurait 10,7 cm. Des capteurs à oxygène SO-110 (Apogee Instruments Inc, États-Unis) ayant un temps de réponse de 60 secondes et une précision de  $\pm 0.5$  mV ont été connectés à la chambre inférieure et supérieure de la cellule afin de mesurer la concentration en oxygène dans chaque chambre pendant l'essai. Ces capteurs étaient connectés à un enregistreur de données Hobo UX120 (Onset Computer Corporation, États-Unis). Finalement, chaque chambre de la cellule a été purgée à l'azote humide jusqu'à ce que les capteurs à oxygène indiquent des valeurs proches de zéro.

Deux types d'essais ont été réalisés. Dans le premier cas, l'essai débutait en enlevant le couvercle supérieur, afin que l'air ambiant remplace l'azote dans la chambre supérieure. Le couvercle était ensuite remis en place, et les essais étaient poursuivis jusqu'à ce que les concentrations en oxygène des chambres supérieures et inférieures soient égales. Le volume d'oxygène présent dans la cellule était donc constant pendant tout l'essai. Dans le second type d'essai, le couvercle supérieur était également ouvert en début d'essai afin de remplacer l'air ambiant remplace l'azote contenu dans la chambre supérieure. Toutefois, une valve d'étanchéité de la chambre du haut ou du bas était maintenue ouverte, afin que la chambre soit en équilibre avec l'air ambiant. Ce type d'essai était arrêté lorsque la concentration en oxygène dans le réservoir fermé présentait une tendance asymptotique. Le volume d'oxygène contenu dans la cellule était alors variable pendant l'essai. La deuxième méthode n'a été appliquée que lorsqu'une fuite était détectée dans une des chambres de la cellule, à l'étape de la purge. Les essais de diffusion réalisés sont résumés au tableau 3-16, tandis que le montage utilisé pour la purge et la réalisation des essais est illustré à la figure 3-8. Les essais ont une durée variant de 7 à 14 jours.

Les capteurs à oxygènes utilisés répondent à la concentration absolue en oxygène dans l'air, et rapportent ces valeurs en mV. Afin de convertir ces mV en concentration d'O<sub>2</sub>, une courbe de calibrage a été déterminée pour chaque capteur à partir des équations suivantes (Instruments, 2016)

$$O_2 = CF \cdot mV_M - b \quad (3-10)$$

$$CF = \frac{O_{2c}}{mV_c - mV_0} \quad (3-11)$$

où O<sub>2</sub> est la pression partielle de l'oxygène

CF est le facteur de calibrage (en kPa O<sub>2</sub> / mV)

mV<sub>M</sub> est la mesure de la concentration en oxygène, en mV

b est l'ordonnée à l'origine de la droite de la fonction O<sub>2</sub>(mV)

mV<sub>C</sub> est la valeur affichée par le capteur, en mV, à une concentration en oxygène de O<sub>2c</sub>

mV<sub>0</sub> est la valeur affichée par le capteur, en mV, dans un milieu sans oxygène

La pression barométrique a été déterminée à l'aide d'une sonde barométrique Baro-Diver (Van Essen Instruments, Pays-Bas), tandis qu'un chromatographe à phase gazeuse MicroGC (Agilent Technologies, États-Unis) a été utilisé afin de déterminer la concentration en oxygène correspondant à diverses valeurs mesurées par les capteurs, en mV. Les courbes de calibrages obtenues pour chaque capteur utilisé sont présentées à l'annexe F.

Le chromatographe à phase gazeuse a également été utilisé afin de réaliser un contrôle de la qualité des résultats enregistrées par les capteurs SO-110. Des échantillons d'oxygène d'air ont été prélevés de manière ponctuelle dans la chambre du haut de la cellule en cours de réalisation des essais. La teneur en oxygène mesurée au chromatographe a ensuite été comparée à la teneur calculée au même moment à partir des équations 3-10 et 3-11. Le montage utilisé pour le calibrage des sondes et le contrôle de la qualité des données est illustré à la figure 3-9.

Tableau 3-16 : Résumé des essais de diffusion

<b>Échantillon (Hydratation)</b>	<b>Montage</b>	<b>Méthode de préparation du GCB</b>	<b>Type d'essai</b>
Sable sec	Sable seul	n/a	Système fermé
12 (Eau DI)	GCB seul	Submersion dans l'eau DI (gonflement libre)	Système ouvert (réservoir du haut ouvert)
13 (Eau DI)	GCB entre 2 couches de sable sec	Méthode ASTM 6766 modifiée	Système fermé
16 (Eau DI)	GCB entre 2 couches de sable sec	Hydratation à volume constant (pression appliquée non mesurée)	Système fermé
18 (Eau DI)	GCB entre 2 couches de sable sec	Hydratation initiale selon la norme ASTM D5887 modifiée. Réhydratation après des essais à la l'extracteur à pression, par submersion dans l'eau DI	Système ouvert (réservoir du bas ouvert)
20 (DMAS)	GCB entre 2 couches de sable sec	Méthode ASTM 6766 modifiée	Système fermé
22 (DMAS)	GCB entre 2 couches de sable sec	Méthode ASTM 6766 modifiée et 10 cycles de gel-dégel	Système fermé (fuite en cours d'essai)

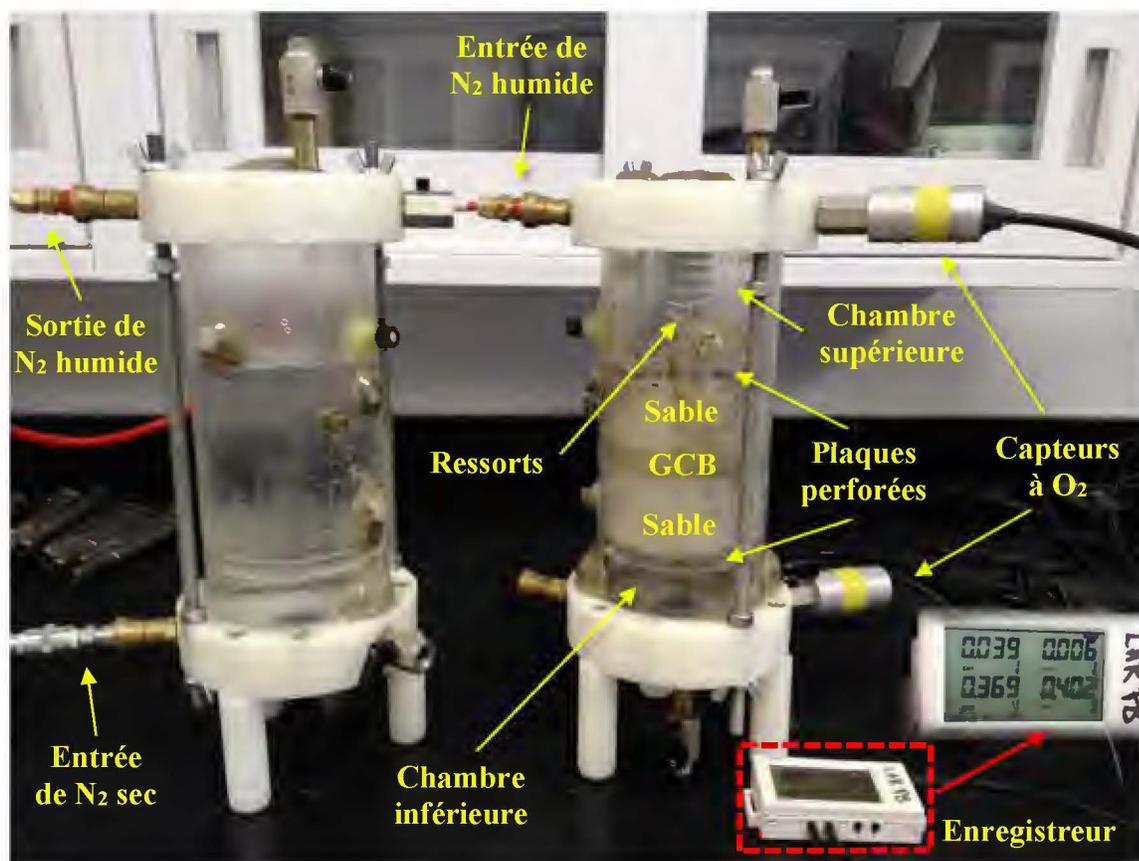


Figure 3-8 : Montage pour l'essai de diffusion de l'oxygène au travers un GCB

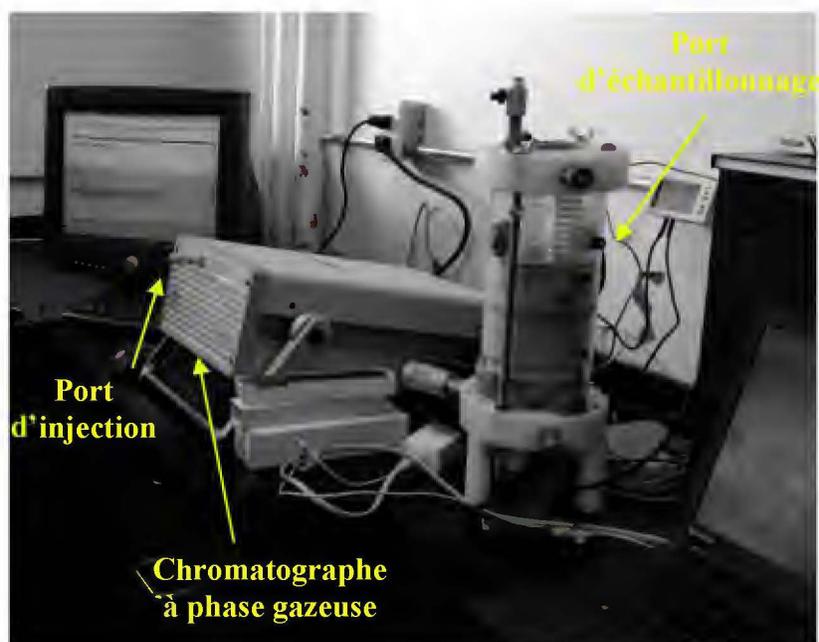


Figure 3-9 : Montage pour le calibrage des capteurs SO-110 et le contrôle de la qualité des données enregistrées

Tout comme dans Aubertin (2000), le modèle numérique POLLUTEv7 (GAEA Technologies Ltd, Canada) a été utilisé afin de simuler la diffusion de l'oxygène dans la cellule expérimentale et déterminer le  $D_e$  des échantillons de GCB. Les paramètres utilisés lors de l'analyse numérique sont la masse volumique des grains solides des matériaux au travers desquels l'oxygène circule, la porosité effective  $\theta_e$  et le coefficient de diffusion apparent ( $D^*$ ). Une approche itérative a été appliquée, où la valeur de  $D^*$  a été modifiée jusqu'à l'atteinte d'une bonne concordance avec les données enregistrées par les sondes. Le  $D_e$  du sable seul a tout d'abord été déterminé, et les valeurs obtenues ont été utilisées dans l'analyse des essais à 3 couches de matériaux. Des exemples de modèle numériques utilisés pour la simulation des essais de diffusion d'oxygène sont illustrés à la figure 3-10. Il est à noter qu'une légère désaturation des échantillons de GCB a été observée en cours d'essais, malgré les précautions prises. Les modélisations dans POLLUTEv7 ont donc été réalisées avec les porosités effectives à la fin des essais. Les valeurs obtenues ont été comparées aux valeurs calculées à l'aide de la formule semi-empirique 2-12.

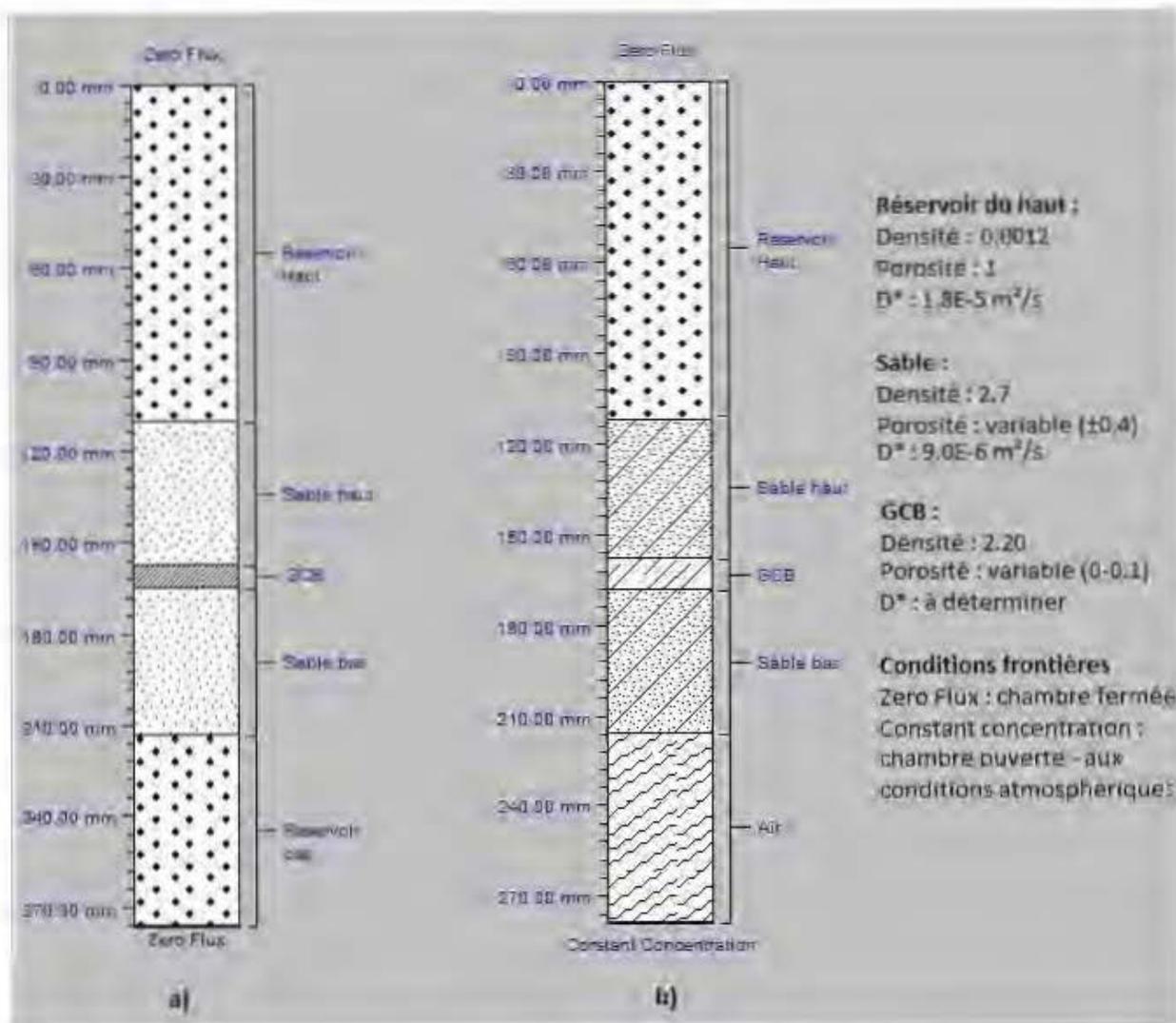


Figure 3-10 Modèles numériques utilisés pour la simulation des essais de diffusion d'oxygène

a) à volume d' $O_2$  constant et b) à volume d' $O_2$  variable.

**CHAPITRE 4    ARTICLE 1: LABORATORY**  
**INVESTIGATION OF THE COMBINED EFFECTS OF**  
**ACID MINE DRAINAGE AND FREEZE-THAW CYCLES**  
**ON THE SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF**  
**A GEOSYNTHETIC CLAY LINER**

Cette section présente un article soumis à la revue Géotextiles and Géomembranes le 1 avril 2019. Il vise à répondre aux deuxièmes et troisièmes objectifs spécifiques du projet énoncés à la section 1.3, soit évaluer l'effet du DMA sur la capacité du GCB à agir comme barrière aux liquides en comparant la  $k_{sat}$  d'échantillons hydratés à l'eau déionisée et au DMA, et évaluer l'effet du DMA sur la résistance du GCB aux cycles de gel-dégel.

**Abstract**

Geosynthetic clay liners (GCL) are increasingly considered as part as engineered multi-layer covers for the remediation of acid-generating mine wastes. In this study, three conventional GCL specimens were used to assess the combined effects of permeation with acid mine drainage (AMD) and freeze-thaw cycles (FTCs) on their saturated hydraulic conductivities ( $k_{sat}$ ), in the context of an engineered mine cover. One specimen was permeated with deionized water (DIW) while the two others were permeated with a synthetic acid mine drainage (SAMD) that was characterized by a low pH and high concentrations of iron and sulfate. For all specimens, the  $k_{sat}$  was evaluated at before FTCs, and after 3, 5, and 10 cycles. One of the GCLs permeated with SAMD was also partially desaturated at the end of each series of FTCs. The  $k_{sat}$  values measured for GCL permeated with DIW ranged from  $1.2 - 1.9 \times 10^{-9}$  cm/s before and after the FTCs. In contrast, the  $k_{sat}$  values of the GCLs permeated with SAMD initially ranged from  $1.2 - 4.4 \times 10^{-8}$  cm/s but increased after 10 FTCs to  $1.8 \times 10^{-7}$  cm/s for the specimen without desaturation, and  $6.3 \times 10^{-6}$  cm/s for the partially desaturated specimen. These results suggest that exposure to SAMD adversely affects the measured  $k_{sat}$  of GCLs and that the occurrence of FTCs only negatively impacts the  $k_{sat}$  of GCLs permeated with SAMD. This behaviour is likely due to the formation of cracks unsealed during subsequent permeation because of a loss of swelling capacity induced by permeation with SAMD. The series of permeability tests with SAMD lasted between 58-63 pore volumes of flow (59-66 days), however, chemical equilibrium was not achieved by the end of the tests. The results indicated

that the bentonite neutralized the SAMD during permeation and that buffering reactions were still occurring at the end of testing.

**Keywords:** geosynthetic clay liner, freeze-thaw, hydraulic conductivity, acid mine drainage, mine cover

## 4.1 Introduction

Sulfide-bearing mine wastes exposed to water and oxygen can oxidize and generate acid mine drainage (AMD), which is typically characterized by low pH values and high sulfate and metal concentrations (e.g. Akcil & Koldas, 2006; Blowes et al., 2014; Moncur et al., 2005). Over the last decades, numerous methods were developed to prevent or control the production of AMD and thereby limit the associated environmental problems. However, at some older or abandoned mine sites, acid generation is already well underway. One method frequently used to mitigate AMD production at such sites is the construction of engineered covers over the mine wastes (Aubertin et al., 2016). The purpose of these covers is to control fluid (water and/or oxygen) movement into the reactive wastes and to reduce or eliminate the further production of contaminants. In most multi-layered engineered covers, one layer is made of a low saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) material that limits the percolation of water or the migration of oxygen. The materials commonly used for that layer are fined grained soils, low sulfide tailings and geomembrane, but they may not always be available or an economically viable solution.

Presently, geosynthetic clay liners (GCLs) are increasingly being considered as alternative low saturated hydraulic conductivity materials for engineered covers. The latter is manufactured in thin sheets (~5-10 mm) that consist of a layer of bentonite interlaid between two geotextiles. Many variations of GCLs exist, primarily in terms of the bentonite's mineralogy and grain size, the geotextiles used, and the bonding methods. However, the products most commonly used in North America contain a large proportion of sodium montmorillonite and are assembled using a needle-punching technique (Bradshaw et al., 2013; Jo et al., 2006; Kong et al., 2017; Lee & Shackelford, 2005; Petrov & Rowe, 1997b; von Maubeuge, 2002). Geosynthetic clay liners have been widely used in waste confinement facilities for two to three decades, particularly in municipal solid waste landfills. The interest in the material resides in its: ease of installation, ability to generally withstand greater differential settlements than natural low-permeability materials, high metal attenuation

capacity, low saturated hydraulic conductivity when permeated with water ( $k_{sat}$  typically on the order of  $10^{-9}$  cm/s), and ability to self-heal small cracks and perforations (Bouazza, 2002; Daniel et al., 1997; Eigenbrod, 2003a; Lange et al., 2007; Melchior, 2002; Sari & Chai, 2013; Sivakumar Babu et al., 2001).

The low  $k_{sat}$  and the self-healing potential of GCLs are mainly linked to the sodium montmorillonite content of the material. When sodium montmorillonite is exposed to water, layers of water molecules bound to the clay sheets they move away from each other as the number of layers increase. The pathway for free water to circulate through the Na-Mnt structure narrows is more tortuous (Jo et al., 2001; Mitchell & Soga, 2005; Petrov et al., 1997; Pradhan et al., 2015). An increase in volume and a decrease in hydraulic conductivity is then observed. However, when sodium montmorillonite is hydrated or permeated with a solution containing multivalent inorganic cations, such as in municipal solid waste leachates, the weakly bonded  $\text{Na}^+$  monovalent cations of the sodium montmorillonite are likely to be replaced by multivalent cations with greater strength of attraction with the montmorillonite sheets. The degree of cation exchange depends on the relative abundance of monovalent and multivalent cations in solution (RMD), while the kinetics are related to the ionic strength ( $I$ ) of the solution (Benson & Meer, 2009; Kolstad, Benson, & Edil, 2004). As  $\text{Na}^+$  ions are replaced, strong attractive forces between the multivalent cations and the montmorillonite sheets prevent the bonding of a large number of water layers on the clay sheets. This results in less swelling and higher hydraulic conductivities (Egloffstein, 2001; Mesri & Olson, 1971; Shackelford, 1994; Shackelford et al., 2000; Shackelford et al., 2010). Further information on the hydration of bentonite and cation exchange reactions can be found in Jo et al. (2001) and Kolstad, Benson et Edil (2004).

Acid mine drainage generally has lower pH values and greater concentrations of dissolved metals than municipal solid waste leachates. Therefore, transferring the application of GCLs from municipal solid waste facilities to the mining industry pushes the performance of the material beyond its well-documented and tested limits (Bouazza, 2018; Hornsey et al., 2010). Although literature on the properties of GCLs in a mining context are more frequent, research gaps still exist, particularly with respect to the application of GCLs in mine waste covers in cold climates. In these contexts, GCLs could not only be exposed to AMD (Kashir & Yanful, 2001; Lange et al., 2010; Liu et al., 2013; Shackelford et al., 2010) and wet-dry cycles (Bouazza et al., 2007; Bouazza, Vangpaisal, et al., 2006; Lin & Benson, 2000; Mazzieri et al., 2017; Rowe et al., 2011; Shan &

Yao, 2000), but also to freeze-thaw cycles (FTCs). Previous laboratory investigations on the effects of FTCs on the saturated hydraulic conductivity of GCLs were only conducted with deionized water (DIW) (Kraus et al., 1997; Podgorney & Bennett, 2006) or low ionic strength salt solution (Makusa et al., 2014). These studies concluded that the saturated hydraulic conductivity of GCLs was not adversely affected by FTCs. Some field-based studies have also evaluated the performance of engineered covers with GCL in cold climates: Renken et al. (2009) found that their tested cover did not freeze because of the insulative effect of the snowpack over the cover; Adu-Wusu et Yanful (2007) found that the  $k_{sat}$  was controlled by the consequences of the improper installation of the GCL, and thus the effect of FTCs could not be evaluated; and Hosney et Rowe (2013) tested conventional GCL covers installed above non-acid generating tailings. They found that the GCL with the thinner cover was more susceptible to wet-dry cycles and FTCs and showed higher  $k_{sat}$  values than the samples with covers thicker than the estimated frost penetration. However, the observed difference in  $k_{sat}$  values may have also been related to differences in confining pressure.

The main objective of the present study is to assess the effects of FTCs on the saturated hydraulic conductivity and swelling properties of a conventional GCL in the context of an engineered mine cover installed over acid-generating mine wastes. To reach this objective, permeability tests were conducted under low confining pressures after 3, 5, and 10 FTCs on three GCL specimens. One sample was permeated with DIW, in order to establish a benchmark and the other two samples were permeated with a synthetic acid mine drainage (SAMD) similar to AMD samples from a gold mine located in northern Québec (Canada). After the FTCs, the thickness of the GCL specimens and their hydraulic conductivities were assessed (to follow the swelling of the GCLs through the experiment).

## **4.2 Materials and methods**

### **4.2.1 Geosynthetic clay liners**

The geosynthetic clay liner tested in this study was a Texel TM600 NWSR. Rolls with the dimensions 4.72 m × 45.72 m were shipped to a nearby mine site for installation; a ± 3-meter long sample was taken from one of the rolls for laboratory investigation. The 3-meter long sample was divided into 45 cm × 45 cm sub-samples and stored in laboratory until testing. The bentonite lost

during the cutting of the sub-samples was recovered and used as a composite sample (hereafter referred to as “Bnt-Ref”) for bentonite analysis.

The tested GCL consisted of a layer of fine, granular bentonite interlaid between a non-woven and a reinforced non-woven geotextile that was assembled by a needle-punch process and thermally treated. The initial thickness of the GCL sample was measured at ten locations on various sub-samples and values ranged from 6.5 to 6.9 mm. The mass per unit area of the top and bottom geotextiles, as well as the oven-dried bentonite in the GCL, was evaluated on three specimens cut in the middle of the sub-samples. Average values of 240 g/m<sup>2</sup>, 260 g/m<sup>2</sup> and 5200 g/m<sup>2</sup> were obtained for the top, bottom, and bentonite samples, respectively.

The specific gravity ( $G_s$ ) of the geotextiles and the bentonite was measured using gas pycnometer (UltraPyc 1200e, Quantachrome Instruments) with an accuracy of  $\pm 0.045\%$ . The specific gravity of the geotextiles was measured on two specimens that were emptied of their bentonite content then cut in half for cleaning using compressed air. The obtained  $G_s$  values were 0.973 and 0.962. The  $G_s$  of the bentonite was measured on two sub-samples retrieved from the Bnt-Ref. A value of 2.51 was obtained for both sub-samples. The overall  $G_s$  of the GCL was estimated to be 2.20 based on the  $G_s$  measurements of the geotextiles and the bentonite, and the weight and dimensions of five dry specimens (see Chev  (2019) for more details).

Semi-quantitative X-ray diffraction (XRD) analyses were performed on two sub-samples of bentonite extracted from the Bnt-Ref sample. The results indicated that the bentonite contained an average of 65% smectite minerals ( $\pm 35\%$  montmorillonite and 30% beidellite), 15% quartz and cristobalite, 12% albite, 4% K-feldspar, 2 % calcite, and trace amounts of other minerals.

The initial water content of bentonite was measured on three sub-samples of the Bnt-Ref following the ASTM D2216 protocol. The initial moisture content varied from 6-7% by dry mass. The Atterberg limits were determined on four sub-samples of the Bnt-Ref following the CAN/BNQ 2501-092 protocol. The average plastic and liquid limits were 35% and 433%, respectively, which corresponds to an average plasticity index of 398%.

The bentonite contained in the GCL used in this study has a smectite content and a plasticity index on the lower end of values found in the literature for sodium bentonites contained in GCLs (montmorillonite contents of ~70-90% and plastic index of ~400-500%) and is similar to the “lower quality bentonite” tested by Lee et Shackelford (2005).

## 4.2.2 Permeant liquids

Tests were conducted on three GCL specimens (GCL1, GCL2, and GCL3) with two different permeant liquids (de-aired DIW and SAMD). Deionized water was used with GCL1 to establish benchmark results in which all changes in the saturated hydraulic conductivity could be attributed to freeze-thaw processes (Podgorney & Bennett, 2006). GCL2 and GCL3 were permeated with SAMD to represent a worst-case scenario; that is, a GCL that hydrates solely by the uptake of AMD leached from the underlying mine wastes. With the same logic, the samples permeated with SAMD were not prehydrated.

The SAMD was prepared based on chemical analyses of a reference AMD sample collected from an existing gold mine site. The water quality of the reference AMD sample is typical of other samples presented in the literature (e.g., Blowes et al., 2014; Lindsay et al., 2015). The SAMD was prepared using DIW, salts, dolomite, and nitrate solutions. The compounds used for the SAMD preparation and the average measured elemental concentrations are shown in Table 4-1. The SAMD had a pH of 2.4, high Fe and sulfate concentrations of 2.25 g/L and 9.06 g/L, respectively, and moderate concentrations of Al, Ca, Mn, and Zn ranging from 100-550 mg/L. The density of the SAMD was measured on four 10-mL samples and the average value was  $1.025 \pm 0.001 \text{ g/cm}^3$ .

Table 4-1 : Chemical and electrochemical properties of synthetic acid mine drainage (SAMD).

Parameter	Source in SAMD	SAMD
Aluminium (Al)	$\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	128 mg/l
Calcium (Ca)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	547 mg/l
Copper(Cu)	$\text{CuNO}_3$	7.6 mg/l
Iron (Fe)	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1930 mg/l
Magnesium (Mg)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	392 mg/l
Manganese (Mn)	$\text{MnNO}_3$	11.3 mg/l
Potassium (K)	$\text{KNO}_3$	7.8 mg/l
Sodium (Na)	$\text{NaNO}_3$	11.3 mg/l
S (S)	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Zn}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3020 mg/l
Zinc (Zn)	$\text{Zn}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	142 mg/l
pH	---	2.4
Redox potential (Eh)	---	744 mV
Electrical conductivity (EC)	---	8.7 mS
RMD	---	$0.004 \text{ M}^{1/2}$
Ionic strength	---	0.83 M

### 4.2.3 Permeability tests and freeze-thaw cycles

GCL1, GCL2, and GCL3 were prepared by cutting, with a precision knife, circular specimens with a diameter of  $100 \pm 1$  mm in the center of randomly selected sub-samples. DIW or SAMD was applied along the cutting line of the circular specimen to wet the bentonite at the edge and minimize bentonite loss during preparation.

The saturated hydraulic conductivity was determined in flexible-wall permeameters based on the ASTM D5887 (ASTM, 2016c) and ASTM D6766 (ASTM, 2012b) protocols for tests using DIW and SAMD, respectively. The permeability tests were conducted using the falling headwater rising tailwater elevation method. Low backpressure and effective stress were used during the permeability tests to simulate conditions representative of a GCL in a cover system (Makusa et al., 2014; Meer & Benson, 2007; Rowe & Hosney, 2013; Scalia & Benson, 2010) and to avoid a lower  $k_{sat}$  associated with the default pressures of the ASTM 6766 method (Conzelmann et al., 2017). An initial average effective stress of 27.5 kPa was applied to the specimen using a cell pressure of  $38 \pm 2$  kPa, a backpressure of  $3 \pm 2$  kPa, and a base pressure of  $18 \pm 2$  kPa. The corresponding initial hydraulic gradient was  $230 \pm 5$  (varied with the specimen thickness). The average effective stress and hydraulic gradient varied from 26.5 kPa to 31.1 kPa and from 90 to 235, respectively, because of the nature of the selected test protocol (falling headwater rising tailwater). This gradient is higher than the ones encountered in field conditions, but Shackelford et al. (2000) showed that elevated hydraulic gradient have a limited effect on the  $k_{sat}$  of GCLs. The uncertainty of the  $k_{sat}$  measurements are estimated to range from 30 to 50% (Daniel et al., 1997; Koerner, 2004).

Permeation of all specimens was carried out until ASTM D5887 flow rate ( $Q$ ) termination criteria were reached. For GCL2 and GCL3, which were permeated with SAMD, additional termination criteria related to chemical equilibrium were considered. These criteria were based on recommendations made by Shackelford et al. (1999) and the ASTM D6766 termination criteria, and consisted of an outflow to inflow electrical conductivity (EC) ratio ( $EC_{out}/EC_{in}$ ) and outflow to inflow pH ratio ( $pH_{out}/pH_{in}$ ) of  $1.0 \pm 0.1$ . In order to follow the evolution of these ratios, liquid samples were regularly collected from the outflow line of the flexible-wall permeameter for pH and EC analyses.

The saturated hydraulic conductivity was evaluated on a same specimen after 3, 5, and 10 FTCs according to the ASTM D6035 protocol (ASTM, 2013), which results in four permeability tests

per specimen, namely  $k_0$ ,  $k_3$ ,  $k_5$ , and  $k_{10}$ . The GCL specimens underwent one-dimensional freezing and thawing in a closed system (Boulangier-Martel et al., 2014). The freeze-thaw apparatus was equipped with a thermistor to measure the temperature at the bottom of the specimen. Freezing was performed in a temperature-controlled chamber (set at  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ) until the specimen reached at least  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ ; i.e., the temperature at which most of the structural changes in Na-bentonite associated with freezing are observed (Anderson & Hoekstra, 1965). Thawing took place at ambient room temperature ( $20 - 25\text{ }^\circ\text{C}$ ) until a value of at least  $3\text{ }^\circ\text{C}$  was reached. The time needed to perform a complete one-dimensional FTC varied between 6 and 12 hours depending on the water content of the specimen. Special care was taken to limit the time of exposure of GCL1 and GCL3 to ambient temperatures after a thaw cycle in order to avoid desaturation of the specimen, which might obscure the effects of the FTCs on the  $k_{sat}$ . However, GCL2 was exposed to ambient temperatures until a water content of  $\sim 60\%$  was reached after the 3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup>, and 10<sup>th</sup> thaw in order to evaluate the combined effects of FTCs and drying. The water content of 60% was selected because desiccation cracks are usually visible at this water content (Bouazza, Vangpaisal, et al., 2006; Meer & Benson, 2007) and this value is within the range of water contents that were measured in GCLs installed under 450 mm of soil cover in humid climates (Egloffstein, 2001; Melchior, 2002).

The diameter and height ( $h$ ) of the GCL specimens were also measured after the permeability tests and FTCs using a digital caliper with an accuracy of  $\pm 0.01\text{ mm}$ . Diameters were measured at four locations and heights at eight locations. Specimen were also weighed after the completion of a permeability test and at the end of each FTC.

#### 4.2.4 Chemical and thermodynamic equilibrium evaluation

The state of interaction between the SAMD and the bentonite was evaluated twice during permeation of GCL2 and GCL3; once at the end of  $k_0$  and once after  $k_{10}$ . Kashir et Yanful (2001) observed that the effluent from permeability tests on bentonites permeated with SAMD had similar chemistry to the pore fluids contained in the bentonite samples. The chemical composition of the effluents at the end of the  $k_0$  and  $k_{10}$  tests were used to evaluate the interactions happening in the GCL specimen at these times.

Chemical analyses of the effluent samples were performed by ICP-AES (precision of  $\pm 10\%$  for all elements except K, which has a precision of  $\pm 15\%$ ). Prior to analysis, samples were filtered at a pore size of  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  and acidified with  $\text{HNO}_3$  (2% total sample volume). Thermodynamic

equilibrium calculations were performed on the water quality results (ICP-AES and pH measurements) using VMinteq 3.1 (Gustafsson, 2018) assuming a temperature of 21 °C (ambient laboratory conditions). Calculated saturation indices (SI) were used to assess the saturation state of various secondary minerals, assuming that the system is at chemical equilibrium. Positive SI values indicate mineral precipitation, SI values near zero suggest an equilibrium between precipitation and dissolution of a mineral, and negative SI values correspond to mineral dissolution.

#### **4.2.5 Post-testing chemical and mineralogical analysis**

After the  $k_{10}$  test, GCL2 and GCL3 were oven-dried at 60 °C. This temperature was selected to limit potential mineralogical changes that could be induced by higher drying temperatures (Price, 2009). The geotextiles of the GCLs were subsequently removed and the remaining dry bentonite was crushed into 1-2 mm particles (or smaller).

Analyses by scanning electron microscope coupled with an energy dispersive spectrometer (SEM-EDS) were conducted on crushed bentonite samples from GCL2 and GCL3 (grains < 1 mm) and on a sub-sample from Bnt-Ref in order to determine the elemental composition of the smectites minerals before and after permeation with SAMD. The SEM-EDS system used was a Hitachi S-3500 N equipped with an Oxford X-Max 20-mm<sup>2</sup> silicon drift detector. Each sample was first mounted on a SEM sample stub and coated with a fine layer of carbon. The elemental composition of the smectite minerals was then analyzed on eight grains for GCL2 and four grains for GCL3 and Bnt-Ref. Analyses were performed with an accelerating voltage of 20 kV, a pressure in the chamber fixed at 25 Pa, and a working distance of approximately 15 mm.

Approximately 15 g of Bnt-Ref, GCL2, and GCL3 were also pulverized then analyzed by X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy to determine the elemental composition of the bentonite before and after permeation with SAMD.

#### **4.2.6 Gravimetric water content**

The gravimetric water content ( $\omega$ ) at the end of each permeability test and series of FTCs were back calculated using phase relationships based on their oven-dry mass after the  $k_{10}$  test. For GCL1, where DIW was used for permeation, calculations were straightforward. However, for GCL2 and GCL3, the calculation of  $\omega$  was more complex because the SAMD may have dissolved or

precipitated some minerals in the bentonite (Gates et al., 2009; Hornsey et al., 2010; Kashir & Yanful, 2001; Shackelford, 1994), thereby leading to variation in the mass of the solids during each permeability test. Moreover, the dissolved compounds in SAMD precipitated during drying and increased the dry mass (Bouazza et al., 2007).

The mass of precipitate accumulated in the sample during the drying process can be estimated using Equation 4-1 which was derived from Bouazza et al. (2007), assuming that no water remains trapped in the GCL after drying.

$$m_d = m_a + c \times m_w \quad (4-1)$$

Where  $m_d$  is the dry mass of the GCL (g);  $m_a$  is the actual mass of the GCL without the mass of precipitates generated due to drying (g);  $c$  is the salt concentration (g of salts / g of pure water = 0.025 based on the SAMD density); and  $m_w$  is the mass of pure water (g). Because the dry mass of the GCL after the  $k_0$ ,  $k_3$ , and  $k_5$  tests could not be determined, the actual mass could not be determined. Therefore, the actual mass of the GCL after the  $k_{10}$  test was used to calculate all the water contents of for GCL2 and GCL3.

## 4.3 Results and interpretation

### 4.3.1 Final saturated hydraulic conductivity

Figure 4-1 shows the measured  $k_{sat}$  values at the end of each permeability test as a function of the number of FTCs and the permeability test results are summarized in Table 4-2. The initial  $k_{0-sat}$  of GCL1 was  $1.6 \times 10^{-9}$  cm/s, which is typical for GCLs tested at similar low-pressure conditions (Kolstad, Benson, Edil, et al., 2004; Liu et al., 2015). Permeation with SAMD led to  $k_{0-sat}$  values at least one order of magnitude higher, with values of  $4.4 \times 10^{-8}$  cm/s and  $1.2 \times 10^{-8}$  cm/s for GCL2 and GCL3, respectively. After three FTCs, the  $k_{3-sat}$  of GCL1 remained nearly constant. However, the  $k_{3-sat}$  of GCL2, which was air-dried until a  $\omega$  of 61% after the third FTC, increased to  $2.3 \times 10^{-6}$  cm/s (52 times its  $k_{0-sat}$ ) while  $k_{3-sat}$  of GCL3 increased to  $3.2 \times 10^{-7}$  cm/s (26 times its  $k_{0-sat}$ ). These values are 200-1400 times greater than the  $k_{sat}$  of GCL1. Additionally, there was a one order of magnitude of difference between GCL2 and GCL3. For all GCL specimens, variations within less than  $\frac{1}{2}$  order of magnitude were measured between the permeability tests conducted after 3, 5, and 10 FTCs. However, after three FTCs, a difference of at least two orders of magnitude was observed

between the  $k_{sat}$  of specimens permeated with DI and SAMD. The largest difference (three orders of magnitude) was observed for GCL2, where FTCs were combined with punctual desaturation to water contents of 61%, 63%, and 59%.

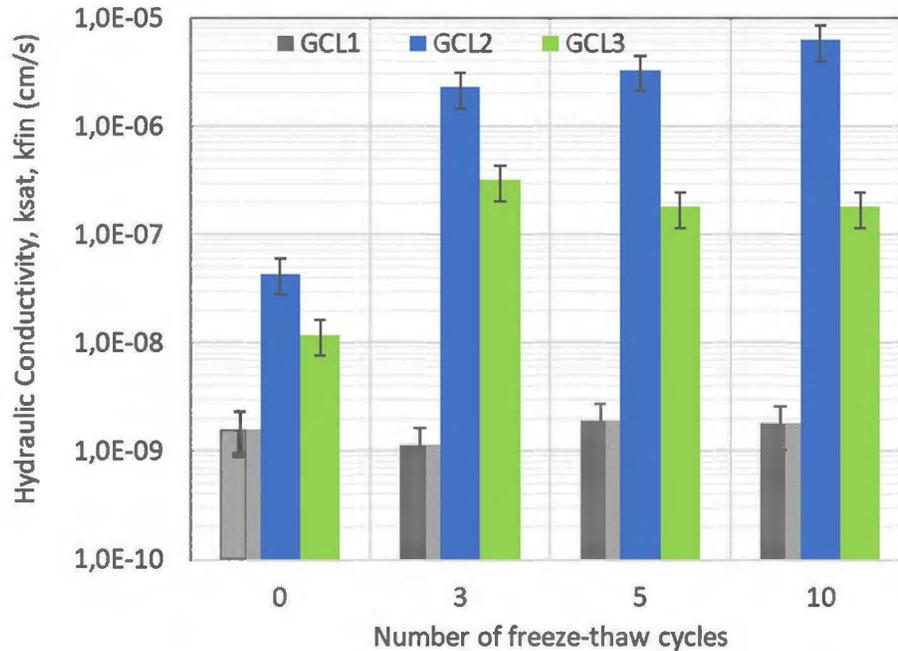


Figure 4-1: Hydraulic conductivity of GCLs permeated with DIW (GCL1) and SAMD (GCL2 and GCL3) as a function of the number of FTCs.

### 4.3.2 Thickness variations

The average thicknesses of GCL1, GCL2, and GCL3 samples after the FTCs and permeability tests are presented in Table 4-2. Changes in the average thicknesses from the dry state are shown in Figure 4-2. All values correspond to the arithmetic mean of the eight measurements taken on a specimen. The standard error of the average thickness measurements ranged from 0.06-0.11 mm for GCL1, 0.02-0.03 mm for GCL 2, and 0.04-0.09 mm for GCL3.

Table 4-2 : Permeability test (k test) results.

Specimen (Permeant)	# FTC	Test Duration			Termination criteria			Thickness		Saturated properties		
		# PVF / k test	Cumulative # PVF	Cumulative days	Q <sub>out</sub> /Q <sub>in</sub>	EC <sub>out</sub> /EC <sub>in</sub>	pH <sub>out</sub> /pH <sub>in</sub>	h <sub>initial</sub> (mm)	h <sub>final</sub> (mm)	ω <sub>sat</sub> (%)	k <sub>sat</sub> (cm/s)	k <sub>sat</sub> / k <sub>ref</sub>
GCL1 (DIW)	0	1.3	1.3	26.4	1.00	n/a	n/a	6.5	9.9	133%	1.6 x 10 <sup>-9</sup>	1
	3	0.3	1.6	43.0	0.92	n/a	n/a	10.4	11.0	150%	1.2 x 10 <sup>-9</sup>	1
	5	0.1	1.7	48.3	0.93	n/a	n/a	11.2	11.2	152%	1.9 x 10 <sup>-9</sup>	1
	10	0.2	1.9	60.8	1.00	n/a	n/a	11.6	11.7	164%	1.8 x 10 <sup>-9</sup>	1
GCL2 (SAMD)	0	35.5	35.5	55.3	0.97	0.97	1.71	6.7	8.2	84%	4.4 x 10 <sup>-8</sup>	30
	3	7.4	42.9	59.1	0.97	1.00	1.30	8.5	8.2	72%	2.3 x 10 <sup>-6</sup>	1420
	5	5.2	48.1	59.2	0.99	1.01	1.25	8.3	7.9	71%	3.3 x 10 <sup>-6</sup>	2030
	10	10.2	58.3	59.3	1.06	0.97	1.25	8.0	7.6	75%	6.3 x 10 <sup>-6</sup>	3880
GCL3 (SAMD)	0	22.1	22.1	54.3	0.99	1.00	1.67	6.8	8.1	87%	1.2 x 10 <sup>-8</sup>	10
	3	20.7	42.8	57.8	1.01	0.98	1.69	7.9	7.8	75%	3.2 x 10 <sup>-7</sup>	200
	5	21.7	64.4	64.0	1.05	1.03	1.61	7.9	7.7	75%	1.8 x 10 <sup>-7</sup>	110
	10	18.7	83.1	66.3	1.06	0.98	1.41	7.8	7.6	78%	1.8 x 10 <sup>-7</sup>	110

Notes :

# FTC : Number of freeze-thaw cycles completed before the k test.

# PVF : Number of pore volume of flow (details in section 4.3.3)

h<sub>initial</sub> : Sample thickness before the permeability test

h<sub>final</sub> : Sample thickness before at the end of the permeability test

k<sub>ref</sub> : k<sub>sat</sub> of GCL1 before freeze-thaw cycles (k<sub>0 sat</sub> = 1.6 x 10<sup>-9</sup> cm/s)

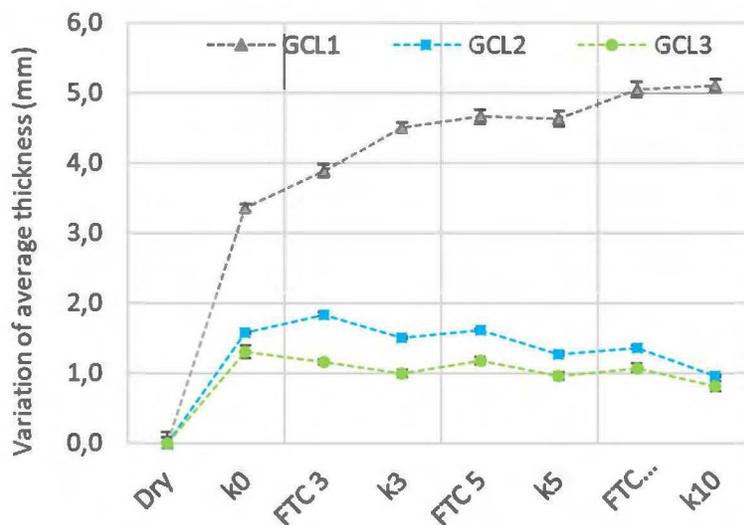


Figure 4-2 : Variation in the average thicknesses of the GCLs after permeability tests and FTCs for samples permeated with DI (GCL1) and SAMD (GCL2 and GCL3).

The average dry thickness of the three GCL specimens was similar, with values ranging from 6.5 to 6.8 mm. The initial swelling, from dryness to the initial saturated state ( $k_{0-sat}$ ) was more than two times greater for GCL1 than for GCL2 and GCL3, with an increase of 3.4 mm compared to 1.3 mm and 1.5 mm, respectively. Saturated and nearly-saturated GCL specimens swelled during the FTCs regardless of the permeating fluid. The only exception was noted for GCL3 after three FTCs, when a slight decrease in the thickness was observed.

Variations in the specimen thickness from the first to the last permeability test followed opposite trends for specimens permeated with DI and SAMD. While no changes or additional swelling were observed for GCL1, decreases in thickness were observed for GCL 2 and GCL3. Similarly, after the first series of FTCs, the overall trend for GCL1 was to thicken over the course of the permeability tests and FTCs, while GCL2 and GCL3 generally contracted.

### 4.3.3 Permeability tests duration

The permeability tests were carried out until termination criteria were reached independently of the number of pore volumes of flow (#PVF) passing through the specimens. A single pore volume of flow varied from 57-73 cm<sup>3</sup> for GCL1 and from 39-44 cm<sup>3</sup> for GCL2 and GCL3. The out/in flow and EC ratios at the end of each test are indicated in Table 4-1, and the evolution of the ratios and

the hydraulic conductivity as a function of the PVF are illustrated in Figures 4-3 and 4-4. All 12 permeability tests conducted on GCL1, GCL2, and GCL3 were complied with the ASTM flow-related termination criteria. However, while the out/in EC ratio criterion of  $1.0 \pm 0.1$  was met for all permeability tests on GCL2 and GCL3, none of the tests met the out/in pH ratio criterion of  $1.0 \pm 0.1$ , even after 58 and 83 PVF (59 d and 66 d, respectively). Therefore, the pH ratio was abandoned as termination criterion after the persistence of a plateau at a value of 1.6 during the  $k_0$  test on GCL2.

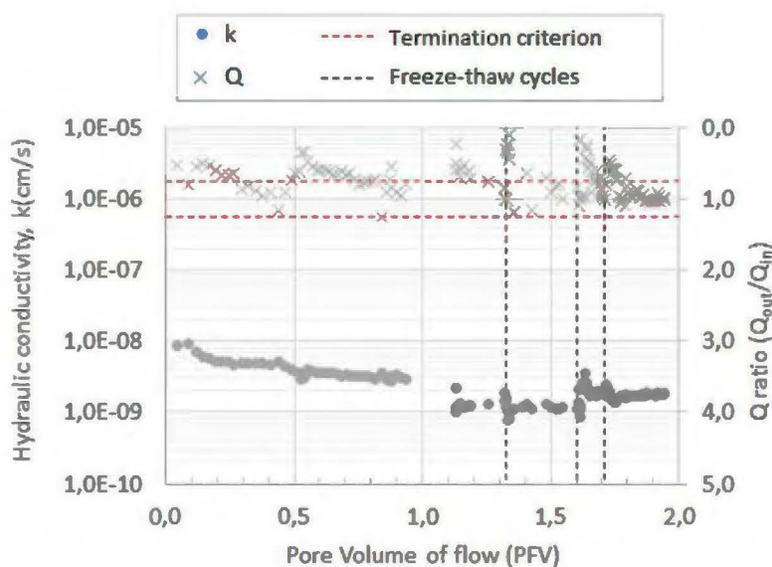


Figure 4-3 : Evolution of hydraulic conductivity ( $k$ ) and out/in ratios of flow ( $Q$ ) as a function of pore volumes of flow (PVF) for a) GCL1

The initial permeability test  $k_0$  was completed after 1.3 PVF (26.4 d) for GCL1. The missing data in Figure 4-3 from 0.7 to 1.1 PVF corresponds to a leak in the effluent line that caused an underestimation of the outflow volume. For the  $k_0$  tests on GCL2 and GCL3, stabilization and respect of the  $Q$  and EC ratio termination criteria occurred at approximately 15 PVF. The test performed on GCL2 was extended for 20 more PVF to observe if the pH ratio would eventually decrease, however, this did not occur. The test was then stopped.

The permeability tests  $k_3$  and  $k_5$  on GCL1 were completed within 0.3 and 0.1 PVF, respectively. Such short durations were expected because of the already high degree of saturation ( $S_r$ ) of the

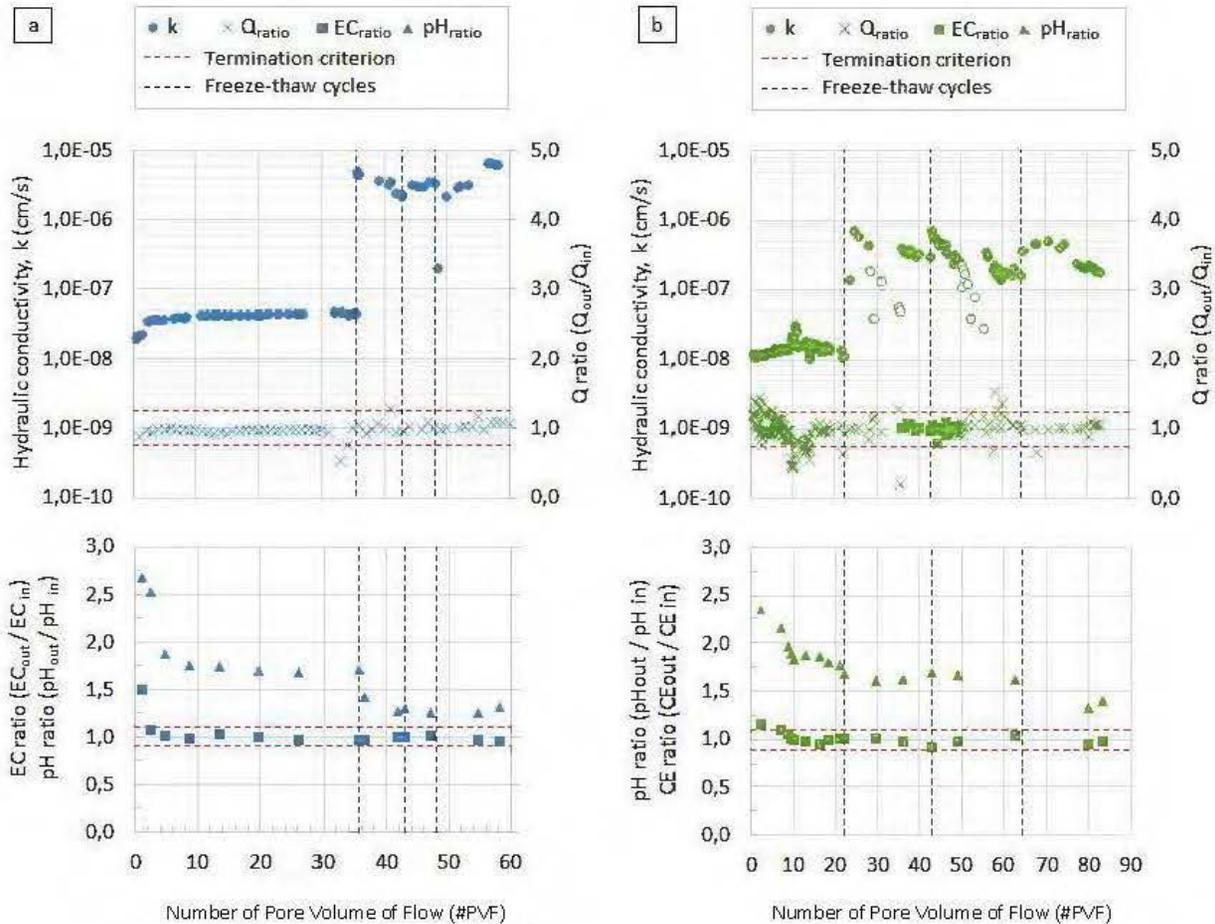


Figure 4-4 : Evolution of hydraulic conductivity ( $k$ ) and out/in ratios of flow ( $Q$ ), electrical conductivity ( $EC$ ) and  $pH$  as a function of the number of pore volumes of flow (#PVF) for: a) GCL2 and b) GCL3. Open circles correspond to a clogged system.

specimen after FTC 3 and 5. During permeability tests  $k_3$  and  $k_5$ , respectively 7.4 and 5.2 PVF passed through GCL2 and 20.7 and 21.7 PVF passed through GCL3. For the  $k_3$  and  $k_5$  tests on GCL3, a decrease in the hydraulic conductivity was observed. This was caused by precipitates clogging the porous stone of the flexible-wall permeameters. In both cases, gradual clogging and system re-stabilization after the replacement of porous stone lasted approximately 7 PVF.

The  $k_{10}$  permeability tests lasted 0.2, 10.2, and 18.2 PVF for GCL1, GCL2, and GCL3, respectively. The final  $S_r$  values of all specimens after the  $k_{10}$  tests were estimated to be greater than 95% based on the calculated actual mass. The  $Q$  and  $EC$  ratio termination criteria were always reached at the end of all permeability tests, as indicated in Table 4-1.

The full series of permeability tests on the GCL specimens lasted around 60 days, but the cumulative PVF having circulated through the specimens varied from 1.9 (GCL1 with DI water) to 58-83 (GCL2 and GCL3 with SAMD). The large difference in volume passing through GCL2 and GCL3 compared to GCL1 over a similar period of time reflects the difference in hydraulic conductivity induced by the two different permeants.

#### 4.3.4 Evolution of outflow pH and EC

For GCL2 and GCL3 involving permeation with SAMD, the evolution of the pH and EC ratios was monitored during permeability tests as an indicator of the chemical equilibrium. These ratios are illustrated as a function of the PVF in Figure 4-4a (GCL2) and Figure 4-4b (GCL3). The same patterns of variations were observed for the two specimens. In general, there were no discontinuities observed in the ratios before and after a series of FTCs. Therefore, the chemical changes that happened during the permeability tests are considered to be independent of the FTCs.

The pH ratios of GCL2 and GCL3 both started at values greater than 1. They rapidly decreased during the early PVF until they reached an initial plateau around 1.7 (pH ~ 4.1). Subsequently, a second plateau was established around 1.3-1.4 (pH ~ 3.1-3.5) and lasted until the end of the  $k_{10}$  tests. These final ratios, greater than  $1 \pm 0.1$ , indicate that chemical equilibrium was not fully reached by the end of the last permeability test, after 58 to 83 PVF. The pH ratio plateau of  $\pm 1.7$  occurred earlier in the permeation process of GCL2 than GCL3 and lasted around 25 PVF compared to 55 PVF for GCL3. The hydraulic conductivity of GCL2 and GCL3 did not vary when the outflow pH changed from 4.1 to 3.1.

Electrical conductivity ratios started at values greater than 1, then decreased rapidly to values near 1. An EC ratio of  $1 \pm 0.1$  was reached after 2.4 PVF for GCL2 and after 8.8 PVF for GCL3. EC ratios remained relatively stable for the remainder of the tests.

#### 4.3.5 Chemical and mineralogical evolution

Table 4-3 shows the average elemental composition of the initial and post-test smectites as determined by SEM-EDS analyses. Montmorillonite and beidellite could not clearly be differentiated during SEM-EDS analysis, thus the results were grouped under the more general

term “smectites”. Table 4-4 shows the proportions of selected elements in the bentonite samples before and after permeation with SAMD.

Table 4-3 : Average elemental compositions of smectite minerals (in wt%) measured by SEM-EDS analyses.

Source of smectites	Al	Ca	Fe	Mg	Na	Si	S
Bnt-Ref	16.9	0.5	2.7	1.2	0.4	28.3	0
GCL2 (after $k_{10}$ )	12.8	1.6	5.6	1.7	0.2	29.0	1.4
GCL3 (after $k_{10}$ )	13.6	0.9	7.5	1.5	0.3	29.5	1.1

Table 4-4 : Average elemental compositions of the overall bentonite (in wt%) measured by XRF analyses.

Source	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Si
Bnt-Ref	10.2	1.0	2.6	0.5	1.3	1.4	27.6
GCL2 (after $k_{10}$ )	9.8	0.9	3.9	0.4	1.2	0.4	25.9
GCL3 (after $k_{10}$ )	9.6	1.2	4.3	0.4	1.3	0.3	25.6

SEM-EDS analyses of smectite minerals in the Bnt-Ref sample indicated average Na and Ca contents of 0.4% and 0.5%, respectively (Table 4-3). This corresponds to 17 and 13 cmol/kg and thus a greater number of Na atoms than Ca atoms in the initial smectites, as expected for Na-bentonite. Permeation with SAMD affected the chemical composition of the smectites. While the mass fraction of Na and Al in smectites were smaller in GCL2 and GCL3 than in the Bnt-Ref by 20-25% and 25-35%, respectively, the mass fraction of Ca, Fe, and Mg were greater by 65-200%, 110-180%, and 30-45%, respectively (Table 4-3). The SEM-EDS analyses also suggest that S accumulated within the smectites during the tests (1.1-1.4% increase).

Smectite minerals initially represented approximately 65% of all minerals in the bentonite. However, the variations observed in the elemental composition of the smectites (Table 4-3) do not correspond to 65% of the variation in the overall elemental composition of the bentonite (Table 4-4). For example, for GCL2 and GCL3, the decrease in Al in the smectites (-3.3 to -4.1 wt%) is 10 times greater than the decrease observed in the bentonite at the end of the  $k_{10}$  tests (-0.35 %). These differences may be attributable to the reactions of the other minerals

contained in the bentonite with the SAMD and to the accumulation of secondary minerals during permeation.

Table 4-5 shows the chemical compositions of the effluents of GCL2 and GCL3 at the end of  $k_0$  and  $k_{10}$ . Thermodynamic equilibrium calculations were performed with VMinteq 3.1 using these data. The calculated saturation indices, which indicate which secondary minerals have the potential to precipitate and to dissolve at various states of the permeation with SAMD, are shown in Table 4-6.

Table 4-5 : Chemical composition of the effluents measured by ICP-AES

Effluent	#PVF	pH	Eh (mV)	Concentration (mg/L)						
				Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	S
$k_0$ GCL2	35.5	4.2	535	122	493	1680	5.2	421	20.4	2680
$k_0$ GCL3	22.1	4.1	459	115	493	1970	13.4	484	37.9	3020
$k_{10}$ GCL2	58.8	3.1	564	320	497	1960	1.09	407	12.5	3040
$k_{10}$ GCL3	83.1	3.5	498	277	486	1680	1.93	395	14.4	2960

Table 4-6 : Saturation indices for potential mineral phases in the bentonite at the end of the  $k_0$  and  $k_{10}$  tests.

Mineral	Formula	Saturation Index (SI)*			
		$k_0$ GCL2 (pH = 4.2)	$k_0$ GCL3 (pH = 4.1)	$k_{10}$ GCL3 (pH = 3.5)	$k_{10}$ GCL2 (pH = 3.1)
Jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	12.4	12.9	10.4	8.7
Natrojarosite	$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	n/d	7.8	5.8	4.2
Hydronium jarosite	$(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	6.3	6.9	5.4	4.4
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$	6.7	6.5	5.4	4.6
Lepidocrocite	$\gamma\text{-FeOOH}$	5.9	5.8	4.7	3.9
Alunite	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	4.2	3.6	0.6	-1.6
Ferrihydrite	$\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$	2.2	2.1	1.0	0.2
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.05	0.11	0.06	0.03
Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-0.1	-0.6	-1.8	-2.9
Boehmite	$\text{AlOOH}$	-1.0	-1.5	-2.7	-3.7
Al-hydroxysulfate	$\text{Al}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_{10} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-1.4	-3.3	-7.1	-10.3
Al-hydroxide (am)	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-3.2	-3.7	-4.9	-5.9

\* SI > 0 : Solution oversaturated, tendency for precipitation of the mineral

SI < 0 : Solution undersaturated, tendency for dissolution of the mineral

At pH values around 4 (pH ratio of  $\sim 1.7$ ), Fe-hydroxides (OH), Fe-oxyhydroxides (OOH), and Fe-hydroxysulfates ( $\text{SO}_4\text{OH}$ ) were oversaturated, while Al-OH, Al-OOH and Al- $\text{SO}_4\text{OH}$  were near equilibrium or undersaturated, except for alunite. In general, as pH decreased, SI decreased for all minerals. At pH 3.1 (pH ratio of  $\sim 1.3$ ), SI for all Fe-OOH and Fe- $\text{SO}_4\text{OH}$  minerals still have the potential to precipitate, while the SI for ferrihydrite was close to equilibrium. At slightly lower pH values SI became negative. In contrast, for the same pH, SI for all Al minerals remained negative (-2.9 to -10.3). Visual observation of the bentonites in GCL2 and GCL3 showed an ochre coloration, also suggesting the precipitation of secondary Fe minerals such as those listed in Table 4-6.

Complementary information about the evolution of the elemental composition of bentonite permeated with SAMD can be obtained from the chemical composition of the effluents, which are presented in Table 4-5. Differences in the Na concentrations of the effluent at the end of  $k_0$  (20.4-37.9 mg/l) and  $k_{10}$  (12.5-14.4 mg/l) suggest that cation exchanges and/or dissolution of Na-bearing minerals was greater towards the beginning of the tests. Additionally, Ca concentrations in the effluents (493-497 mg/l) at the end of the  $k_0$  and  $k_{10}$  tests on GCL2 and GCL3 were lower than in the influent (547 mg/l). This suggests an accumulation of Ca in the bentonite from at least the end of  $k_0$ , which is consistent with the differences observed in the composition of the smectites (Table 4-3).

## 4.4 Discussion

### 4.4.1 Conceptual explanation for the combined effect of SAMD and FTCs on the saturated hydraulic conductivity

Previous studies about the effects of FTCs on GCLs and bentonite reported the development of small, randomly oriented lenses of segregated ice in frozen bentonite (Kraus et al., 1997) that cause frost-induced cracks in the material (Eigenbrod, 2003a; Kraus et al., 1997). When these cracks do not close during thawing and subsequent permeation, they provide preferential flowpaths among the material, causing an increase in the hydraulic conductivity (Eigenbrod, 2003a). Generally, for fine-grained soils, cracks induced by frost can be overcome by the application of a stress level sufficient to close the joints in fractured soils during and after thawing (Eigenbrod, 2003a). In the case of Na-bentonite permeated with DIW, the cracks can also be overcome by the high swelling

pressure developed by the material that is associated with its high swelling capacity (Eigenbrod, 2003a). However, the swelling capacity of bentonite decreases as the concentration of multivalent cations in its structure increases because of the strong attractive forces between the multivalent cations and the Mnt sheets. Previous experiments conducted on soil-Ca-bentonite mixtures have demonstrated increases in the materials' saturated hydraulic conductivities by a factor of 50 to 100 times after five FTCs because of a lack of self-healing (Eigenbrod, 2003a). These observations can also be linked to those of Karland et al. (2006) who noted swelling pressures of a Ca-bentonite that were 3-4 times smaller than those of a Na-Bentonite at similar dry densities for dry densities lower than  $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$ .



Figure 4-5 : Cracks in GCL specimens permeated with DIW – under free-swell permeation conditions (details in Chev e, 2019). a) Frozen at  $\approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . b) Thawed at the ambient temperature of  $\approx 21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In the present study, an increase of specimen thickness was observed between the beginning and the end of a series of FTCs. Moreover, specimens coming from the same sample as the one used in this study that went under 3D freeze-thaw cycles showed changes in their physical structure. These changes were primarily induced by the formation of ice lenses (Figure 4-5a) as well as the persistence of fine cracks in the bentonite after thawing (Figure 4-5b). Based on these observations, it is assumed that frost-induced cracks formed in all GCLs during frost, and that they did not entirely close during thawing, thus causing an increase in hydraulic conductivity. Despite this, no increase in  $k_{sat}$  was noted for GCL1 throughout all FTCs and permeability tests. Therefore, it is likely that sufficiently high confining pressures and/or swelling pressures developed during the permeability tests with DIW and healed previously developed cracks. Similar findings were also reported by Kraus et al. (1997) and Podgorney et Bennett (2006). On the other hand, the chemical and mineralogical data obtained for GCL2 and GCL3 (Table 4-3 and Table 4-4) suggest that cation exchanges occurred during permeation with SAMD and that the monovalent  $\text{Na}^+$  cations of smectites were largely replaced by multivalent cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+/3+}$ , and  $\text{Mg}^{2+}$ ). Therefore, the

self-healing potentials of GCL2 and GCL3 were greatly diminished before the first series of FTCs. In the case of GCL3, the one order of magnitude increase in the saturated hydraulic conductivity after three FTCs (Figure 4-1) was likely due to the development of fine cracks in the bentonite during the frost of the specimen, not totally self-healed during the subsequent thaw phase nor permeability test. Insufficient self-healing is attributed to the development of swelling pressure too low to close the frost-induced cracks, because of the exchange of monovalent cations for multivalent ones. Finally, the decrease in specimen thickness observed after the permeability tests suggests that the low confining pressure used during the tests was sufficient to tighten the structure of the cracked bentonite but insufficient to close the cracks completely.

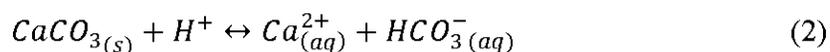
Several studies have investigated the relationships between drying, wet-dry cycles, and GCLs' properties (Rowe et al., 2011; Shan & Yao, 2000; Villar & Lloret, 2008), as well as the combined effects of cation exchanges and wet-dry cycles on the swelling and hydraulic conductivity of GCLs (Bouazza et al., 2007; Bouazza, Vangpaisal, et al., 2006; Egloffstein, 2001; Lin & Benson, 2000; Mazzieri et al., 2017; Meer & Benson, 2007). In these studies, desiccation cracks were observed when the water content of the GCLs dropped below a certain point. Thus, many authors note the necessity of having self-healing mechanisms similar to those described for frost-induced cracks, to close desiccation-induced cracks. They also showed that as wet-dry cycles and cationic exchange between  $\text{Na}^+$  cations of the bentonite and multivalent cations of the permeant progressed, the saturated hydraulic conductivity gradually increased. Closure of the desiccation cracks formed during drying decreased as the number of cycles increased because of the progressive decrease in the swelling capacity of the bentonite due to cationic exchanges.

In the present study, GCL2 was dried to an estimated actual water content of 59-63% after the 3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup>, and 10<sup>th</sup> thaw. As shown in Figure 4-1, a difference of one order of magnitude persisted between  $k_{\text{fin}}$  of GCL2 and  $k_{\text{fin}}$  of GCL3, from  $k_3$  to  $k_{10}$ . It is presumed that the desaturation of GCL2 at the end of each series of FTCs induced desiccation cracks in addition to the pre-existing frost cracks, which increased the number of preferential pathways among the specimen. These additional cracks would likely not have healed either, for the same reasons as for GCL3, thus resulting in a higher saturated hydraulic conductivity.

#### 4.4.2 Conceptual explanation of geochemical reactions between the bentonite and synthetic acid mine drainage

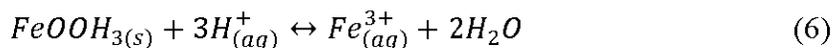
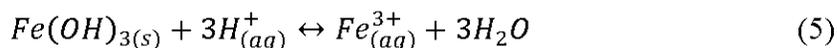
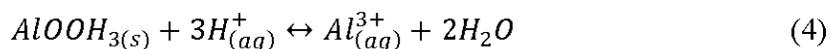
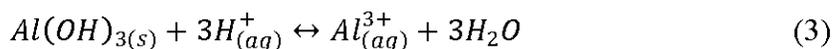
The electrochemical, chemical, and mineralogical results show that, in addition to the cation exchanges observed within the smectites, the interaction between the bentonite of GCL2 and GCL3 and the AMD followed a typical pH-buffering sequence associated with geochemical reactions observed during the neutralization of AMD with low pH and high Fe and  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations. For more detailed information on the pH-buffering mechanisms of AMD, refer to Blowes et al. (2014), Blowes et al. (1994), and Nordstrom (1999).

Reactions between carbonate minerals and AMD, such as calcite in Equation  $\text{CaCO}_{3(s)} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}_{(aq)}^{2+} + \text{HCO}_3^-$  (2) are relatively fast and have the potential to buffer the pH to circumneutral values (pH 5-7) as long as these minerals are available for dissolution.



Once carbonate minerals are depleted, a pronounced drop of pH is observed until equilibrium is reached with the next most soluble minerals.

At circumneutral pH values, the precipitation of metal hydroxides and oxyhydroxides are favored. However, as pH values decrease, these secondary minerals often redissolve and become a source of acid neutralization (Equations 3 to 6). Equilibrium with Al-OH and Al-OOH minerals buffers the pH at values between 4.0-4.5, and when these minerals are consumed, the pH drops further. Equilibrium with Fe-OH and Fe-OOH minerals then arise, and pH is buffered to values between 2.5-3.5.



Silicate minerals can dissolve simultaneously with carbonates, Al-OH/OOH, and Fe-OH/OOH and contribute to neutralisation of AMD by consuming  $\text{H}^+$  and releasing cations (e.g.  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,

Mg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>). However, their dissolution is usually too slow to buffer the pore water to a certain pH.

In the present study, calcite was identified by XRD as a component of the bentonite (3 wt%). The pH of the outflow of GCL2 and GCL3 was greater than 5 (pH ratio > 2.1) from the beginning of the test to ±3 PVF, and a rapid drop in pH was later observed (Figure 4-4). Thus, it is likely that calcite dissolved during the early PVF, but that its buffering capacity was short-lived due to the limited amount of calcite in the bentonite.

A first pH plateau was obtained at pH of 4.0-4.4 (pH ratio of 1.7-1.8) throughout the permeation with SAMD for both GCL2 and GCL3. This plateau is associated with the equilibrium of the SAMD with Al-OH/OOH minerals that could have precipitated and accumulated during the first PVFs. Indeed, the SI obtained for Al-bearing minerals at pH values of 4.1-4.2 (Table 4-6) were close to 0, and the concentrations of Al measured in the effluent at these pH values were similar to those measured in the SAMD. At the end of the pH of ± 4 plateau, a rapid drop in pH was observed for both GCL2 and GCL3. Concentrations of Al measured in the effluents at lower pH values were considerably greater than in the inflowing SAMD, indicating a switch from equilibrium conditions to conditions favoring the dissolution of Al-bearing minerals.

The  $k_{10}$  test on GCL3 ended at a pH of 3.5 (pH ratio of 1.4), while the  $k_{10}$  test on GCL2 ended at a pH of 3.2 (pH ratio of 1.3). In the case of GCL2, the  $k_{10}$  test ended along a plateau of pH values varying from 3.0-3.2 (pH ratio of ~ 1.3) that started to develop at the end of the  $k_3$  test (Figure 4-4). This plateau is associated with an equilibrium with Fe-OH/OOH minerals, which likely accumulated since the beginning of the first permeability test. Notably, an ochre coloration (typical of secondary Fe-oxyhydroxides) was observed in the bentonite at the end of  $k_0$  test for both GCL2 and GCL3. Results obtained from thermodynamic equilibrium calculations (Table 4-6) show that the SI of Fe-bearing minerals all decreased with pH but remained positive at pH > 3. Only ferrihydrite had an SI close to 0 at pH 3.1, which suggests a tendency towards equilibrium during the second pH plateau observed for GCL2. Results from XRF analyses of bentonite (Table 4-4) indicated a greater mass percentage of Fe in GCL3 than in GCL2, which may either be due to a greater accumulation of Fe in the bentonite of GCL3 or a more advanced dissolution of Fe-bearing secondary minerals in GCL2.

Some silicate minerals in the bentonite appear to have dissolved due to permeation with SAMD. For instance, the decrease in the mass fraction of Na in the bentonite (-1.0%; Table 4-4) was greater than for the smectites (~-0.1%; Table 4-3), which suggests the dissolution of albite, the only other Na-bearing mineral identified by XRD analysis.

Based on these results, the  $\text{pH}_{\text{out}}/\text{pH}_{\text{in}}$  ratio termination criterion of  $1.0 \pm 0.1$  that was initially established (corresponding to an outflow pH of 2.2-2.6) could only be attained after the depletion of Fe-OH/OOH minerals. Considering the state of geochemical reactions for GCL2 and GCL3 after 60-80 PVF, it is expected that a pH ratio of  $1.0 \pm 0.1$  could only be reached given significantly longer-term duration tests under these conditions.

Lange et al. (2007), Mazzieri et al. (2013), and Shackelford et al. (2010) conducted studies on bentonite permeated with SAMD and documented the evolution of outflow to inflow pH ratios, but none obtained a succession of drops and plateaus similar to those observed in the present study. For Lange et al. (2007) and Mazzieri et al. (2013), experiments were ended after  $\pm 20$  PVF, with final pH values of 4.4 and 4.1, respectively. Similar pH values were obtained after 20 PVF, in the present study, which suggests that those experiments may have been ended during the pH-buffering phase controlled by Al-oxide minerals. Shackelford (2010) reached an outflow pH of approximately 2.6 for two GCL samples hydrated with SAMD (pH = 2.5) for 21 days, then permeated with the same SAMD for  $\pm 18$  PVF. The pH values were given from the end of the hydration phase and corresponded to pH of 3.0-3.8, so the presence of a pH plateau around 4 during the hydration phase is unknown. The SAMD used by Shackelford (2010) had high concentrations of Mg (1400 mg/L), Zn (1800 mg/L), and sulfate (6900 mg/L), but low concentrations of Al (31 mg/L) and Fe ( $\text{Fe}^{2+}$ , 420 mg/L) compared to the present study. Potassium and sodium were not added during the preparation of their SAMD. Given their SAMD, the conditions needed for precipitation of Fe-(oxy)hydroxides may not have been encountered. This could potentially explain the absence of a pH-buffering plateau around pH 3.0, as well as the reach of pH ratios of  $1.0 \pm 0.1$ .

#### **4.4.3 Potential effect of metal precipitation on hydraulic conductivity**

The saturated hydraulic conductivities obtained for GCL2 and GCL3 at the end of  $k_0$  tests were  $4.4 \times 10^{-8}$  cm/s and  $1.2 \times 10^{-8}$  cm/s, respectively (Table 4-2). These values are lower than those encountered in the literature ( $\sim 10^{-7}$  to  $10^{-5}$  cm/s) for GCLs permeated with acidic solutions, SAMD,

or low-RMD and high-ionic strength solutions, without pre-hydration with DIW (Jo et al., 2001; Kolstad, Benson, Edil, et al., 2004; Liu et al., 2015; Liu et al., 2018; Shackelford et al., 2010).

Peterson et Gee (1985) observed a decrease in the hydraulic conductivity of clay specimens permeated with SAMD (pH = 2) containing high concentrations of Al, Fe, and sulfate. It was suggested that minerals could have precipitated while the pH was buffered, which resulted in pore clogging and contributed to the decrease in hydraulic conductivity. Precipitation of Al minerals in a GCL was also noted by Benson et al. (2008) as a probable cause for pore clogging and consequently, of decrease of hydraulic conductivity, for a low-quality GCL permeated with a hyperalkaline leachate. The lower-than-expected saturated hydraulic conductivity values obtained in this study may be attributed, at least in part, to pore clogging of the bentonite contained in GCL2 and GCL3.

## 4.5 Summary and Conclusions

Permeability tests were conducted on three GCL specimens to evaluate their saturated hydraulic conductivity before FTCs, and after 3, 5, and 10 FTCs. GCL1 was permeated with DIW, while GCL2 and GCL3 were permeated with a SAMD with low pH and high concentrations of Fe and sulfate. Special care was taken to avoid the desaturation of GCL1 and GCL3 during the FTCs, while GCL2 was exposed to ambient temperatures until it reached a water content of 60-65% after the 3<sup>rd</sup>, 5<sup>th</sup>, and 10<sup>th</sup> thaw.

The  $k_{sat}$  values of GCL1 were not affected by FTCs and varied between  $1.2 \times 10^{-9}$  and  $1.9 \times 10^{-9}$  cm/s at the end of each  $k$  test. However, SAMD and FTCs affected the performance of GCL2 and GCL3. Their  $k_{sat}$  values were  $4.4 \times 10^{-8}$  and  $1.8 \times 10^{-8}$  cm/s, respectively, at the end of their first permeability test, but these values increased by a factor of 52 and 26, respectively, after three FTCs. After ten FTCs, GCL2 had a  $k_{sat}$  of  $6.3 \times 10^{-5}$  cm/s and GCL3,  $1.8 \times 10^{-7}$  cm/s. Thus, when compared to the GCL permeated with DIW, permeation with SAMD increased the  $k_{sat}$  of the GCLs by a factor of 10 to 30. The combined effects of SAMD and FTCs (GCL3) induced an increase in the  $k_{sat}$  of 2 orders of magnitude, and the combined effects of SAMD, FTCs and periodic desaturation increased the  $k_{sat}$  by at least 3 orders of magnitude (GCL2). While FTCs and desaturation seemed to induce cracks in the GCLs, swelling of bentonite and its capacity to self-heal the cracks were reduced by permeation with SAMD.

For GCL2 and GCL3, the equilibrium between the inflowing SAMD and the outflow of the flexible wall permeameter was still not reached after 58-83 PVF and 59-66 days. However, electrochemical results showed that the bentonite neutralized the SAMD throughout permeation and pH-buffering reactions resulted in plateaus around pH values of 4 and 3. These buffering reactions were ascribed to the dissolution of Al and Fe (oxy)hydroxides minerals that should have precipitated during the previous PVFs. The precipitation of secondary minerals may also have clogged pores in the bentonite and affected the measured  $k_{sat}$  values from as early as before the first series of FTCs. However, the impacts of permeation of a GCL with the SAMD at longer terms than those tested are unknown.

The findings from this study show that, at contrary to GCLs permeated with DIW or low ionic strength salt solution, the hydraulic conductivity of a conventional GCL can be affected by FTCs when permeated in the context of an engineered mine cover installed over acid-generating mine wastes (i.e., low confining stress, permeation with SAMD). In most cases of engineered mine covers installed in cold regions, it is not economically viable to protect the low-permeability part of the cover from FTCs. The design of such a mine cover with a conventional GCL should avoid contact between the GCL and acidic pore waters with high ionic strength salt solution. The possible combined effects of hydrating liquid, permeating liquid, FTCs, and desaturation on the performance of the GCL and the cover overall should be taken into account. The results presented in this paper are specific to the combination of the GCL and SAMD used for this experiment and to ideal laboratory conditions. More work is needed to validate these laboratory observations with in situ samples that are exposed to more realistic conditions.

### **Acknowledgements**

Funding for this study was provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) in the form of a Research Grant awarded to the second author. The authors also express their appreciation to Vincent Boulanger-Martel and Gary Schudel from the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue for their constructive comments on the manuscript.

## References

- Adu-Wusu, C., Yanful, E.K., 2007. Post-closure investigation of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal* 44, 496-506.
- Akcil, A., Koldas, S., 2006. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of cleaner production* 14, 1139-1145.
- Anderson, D.M., Hoekstra, P., 1965. Migration of Interlamellar Water During Freezing and Thawing of Wyoming Bentonite 1. *Soil Science Society of America Journal* 29, 498-504.
- ASTM, 2012. D6766-12 Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM, 2013. D6035/D035 M Standard Test Method for Determining the Effect of Freeze-Thaw on Hydraulic Conductivity of Compacted or Intact Soil Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM, 2016. D5887 /D5887M-16 Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M., Mbonimpa, M., 2016. Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites, *Geo-Chicago 2016*, pp. 343-358.
- Benson, C., Meer, S.R., 2009. Relative abundance of monovalent and divalent cations and the impact of desiccation on geosynthetic clay liners. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 135, 349-358.
- Benson, C., Wang, X., Gassner, F., Foo, D., 2008. Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with an aluminum residue leachate. *GeoAmericas 2008*, International Geosynthetics Society.

Blowes, D.W., Frind, E.O., Johnson, R.H., Robertson, W.D., Molson, J.W., Ptacek, C.J., 1994. Acid-neutralization reactions in inactive mine tailings impoundments and their effect on the transport of dissolved metals. Government Printing Office, United States.

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: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier, Oxford, pp. 131-190.

Bouazza, A., 2002. Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes* 20, 3-17.

Bouazza, A., 2018. Geosynthetics Clay Liners : Pushing the Application Boundaries, but how Far? Proceedings of the Symposium 2018 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, QC, Canada.

Bouazza, A., Jefferis, S., Vangpaisal, T., 2007. Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes* 25, 170-185.

Bouazza, A., Vangpaisal, T., Jefferis, S., 2006. Effect of wet-dry cycles and cation exchange on gas permeability of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132, 1011-1018.

Boulanger-Martel, V., Bussière, B., Côté, J., 2014. Laboratory evaluation of crushed rock-bentonite hydro-geotechnical properties, Proceedings of the 67th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, Canada.

Bradshaw, S.L., Benson, C., Scalia, J., 2013. Hydration and Cation Exchange during Subgrade Hydration and Effect on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139, 526-538.

Chevé, N., 2019. Évaluation de la performance de géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue.

Conzelmann, J., Scalia IV, J., Shackelford, C.D., 2017. Effect of Backpressure Saturation on the Hydraulic Conductivity of GCLs, *Geotechnical Frontiers* 2017, pp. 227-235.

Daniel, D.E., Bowders, J.J., Gilbert, R.B., 1997. Laboratory hydraulic conductivity testing of GCLs in flexible-wall permeameters, Testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. ASTM International.

Egloffstein, T.A., 2001. Natural bentonites—influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes* 19, 427-444.

Eigenbrod, K., 2003. Self-healing in fractured fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal* 40, 435-449.

Gates, W.P., Bouazza, A., Churchman, G.J., 2009. Bentonite clay keeps pollutants at bay. *Elements* 5, 105-110.

Gustafsson, J.P., 2018. Visual MINTEQ 3.1 KTH, Department of Land and Water Resources, Stockholm, Sweden.

Hornsey, W.P., Scheirs, J., Gates, W.P., Bouazza, A., 2010. The impact of mining solutions/liquors on geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes* 28, 191-198.

Hosney, M.S., Rowe, R.K., 2013. Changes in geosynthetic clay liner (GCL) properties after 2 years in a cover over arsenic-rich tailings. *Canadian Geotechnical Journal* 50, 326-342.

Jo, H.Y., Benson, C.H., Edil, T.B., 2006. Rate-limited cation exchange in thin bentonitic barrier layers. *Canadian Geotechnical Journal* 43, 370-391.

Jo, H.Y., Katsumi, T., Benson, C.H., Edil, T.B., 2001. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127, 557-567.

Karland, O., Olsson, S., Nilsson, U., 2006. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Kashir, M., Yanful, E.K., 2001. Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage. *Canadian Geotechnical Journal* 38, 1034-1048.

Koerner, G.R., 2004. Geosynthetic Institute's Efforts In Accreditation and Certification, Proceedings of Symposium Honoring the Research Achievement of Dr. Robert M. Koerner, Philadelphia, PA, GII Press, pp. 204-215.

Kolstad, D., Benson, C., Edil, T., Jo, H., 2004a. Hydraulic conductivity of a dense prehydrated GCL permeated with aggressive inorganic. *Geosynthetics International* 11, 233-241.

Kolstad, D.C., Benson, C.H., Edil, T.B., 2004b. Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130, 1236-1249.

Kong, D.-J., Wu, H.-N., Chai, J.-C., Arulrajah, A., 2017. State-Of-The-Art Review of Geosynthetic Clay Liners. *Sustainability* 9, 2110.

Kraus, J.F., Benson, C.H., Erickson, A.E., Chamberlain, E.J., 1997. Freeze-thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123, 229-238.

Lange, K., Rowe, R., Jamieson, H., 2007. Metal retention in geosynthetic clay liners following permeation by different mining solutions. *Geosynthetics International* 14, 178-187.

Lange, K., Rowe, R., Jamieson, H., 2010. The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems. *Geotextiles and Geomembranes* 28, 199-205.

Lee, J.-M., Shackelford, C.D., 2005. Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering* 131, 64-77.

Lin, L.-C., Benson, C.H., 2000. Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126, 40-49.

Lindsay, M.B.J., Moncur, M.C., Bain, J.G., Jambor, J.L., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., 2015. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry* 57, 157-177.

Liu, Y., Bouazza, A., Gates, W.P., Rowe, R.K., 2015. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners to sulfuric acid solutions. *Geotextiles and Geomembranes* 43, 14-23.

Liu, Y., Gates, W.P., Bouazza, A., 2013. Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes* 36, 71-80.

Liu, Y., Wang, L.Z., Jiang, W., 2018. Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners with Mining Solutions. 430-436.

Makusa, G.P., Bradshaw, S.L., Berns, E., Benson, C.H., Knutsson, S., 2014. Freeze–thaw cycling concurrent with cation exchange and the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Canadian Geotechnical Journal* 51, 591-598.

Mazzieri, F., Di Emidio, G., Fratolocchi, E., Di Sante, M., Pasqualini, E., 2013. Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate. *Geotextiles and Geomembranes* 40, 1-11.

Mazzieri, F., Di Emidio, G., Pasqualini, E., 2017. Effect of wet-and-dry ageing in seawater on the swelling properties and hydraulic conductivity of two amended bentonites. *Applied Clay Science* 142, 40-51.

Meer, S.R., Benson, C.H., 2007. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 133, 550-563.

Melchior, S., 2002. Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers, *Clay Geosynthetics Barriers, Proceedings of the international symposium IS Nuremberg*, pp. 321-330.

Mesri, G., Olson, R.E., 1971. *Mechanisms Controlling the Permeability of Clays*.

Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons New York.

Moncur, M., Ptacek, C., Blowes, D., Jambor, J., 2005. Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry* 20, 639-659.

Nordstrom, D.K., 1999. Geochemistry of acid mine waters. The environmental geochemistry of mineral deposits.

Peterson, S.R., Gee, G.W., 1985. Interactions between acidic solutions and clay liners: permeability and neutralization, *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*. ASTM International.

Petrov, R.J., Rowe, R.K., 1997. Geosynthetic clay liner (GCL) - chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Canadian Geotechnical Journal* 34, 863-885.

Petrov, R.J., Rowe, R.K., Quigley, R.M., 1997. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123, 683-695.

Podgorney, R.K., Bennett, J.E., 2006. Evaluating the long-term performance of geosynthetic clay liners exposed to freeze-thaw. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 132, 265-268.

Pradhan, S.M., Katti, K.S., Katti, D.R., 2015. Evolution of Molecular Interactions in the Interlayer of Na-Montmorillonite Swelling Clay with Increasing Hydration. *International Journal of Geomechanics* 15.

Price, W.A., 2009. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. MEND report 1, 579.

Renken, K., Yanful, E., Mchaina, D.M., 2009. Field performance evaluation of soil-based cover systems to mitigate ARD for the closure of a potentially acid-generating tailings storage facility.

Rowe, R.K., Bostwick, L.E., Take, W.A., 2011. Effect of GCL Properties on Shrinkage When Subjected to Wet-Dry Cycles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137, 1019-1027.

Rowe, R.K., Hosney, M.S., 2013. Laboratory investigation of GCL performance for covering arsenic contaminated mine wastes. *Geotextiles and Geomembranes* 39, 63-77.

Sari, K., Chai, J., 2013. Self healing capacity of geosynthetic clay liners and influencing factors. *Geotextiles and Geomembranes* 41, 64-71.

Scalia, J., Benson, C.H., 2010. Preferential flow in geosynthetic clay liners exhumed from final covers with composite barriers. *Canadian Geotechnical Journal* 47, 1101-1111.

Shackelford, C.D., 1994. Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity, Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil. ASTM International.

Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B., Lin, L., 2000. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes* 18, 133-161.

Shackelford, C.D., Malusis, M.A., Majeski, M.J., Stern, R.T., 1999. Electrical conductivity breakthrough curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125, 260-270.

Shackelford, C.D., Sevick, G.W., Eykholt, G.R., 2010. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. *Geotextiles and Geomembranes* 28, 149-162.

Shan, H.-Y., Yao, J.-T., 2000. Measurement of air permeability of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes* 18, 251-261.

Sivakumar Babu, G.L., Sporer, H., Zanzinger, H., Gartung, E., 2001. Self-Healing Properties of Geosynthetic Clay Liners. *Geosynthetics International* 8, 461-470.

Villar, M.V., Lloret, A., 2008. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science* 39, 38-49.

Von Maubeuge, K., 2002. Investigation of bentonite requirements for geosynthetic clay barriers. *Clay Geosynthetic Barriers-Zanzinger, Koerner & Gartung (eds), pgs.(155-163).*

## CHAPITRE 5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES ET DISCUSSION

Le chapitre 4 a présenté les principaux résultats d'essais de perméabilité réalisés sur des GCB hydratés avec du DMAS à de faibles pressions de confinement et soumis à des cycles de gel-dégel. Toutefois, d'autres essais ont également été réalisés sur des échantillons de GCB afin d'évaluer l'effet de la pression de confinement sur la conductivité hydraulique, l'effet du liquide hydratant sur les propriétés de rétention d'eau du matériau, ainsi que l'effet du liquide hydratant sur le  $D_e$ . Ces résultats seront présentés dans les sections qui suivent.

### 5.1 Essais de perméabilité complémentaires

#### 5.1.1 Effets de la méthode ASTM et de la pression de confinement

Des essais de perméabilité ont été réalisés préalablement à ceux décrits au chapitre 4, lors du développement des essais de perméabilité modifiés. Ces essais visaient principalement à évaluer l'effet de la pression de confinement et de la méthode ASTM utilisée sur les résultats obtenus. Les résultats des essais de perméabilité complémentaires sont présentés au tableau 5-1, ainsi que les résultats présentés au chapitre 4, pour fin de comparaison. Il est à noter que l'essai sur l'échantillon GCB16 a été réalisé à volume d'échantillon constant (« docked specimen »), ce qui a limité le gonflement de l'échantillon et induit des pressions verticales n'ayant pu être mesurées.

Les résultats présentés au tableau 5-1 indiquent que l'utilisation des pressions de la norme ASTM (GCB 7 et 8) mène à des conductivités hydrauliques saturées de  $\frac{1}{2}$  à 1 ordre de grandeur plus faibles que lorsque des pressions modifiées sont utilisées (GCB 18, 23 et 24), ainsi qu'à une différence d'épaisseur d'au moins 1 mm (12 %). Tel qu'attendu, l'utilisation de la méthode C (charge variable) comparativement à la méthode A (charge constante) ne semble pas avoir une influence significative sur les valeurs de  $k_{sat}$  mesurées. En effet, des résultats similaires devraient être obtenus avec toutes les méthodes utilisant des contraintes de confinement similaires (ASTM, 2016a, 2016c).

Tableau 5-1 : Essais de perméabilité complémentaires

Échantillon	Liquide hydratant	Méthode ASTM	Pressions de confinement	$\sigma'_v$ (kPa)	$k_{sat}$ (cm/s)	$h_{finale}$ (mm)	$S_r$ (%)	Durée (PVF)
GCB 7	Eau DI	Charge constante	ASTM	27,5	$6,9 \times 10^{-10}$	8,5	98	0,6
GCB 8	Eau DI	Charge constante	ASTM	27,5	$2,9 \times 10^{-10}$	8,4	? <sup>(1)</sup>	0,5
GCB13	Eau DI	Charge constante	Modifiées	27,5	$6,5 \times 10^{-10}$ <sup>(2)</sup>	9,5	88 <sup>(2)</sup>	0,4
GCB 16	Eau DI	Charge variable	Inconnues	26,2 à 29,6	$1,1 \times 10^{-9}$	7,2	99	2,0
GCB 18	Eau DI	Charge constante	Modifiées	27,5	$3,9 \times 10^{-9}$	9,5	98	1,2
GCB 23	Eau DI	Charge constante	Modifiées	27,5	$4,3 \times 10^{-9}$	9,6	98	1,7
GCB 24	Eau DI	Charge variable	Modifiées	26,5 à 29,9	$1,6 \times 10^{-9}$	9,6	100	1,3
GCB 20	DMAS	Charge variable	Modifiées	22,3 à 31,1	$1,1 \times 10^{-8}$	7,7	95	14,0
GCB 21	DMAS	Charge variable	Modifiées	27,9 à 31,1	$1,2 \times 10^{-8}$	8,1	99	22,1
GCB 22	DMAS	Charge variable	Modifiées	26,6 à 30,5	$4,4 \times 10^{-8}$	8,2	98	35,5

Notes :

- $\sigma'_v$  : contrainte effective moyenne;  $h_{finale}$  : épaisseur finale de l'échantillon.
- Les GCB # 21, 22 et 24 correspondent respectivement au GCL3, 2 et 1 décrits au chapitre 4.
- Les pressions « ASTM » correspondent à celles prescrites aux normes ASTM D5887 et D6766.
- Les pressions modifiées sont celles présentées à la section 3.3.1.

<sup>(1)</sup> Critères d'achèvement atteints mais masse sèche non mesurée.

<sup>(2)</sup> Critères d'achèvement non atteints ( $Q_{out}/Q_{in} \neq 1 \pm 0,25$ ).

### 5.1.2 Essais de perméabilité sur le GCB20

Un essai de perméabilité a été réalisé sur le GCB 20, avec du DMAS issu des lots #3 et #4, afin de valider les manipulations à réaliser dans le cadre des essais utilisant du DMAS. Les pierres poreuses utilisées lors de la réalisation de l'essai ont été saturées à l'eau déionisée plutôt qu'au DMAS. Les débits entrants en sortant ainsi que les paramètres électrochimiques ont été suivis lors de l'essai de perméabilité réalisé sur cet échantillon. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5-1.

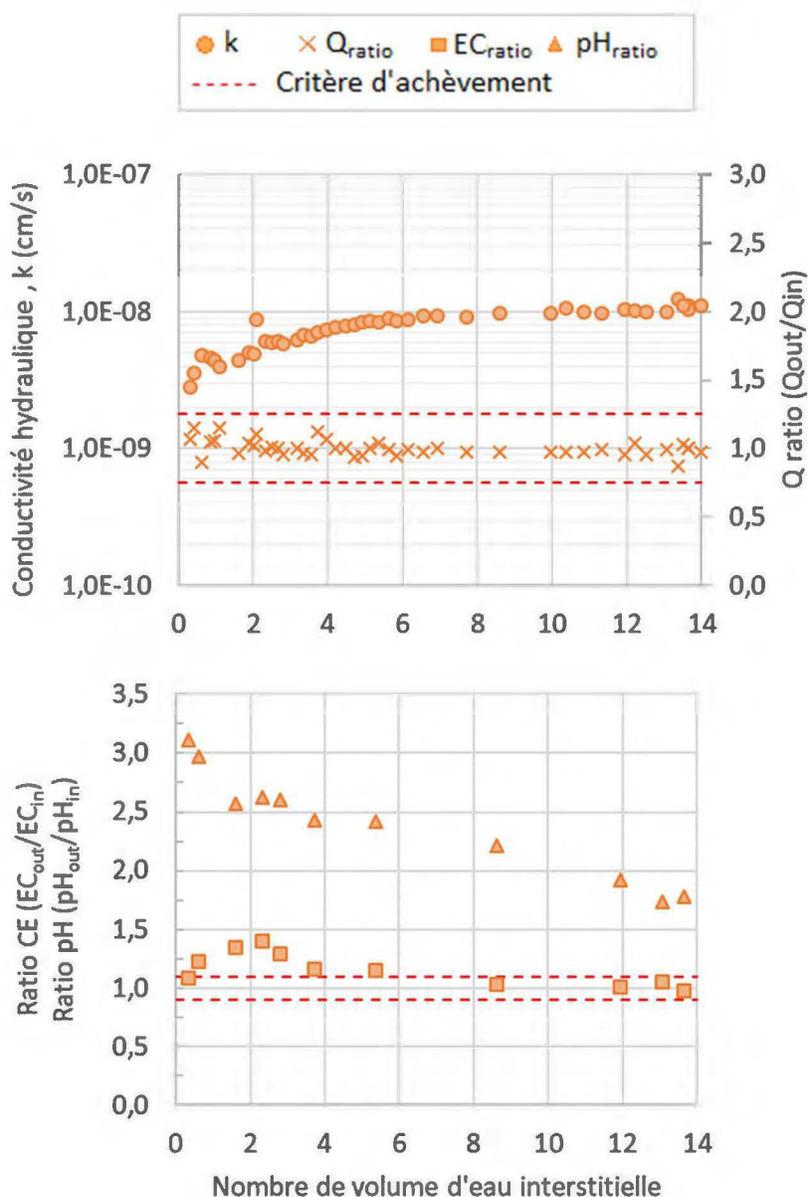


Figure 5-1 : Évolution de la conductivité hydraulique et des ratios de débit, conductivité électrique et pH en fonction du nombre de volume d'eau interstitielle ayant circulé dans l'échantillon

Pour cet échantillon, les critères d'achèvement reliés au débit ainsi qu'au ratio de conductivité électrique ont été atteints après 14 PVF. Le pH mesuré à la sortie du perméamètre était alors de 4.3 (ratio de pH de 1.8). Tout comme pour les GCB21 et GCB22, le premier plateau de pH n'était pas encore clairement développé après 14 PVF.

Les ratios de pH et de CE du GCB20 en fonction des PVF diffèrent de ceux observés pour le GCB21 et GCB22, pendant les 2 premiers PVF environ. En effet, les ratios de pH sont plus élevés que ceux présentés au chapitre 4 (ratio de 3,1 comparativement à 2,2-2,8), et les ratios de CE augmentent en début d'essai au lieu de diminuer. Ces différences sont attribuées au fait que les pierres poreuses utilisées pendant l'essai étaient initialement saturées en eau déionisée, ce qui aurait fait en sorte que le liquide percolant au travers du GCB lors des premiers PVF était un mélange d'eau déionisée et de DMAS. La réaction initiale entre ce mélange et la bentonite du GCB20 a donc pu entraîner un ratio de pH sortant plus élevé et une mise en solution d'ions différente de celle subie initialement par les GCB21 et GCB22. À partir de 2 PVF, les résultats obtenus pour les GCB 20, 21 et 22 sont similaires, ce qui laisse supposer que la majorité de l'eau déionisée a été évacuée du système et que le comportement en lien avec une perméation au DMAS était prédominant.

Une analyse à la XRF a été réalisé sur un échantillon de bentonite provenant du GCB 20 après l'essai de perméabilité. Les proportions massiques en divers éléments sont présentées au tableau 5-2, ainsi que les résultats de Bnt-Ref et des GCB21 et 22 pour fins de comparaison.

Tableau 5-2 : Composition élémentaire de la bentonite après hydratation au DMAS

Échantillon	Pourcentage massique (wt%)							
	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Mn
Bnt-Ref	27,56	10,19	2,61	1,29	0,97	1,40	0,45	0,02
GCB20	26,22	9,63	3,57	1,26	0,86	0,59	0,47	0,02
GCB22 (après $k_{10}$ )	25,85	9,84	3,92	1,21	0,89	0,36	0,42	0,01
GCB21 (après $k_{10}$ )	25,57	9,63	4,15	1,18	1,15	0,33	0,40	0,01

Les pourcentages massiques obtenus pour le GCB20 sont généralement situés entre ceux de la bentonite non hydratée (Bnt-Ref) et les échantillons au travers desquels ont circulés de 60 à 80 PVF (GCB 21 et GCB 22), ce qui est cohérent pour un échantillon où 14 PVF de DMAS ont circulé.

Finalement, des échantillons liquides ont été prélevés à l'entrée et à la sortie du perméamètre, à la fin de l'essai de perméabilité. Les résultats obtenus par ICP-AES sont présentés au tableau 5-3.

Les concentrations à l'effluent du GCB20 sont généralement similaires à ceux présentés au tableau 4-5, à la fin des premiers essais de perméabilité  $k_0$  sur les GCB20 et 21. La principale différence réside au niveau de la concentration en Al à l'effluent du GCB20, qui est 10 fois plus faible que

Tableau 5-3 : Composition chimique à l’affluent et à l’effluent du perméamètre (GCB20)

Échantillon	pH	Eh	Concentration (mg/l)						
			Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	S
GCB 20 - affluent	2.4	629	127	509	1950	2,80	351	6,13	3030
GCB 20 - effluent	4.3	429	11,2	452	1420	12,6	366	26,5	2550

celle mesurée à l’effluent des GCB22 (GCL2) et GCB21 (GCL3), alors que le pH ne présente une différence que de 0,1. Cette importante différence de concentration en Al pour une faible variation de pH illustre bien la transition des index de saturation (SI) des Al-OH et Al-OOH, allant du positif au négatif à des pH près de 4.

## 5.2 Courbe de rétention d’eau

Un des objectifs des recouvrements d’ingénierie construits pour contrôler le DMA est de réduire le flux d’oxygène vers les rejets miniers sous-jacents grâce au maintien d’une des couches à un  $S_r$  élevé, ou de limiter la percolation de l’eau vers ces rejets grâce à un matériau ayant un faible  $k_{sat}$ . Dans ce travail, la couche de contrôle du mouvement des fluides est le GCB, qui doit être hydraté pour agir efficacement comme barrière aux fluides. Ainsi, il est important de connaître la capacité de rétention d’eau du GCB lorsqu’hydratée par de l’eau déionisée ou du DMAS.

Afin de déterminer la CRE d’échantillons de GCB hydratés à l’eau déionisée et au DMAS, la méthode de l’extracteur à pression a été utilisée pour de faibles succions (0-1,2 MPa), tandis que les méthodes du WP4C et des solutions salines ont été utilisées à de plus grandes succions (1-300 MPa). Les sections qui suivent présentent les résultats obtenus à l’aide de chaque type d’essai, ainsi que les courbes de rétention d’eau globales pour chaque type d’hydratation.

### 5.2.1 Essais à l’extracteur à pression

Les essais à l’extracteur à pression ont été réalisés sur deux échantillons de GCB hydratés à l’eau déionisée. Le GCB 7 a été hydraté en utilisant les pressions prescrites par la norme ASTM D5887, tandis que le GCB 18 a été hydraté avec la méthode modifiée, soit en utilisant de faibles pressions de confinement (section 3.3.1). Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux 5-4 et 5-5 et illustrés à la figure 5-2.

Tableau 5-4 : Résultats d'essai à l'extracteur à pression – GCB7

Essai	Durée (h)	Succion matricielle, $\psi_m$ (kPa)	Masse finale (g)	Épaisseur finale (mm)	Teneur en eau, $\omega$ (%)	Indice des vides, $e$	Degré de saturation, $S_r$ (%)
7-0	0	0	93,1	8,5	128%	2,88	97%
7-1	52,0	14	100,5	9,2	146%	3,20	100%
7-2	111,8	139	93,7	9,2	129%	3,20	89%
7-3	75,7	300	92,3	9,2	126%	3,20	86%
7-4	94,7	627	90,7	9,0	122%	3,09	87%
7-5	93,8	1000	80,1	8,5	96%	2,90	73%
7-6*	63,0	1380	79,0*	8,5	93%	2,88	71%

\* Essai incomplet : masse de l'échantillon non stabilisée. Point non illustré à la figure 5-2.

Tableau 5-5 : Résultats d'essai à l'extracteur à pression – GCB18

Essai	Durée (h)	Succion matricielle $\psi_m$ (MPa)	Masse finale (g)	Épaisseur finale (mm)	Teneur en eau, $\omega$ (%)	Indice des vides, $e$	Degré de saturation, $S_r$ (%)
18-0	0	0	109,1	9,5	114%	3,02	100%
18-1	210,4	0,100	106,7	9,4	109%	3,00	100%
18-2	171,1	0,508	103,0	9,6	102%	3,07	92%
18-3*	197,8	1,175	104,5*	9,6	105%	3,06	95%

\* Essai problématique : la masse humide stabilisée obtenue en fin de palier est supérieure à celle du palier de pression précédent. Essai non illustré à la figure 5-2.

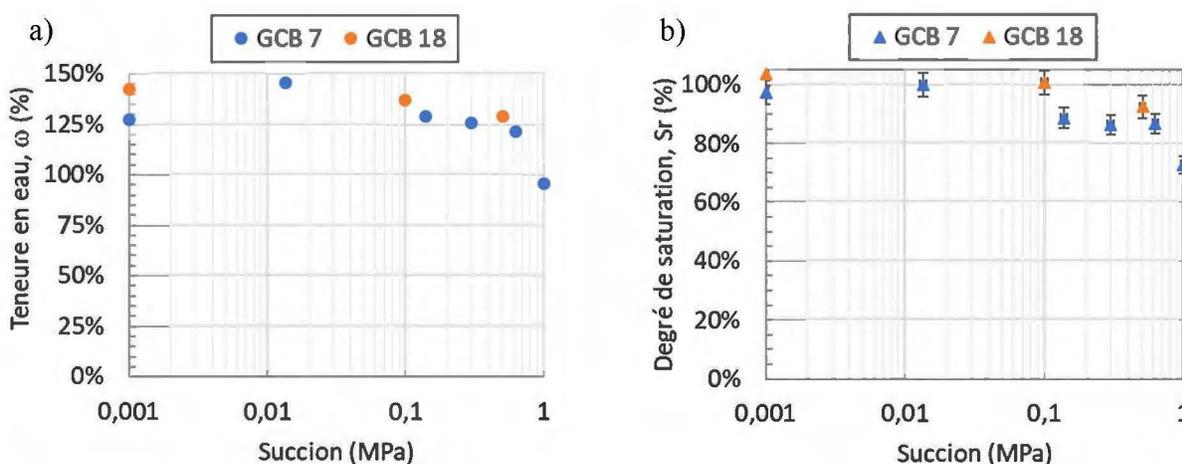


Figure 5-2 : Courbes de rétention d'eau obtenues par essais à l'extracteur à pression exprimées en a) teneur en eau massique et b) degré de saturation

Une importante augmentation de la masse (+7,4 g) et de l'épaisseur (+0,7 mm) du GCB7 a été observée entre le début et la fin du premier palier de pression réalisé à une succion de 14 kPa. Puisque le seul apport en eau du système était l'eau déposée sur la membrane de l'extracteur afin de la saturer, il est supposé que le gain de masse soit attribuable à l'absorption d'eau par l'échantillon. De plus, le gonflement du GCB 7 avait été limité lors de son hydratation, par l'application de pressions élevées. L'apport en eau de la membrane combiné à l'absence de pression de confinement de l'échantillon dans l'extracteur à pression a pu permettre un gonflement supplémentaire de la bentonite, se traduisant par un gain d'épaisseur. Autrement, pour le GCB7, un changement de pente est observé tant au niveau des teneurs en eau (figure 5-2a) que du degré de saturation (figure 5-2b) entre le 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> palier de pression (627 kPa et 1000 kPa).

Un gain de masse de 1,5 g a également été observé pour le GCB18, lors de l'essai réalisé à une succion de 1175 kPa. Ce gain de masse pourrait également être attribuable à l'ajout d'eau sur la membrane de l'extracteur à pression. Toutefois, contrairement au GCB7, l'application d'une succion élevée n'a pas permis l'évacuation de cette eau additionnelle. Cela pourrait être causé par le développement d'un bris de capillarité entre la bentonite du GCB18 et le géotextile du GCB.

Les CRE exprimées en termes de  $S_r(\psi)$  sont relativement similaires pour le GCB7 et le GCB18. Les différences observées pourraient être attribuables, entre autres, à la combinaison de deux phénomènes rapportés dans la littérature. Dans un premier temps, lors de l'hydratation d'un GCB, la bentonite a tendance à venir remplir les vides contenus dans les géotextiles non tissés adjacents. Plus la pression exercée lors de l'hydratation est importante, et plus la bentonite aura tendance à remplir les vides du géotextile et y gonfler (Bouazza & Vangpaisal, 2004; Gibbs & Gates, 2014; Stark, 1998). Ensuite, le contraste de propriétés hydrogéologique entre le géotextile et la bentonite (figure 2.7) peut parfois créer un bris de capillarité. Le contact entre la bentonite et la membrane de l'extracteur ne se produit alors plus, ce qui empêche la désaturation du GCB par le fait même. Il se pourrait donc que l'hydratation sous hautes pressions du GCB7 ait mené à un remplissage des vides des géotextiles plus important que pour le GCB18, et que le contact entre la bentonite et la membrane de l'extracteur ait été de meilleure qualité pour le GCB7 par le fait même. Il est donc recommandé de réaliser davantage d'essais à l'extracteur à pression, sur des échantillons de GCB hydratés à des pressions de confinement faibles et élevées, afin de valider les hypothèses précédentes.

## 5.2.2 Essais au WP4C

Les essais au WP4C ont permis d'évaluer la rétention d'eau des GCB20 (hydratation au DMAS) et GCB23 (hydratation à l'eau DI) sur un intervalle de succion totale variant de 1 à 300 MPa. En tout, 15 analyses ont été réalisées sur le GCB20 (10 sur échantillons intacts, 5 sur échantillons initialement écrasés au pilon, ci-après désignés comme « remaniés ») et 14 sur le GCB23 (6 sur échantillons intacts, 8 sur échantillons remaniés). Les résultats obtenus sont présentés aux figures 5-3 et 5-4 et détaillés à l'annexe E.

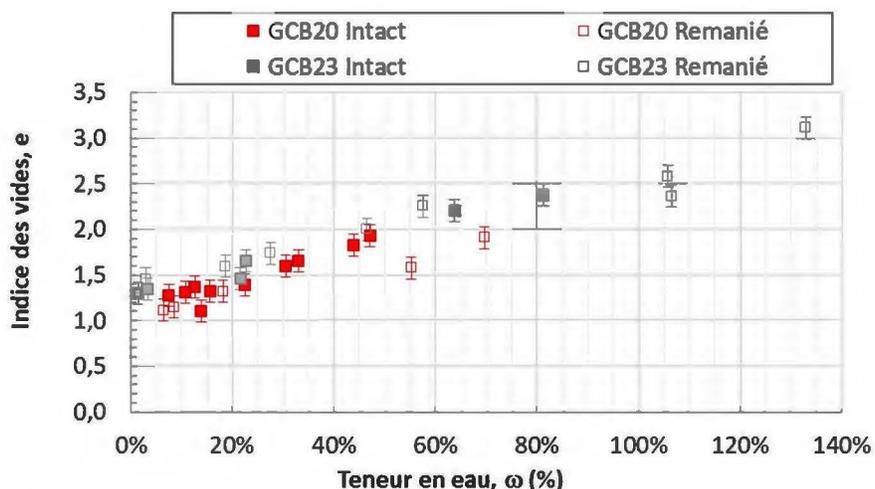


Figure 5-3 : Relation  $e(\omega)$  selon le type de méthode de préparation

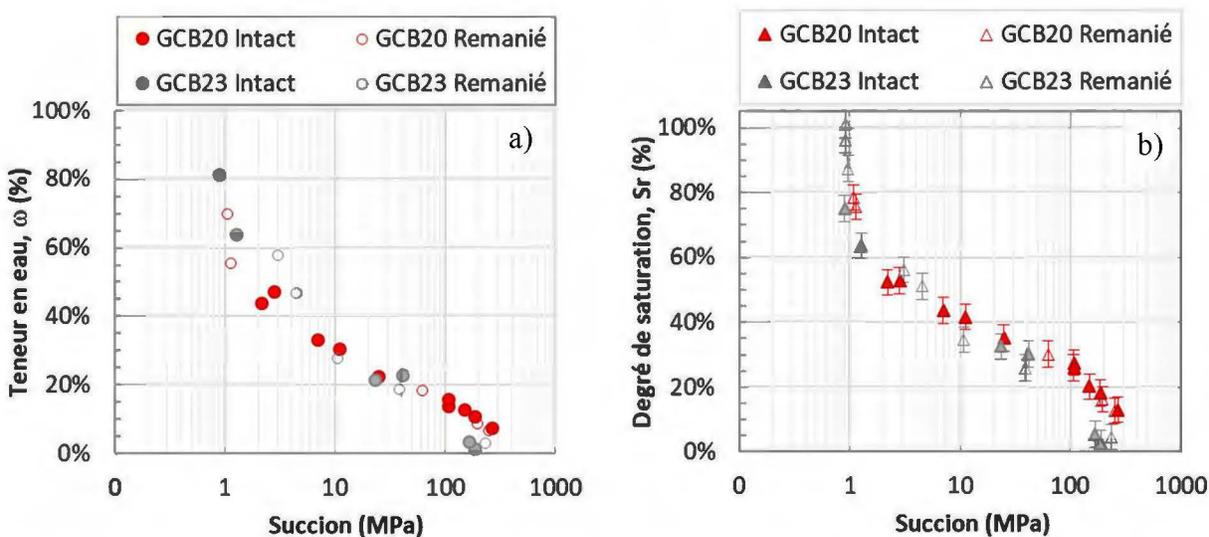


Figure 5-4 : Courbes de rétention d'eau obtenues avec le WP4C exprimés en a) teneur en eau massique et b) degré de saturation

Tel que mentionné à la section 3.3.4, certains sous-échantillons des GCB20 et GCB23 ont été comprimés afin de pouvoir être insérés dans le godet à échantillon du WP4C. Pour les deux GCB, une augmentation du diamètre des sous-échantillons s'est produite lors de la compression, et la bentonite dépassant du pourtour du géotextile a ensuite été retirée à l'aide d'un couteau de précision afin de ramener le diamètre du sous-échantillon à 38 mm. La relation  $e(\omega)$  illustrée à la figure 5-3 permet d'évaluer l'effet du mode de préparation sur les sous-échantillons. Un indice des vides plus faible pour une même teneur en eau indique que l'écrasement du sous-échantillon a entraîné une diminution du volume des vides et une modification à la structure interne par le fait même. Basé sur la tendance des résultats obtenus, cela semble être le cas pour le GCB20, avant que l'assèchement et le retrait de celui-ci ne soit importante ( $\omega < 50\%$ ). La compression des sous-échantillons du GCB23 semble pour sa part avoir causé un déplacement de la bentonite (augmentation de diamètre) sans toutefois avoir affecté son volume des vides comme le montre les relations  $e(\omega)$  similaires pour les deux modes de préparation. Basé sur ces données, l'effet du mode de préparation est considéré comme étant négligeable pour la majorité des essais réalisés.

La figure 5-4a indique que la teneur en eau en fonction de la succion appliquée est similaire pour les deux modes d'hydratation des GCB. Lorsque la variation du volume de l'échantillon est considérée et que les résultats sont transférés en termes de  $S_r(\psi)$ , un  $S_r$  légèrement plus élevé semble être obtenu pour l'échantillon hydraté au DMAS (GCB20) à partir d'une  $\psi$  de 40 MPa, pour une même succion appliquée. Yesiller et al. (2014) ont observé une tendance similaire dans le cadre d'essais réalisés sur des échantillons de GCB conventionnels hydratés à l'eau DI et avec une solution de 0.1 M de  $\text{CaCl}_2$ .

### 5.2.3 Essais par équilibre de la pression des vapeurs

L'échantillon GCB18, hydraté à l'eau DI, a été séparé en 2 à la suite des essais à l'extracteur à pression et de diffusion d'oxygène, afin de faire l'objet d'essais par équilibre de la pression des vapeurs. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 5-6 et à la figure 5-5. Les résultats obtenus par cette méthode sont comparables à ceux obtenus pour le GCB23 (hydraté à l'eau déionisée) et analysé à l'aide du WP4C. Il à noter que puisque les dimensions finales des sous-échantillons analysés n'ont pas été notées, il n'a pas été possible d'estimer le  $S_r$  à la fin des essais.

Tableau 5-6 : Résultats d'essais par équilibre de la pression des vapeurs - GCB18

Solution saline	Humidité relative (%)	Temp. (°C)	Succion totale (MPa)	Durée (j)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau, $\omega$ (%)
CuSO <sub>4</sub>	98,0	22,2	2,8	106,3	15,2	11,5	33%
KNO <sub>3</sub>	92,6	22,4	10,5	68,8	12,0	9,8	22%

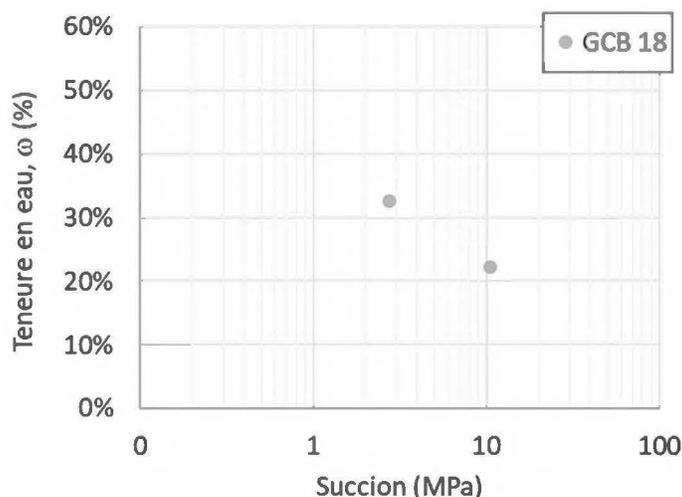


Figure 5-5 : Courbe de rétention d'eau obtenues par équilibre de la pression des vapeurs

#### 5.2.4 Courbe de rétention d'eau combinée et discussion

Les courbes de rétention d'eau de GCB hydratés sous de faibles pressions de confinement, à l'eau DI (GCB18 et GCB23) et au DMAS (GCB23), ont été obtenues en combinant les résultats provenant de la méthode de l'extracteur à pression, du WP4C et des solutions salines. Pour l'extracteur à pression, les succions correspondent à des  $\psi_m$  tandis que pour les essais avec le WP4C et les solutions saline, les succions sont des  $\psi_f$ . Toutefois, les résultats en  $\psi_m$  se limitent à un échantillon de GCB hydraté à l'eau DI, et les valeurs de  $\psi_o$  retrouvées dans la littérature pour des argiles et bentonite hydratées à l'eau DI sont relativement faible, soit environ 0,2-0,3 MPa (Arifin & Schanz, 2009; Fredlund et al., 2012). Dans ce contexte, il peut être supposé que  $\psi_f$  et  $\psi_m$  diffèrent peu.

Dans le cas de matériaux compressibles tels la bentonite, l'AEV est mieux définie en utilisation la courbe  $S_r(\psi)$  que les courbes  $\omega(\psi)$  (Mbonimpa, Aubertin, Maqsoud, et al., 2006; Wijaya et al., 2015). Puisque l'AEV sera estimée à partir des résultats obtenus, la combinaison de tous les points

expérimentaux présentés précédemment est illustrée en termes de  $S_r(\psi)$  à la figure 5-6, et les résultats de  $\omega(\psi)$  sont présentés à l'annexe E. Les données expérimentales de  $S_r(\psi)$  ont été lissées à l'aide du logiciel RETC (van Genuchten et al., 2009). Les deux types de modèles procurant les meilleurs coefficients de détermination ( $R^2 \sim 0,96$ ) sont les modèles de van Genuchten (van Genuchten, 1980) et de distribution log-normale (Kosugi, 1996). Ces résultats obtenus sont également illustrés à la figure 5-6.

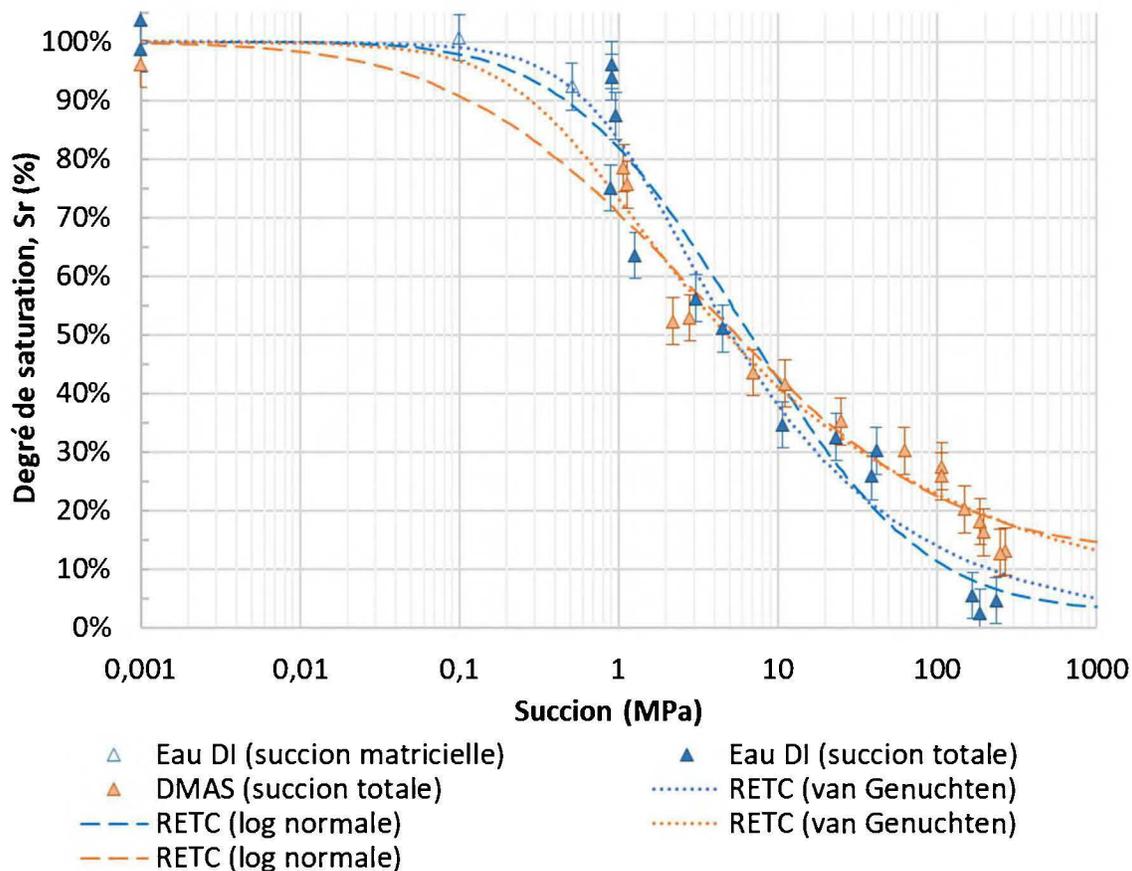


Figure 5-6 : Courbe de rétention d'eau de GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS sous de faibles pressions de confinement

Les AEV des GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS ont été estimés à l'aide de la méthode graphique, telle qu'illustrée à la figure 5-7. Des AEV de 0,12 et 0,20 MPa (12 à 20 m d'eau) ont été obtenus pour l'échantillon hydraté au DMAS, tandis que des valeurs de 0,35 et 0,45 MPa (36 à 41 m d'eau) ont été obtenues pour l'hydratation à l'eau DI. Ces dernières valeurs sont légèrement inférieures à celles pouvant être estimées à partir des résultats de Southen et Rowe (2007) (0,5-0,6 MPa) pour des pressions de confinement de 3 kPa.

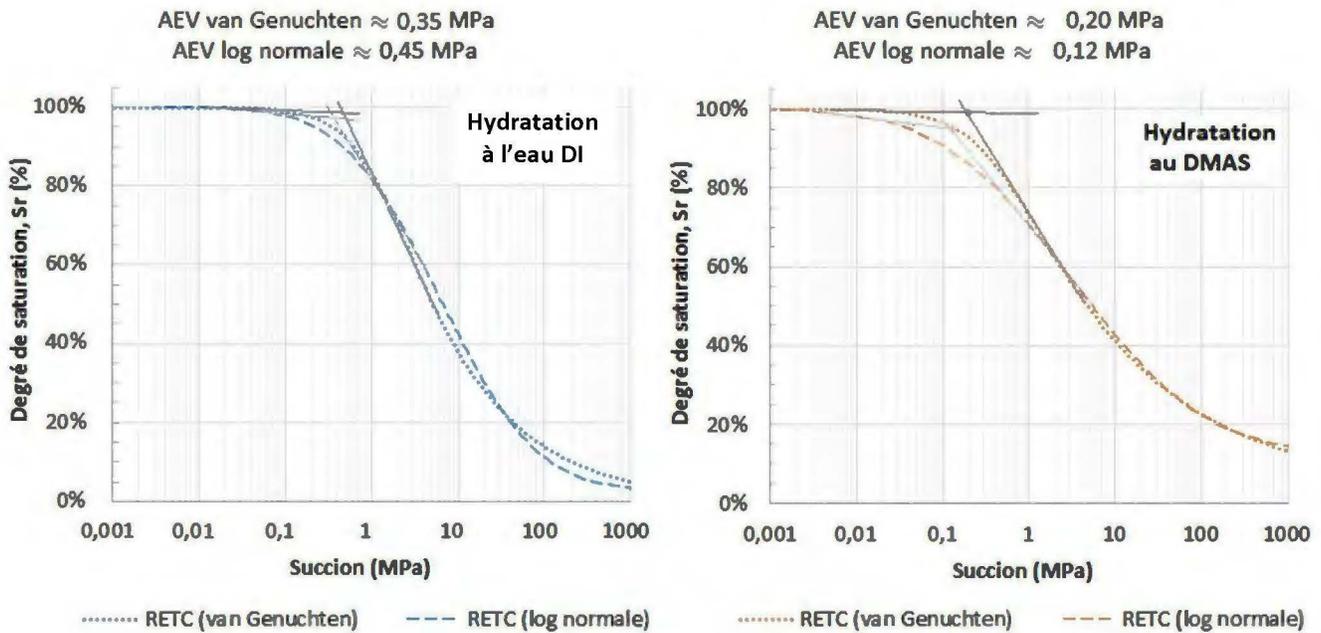


Figure 5-7 : Estimation des AEV par méthode graphique

La différence d'AEV entre l'hydratation à l'eau DI et au DMAS pourrait être attribuée au fait que lorsque l'hydratation de la bentonite sodique à l'eau DI est avancée, la phase d'hydratation osmotique est importante et la quantité d'eau liée aux feuillets d'argile est plus grande que lors d'une hydratation au DMAS. Malgré un indice des vides plus élevé, la porosité effective est alors plus faible pour le GCB hydraté à l'eau DI qu'au DMAS, et sa capacité à retenir l'eau pourrait s'en trouver accrue par le fait même, ce qui se traduirait par un AEV plus élevé.

À partir d'environ 10 MPa et des valeurs de  $S_r$  de 40%, la succion observée pour le GCB hydraté au DMAS est plus élevée que celle de l'échantillon hydraté à l'eau DI, pour un même  $S_r$ . De plus, comme l'indique la figure 5-8a, l'indice des vides est plus élevé pour le GCB hydraté à l'eau DI qu'au DMAS, pour tous les  $S_r$ .

Puisqu'il a été observé que l'hydratation osmotique de la montmorillonite se produit habituellement à des teneurs en eau supérieures à 35% (Mooney et al., 1952; Scalia IV & Benson, 2011), et que les teneurs en eau  $<$  35% correspondent à un  $S_r <$  40% dans le cas présent (figure 5-8b), il est supposé qu'un nombre limité mais similaire de couches de molécules d'eau sont présentes autour des feuillets d'argile tant pour le GCB hydraté à l'eau DI que celui hydraté au DMAS (

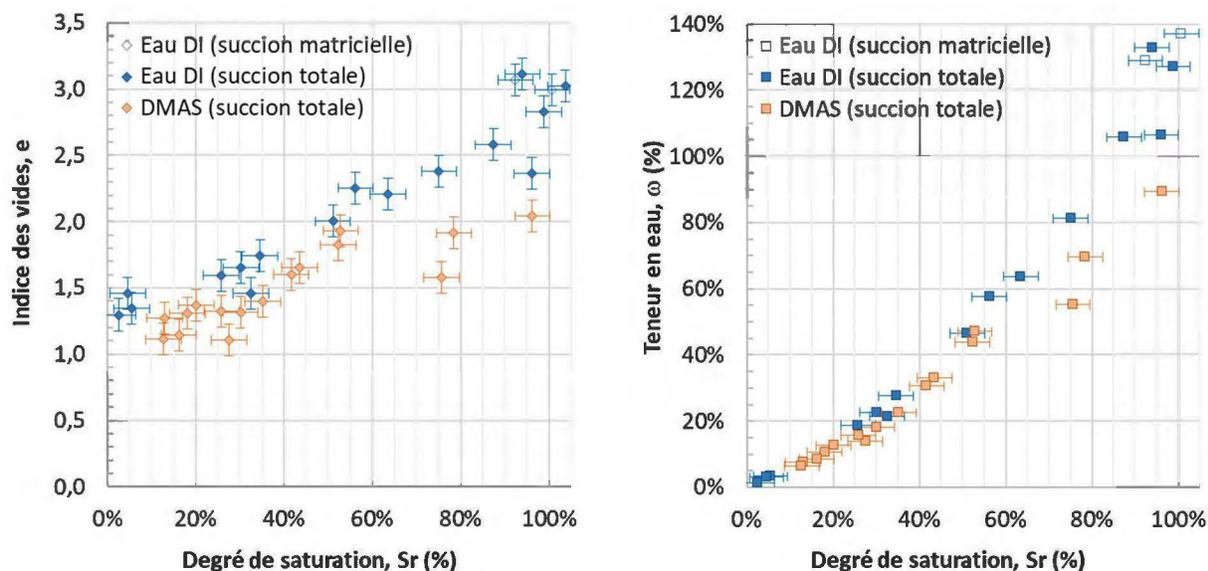


Figure 5-8 : Indices des vides et teneur en eau en fonction du degré de saturation

hydratation cristalline uniquement). La figure 5-4a illustre ce phénomène, où les teneurs en eau sont généralement similaires pour une même succion, tant pour l'hydratation à l'eau DI qu'au DMAS. Ainsi, puisque l'indice des vides est plus élevé pour les échantillons hydratés à l'eau DI, il en résulte une quantité d'eau similaire contenue dans un volume des vides plus élevés, ce qui correspond à un degré de saturation moindre.

Il est à noter que les succions présentées à la figure 5-6 pour des valeurs supérieures à 1,5 MPa correspondent à des succions totales, soit la somme de  $\psi_m$  et  $\psi_o$ . Considérant la nature du DMAS, il est attendu que la valeur de  $\psi_o$  soit supérieure pour le GCB hydraté au DMAS qu'à l'eau DI. Cette différence de  $\psi_o$  pourrait également être partiellement responsable du décalage vers la droite de la CRE du GCB hydraté au DMAS à partir de succions de 10 MPa et plus. Une comparaison des CRE de GCB hydratés à l'eau DI et au DMA en termes de  $S_r(\psi_m)$ , pourrait s'avérer intéressante dans le cadre de futures recherches.

En conclusion, les essais menés afin de déterminer la CRE en séchage de GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS sous de faibles pressions de confinement indiquent que l'AEV du matériau est très élevé (entre 0,12 et 0,45 MPa, soit 12 et 46 m d'eau), peu importe le liquide hydratant utilisé. Ainsi, si le matériau atteint un  $S_r$  près de 100% lors de son hydratation, d'importantes forces de succions devront être appliquées avant que l'air ne soit plus occlus dans le matériau, ou que des fissures de dessiccation ne puissent se développer.

## 5.3 Diffusion

Des essais de diffusion de l'oxygène ont été réalisés sur 6 échantillons de GCB après leur saturation selon les méthodes de préparation présentées au tableau 3-17. Ces essais ont permis d'évaluer la performance de ces GCB comme barrière à l'oxygène. Deux types d'essais ont été réalisés : des essais à système fermé, où la quantité d'oxygène dans le système demeure constant pendant tout l'essai, et des essais à système ouvert, où un des réservoir est maintenu ouvert pendant la durée de l'essai (concentration en oxygène constante) tandis que le second réservoir est maintenu fermé.

### 5.3.1 Essais à système fermé

Les résultats obtenus pour le GCB16, présentés à la figure 5-9, sont représentatifs des résultats obtenus pour les essais réalisés en système fermé (détails des autres essais à l'annexe F). Une première série de modélisations a été réalisé avec POLLUTEv7, en utilisant un modèle numérique similaire à celui illustré à la figure 3-10a. Lorsque les conditions initiales de l'essai ont été utilisées pour la modélisation, les courbes pointillées de la figure 5-9a ont été obtenues. Ces courbes sont similaires à celle obtenues par (Aubertin et al., 2000), mais différent des valeurs enregistrées par les sondes et validées au chromatographe en phases gazeuses.

En début d'essai, une diminution rapide de la concentration en oxygène dans le réservoir supérieur a été observée lors des modélisations avec POLLUTEv7. Cette diminution rapide avait également été observée par Aubertin et al. (2000) et correspond à la diffusion de l'oxygène dans la couche de sable supérieure ayant un degré de saturation pratiquement nul. Les prélèvements réalisés au chromatographe ont permis de déterminer que cette diminution rapide de concentration en oxygène avait bien lieu en début d'essai, mais que la vitesse de variation des concentrations lors des premières minutes de l'essai est trop élevée pour que la sonde, qui possède un temps de réponse de 60 secondes, ne les enregistre. Finalement, une bonne concordance est observée entre la modélisation avec POLLUTEv7 et les données expérimentales lors de ces premières minutes d'essai.

Les principales différences entre les données expérimentales et celles modélisées sont observables après la diffusion de l'oxygène dans le sable. Pendant une période d'un peu plus de 48h, les données expérimentales ont évolué en suivant une courbe de forme convexe, tandis que celles modélisées suivent une courbe concave, tant pour le réservoir du haut que celui du bas. Au-delà de cette période

de temps, tant les résultats expérimentaux que modélisés suivent une courbe de forme concave. Il s'avère que lorsque les modélisations avec POLLUTEv7 sont réalisées pour cette dernière période de temps, la concordance entre les résultats mesurés et modélisés est bonne (Figure 5-9b).

Les raisons précises de la différence entre les valeurs expérimentales et modélisées pendant un certain temps (phase de non-concordance à la figure 5-9b) n'ont pu clairement être identifiées dans

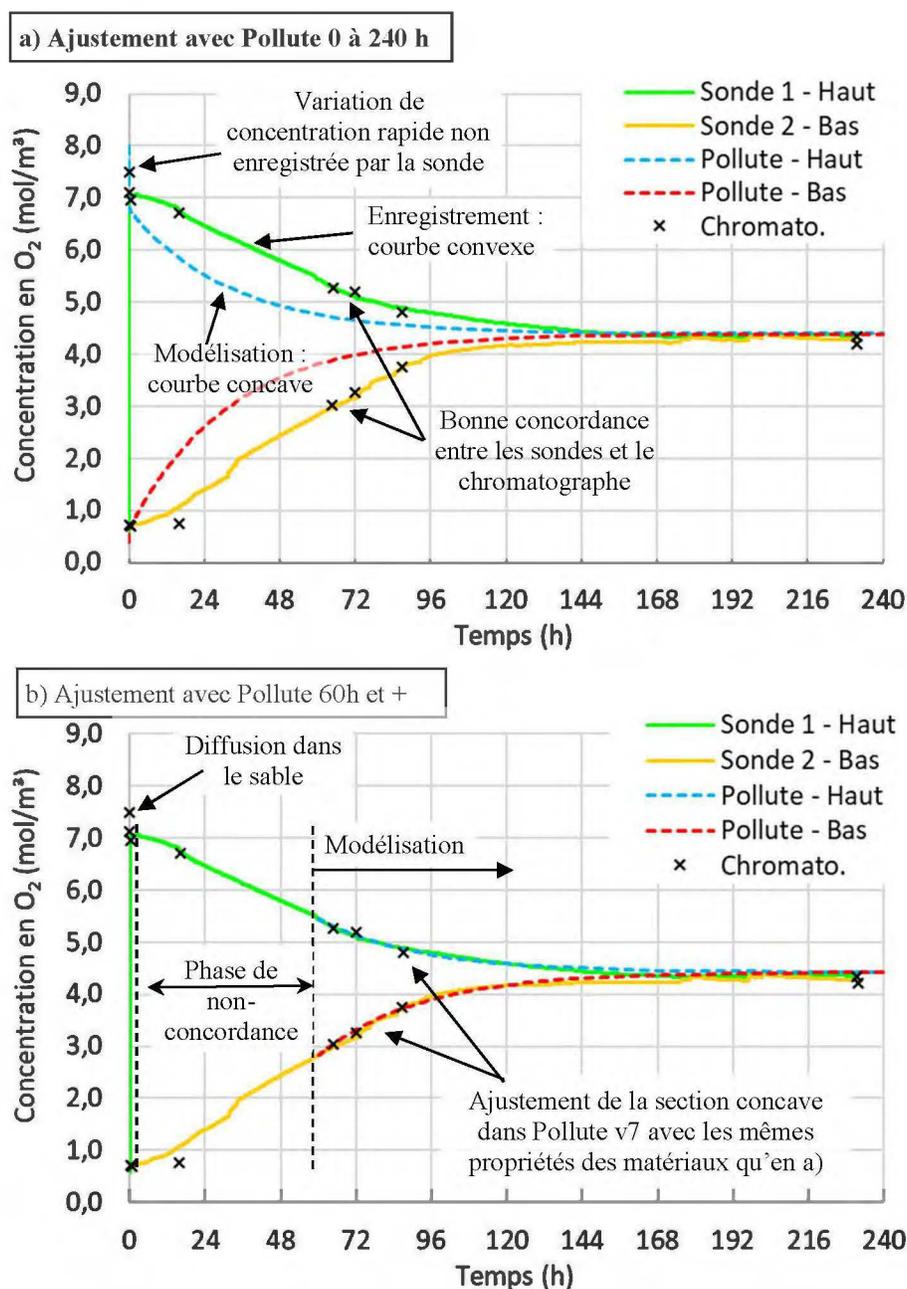


Figure 5-9 : Concentrations mesurées expérimentalement et ajustements obtenus pour le GCB16

le cadre du présent projet de recherche. Il est toutefois probable que la méthode de purge utilisée soit en partie responsable de cette différence. En effet, le réservoir du haut a tout d'abord été purgé à l'oxygène, puis celui du bas, et la purge a été suivie d'une période d'attente de quelques heures pour vérifier l'étanchéité du système. Puisque la purge de chaque réservoir n'a pas été réalisée en faisant circuler de l'azote au travers du GCB, et considérant le court temps de repos du système, de l'oxygène a pu rester trappée dans le GCB. Toutefois, les modélisations réalisées avec POLLUTEv7, en considérant de l'oxygène initialement trappée dans le GCB, mènent à des courbes similaires à celles obtenues à la figure 5-9a. L'autre aspect à considérer est que lors d'un essai de diffusion, deux gaz sont présents dans le système, soit l'azote et l'oxygène. Tandis que l'azote du réservoir inférieur se diffuse vers le réservoir supérieur, l'oxygène du réservoir supérieur se diffuse vers le réservoir inférieur. Ces mécanismes de diffusion simultanés et opposés ne sont pas modélisés avec POLLUTEv7. Toutefois, ce mouvement simultané de deux gaz est présent dans les essais qui ont été modélisés avec succès par le passé avec POLLUTEv7, mais qui étaient cependant d'une durée beaucoup plus courte (p. ex. Toussaint, 2016).

### 5.3.2 Essais à système ouvert

Deux essais ont été réalisés à système ouvert, soit les essais sur les GCB12 et GCB18. Les résultats obtenus sont illustrés aux figures 5-10 et 5-11, tandis que les détails des essais se trouvent à l'annexe F.

L'essai sur le GCB12 a été réalisé sans la présence de sable de part et d'autre du GCB. Une perte de masse de 7,4 g a été mesurée entre le début et la fin de l'essai, accompagnée d'une diminution d'épaisseur de 0,9 mm. Ces variations ont cependant eu un effet limité sur le  $S_r$  en cours d'essai, qui est passé de 96% à 94%. Tout comme pour les essais réalisés à système fermé, les résultats mesurés et ceux modélisés pour le GCB12 diffèrent lorsque les conditions de début d'essai sont utilisées dans les modélisations, mais concordent lorsque seule la fin de l'essai est considérée. Les mêmes mécanismes que ceux se produisant lors de la phase de non-concordance des essais à système fermés pourraient s'être produits. Toutefois, les variations de degré de  $S_r$  en cours d'essai, liés à l'absence de bris de capillarité, peuvent également avoir influencé la diffusion d'oxygène en cours d'essai.

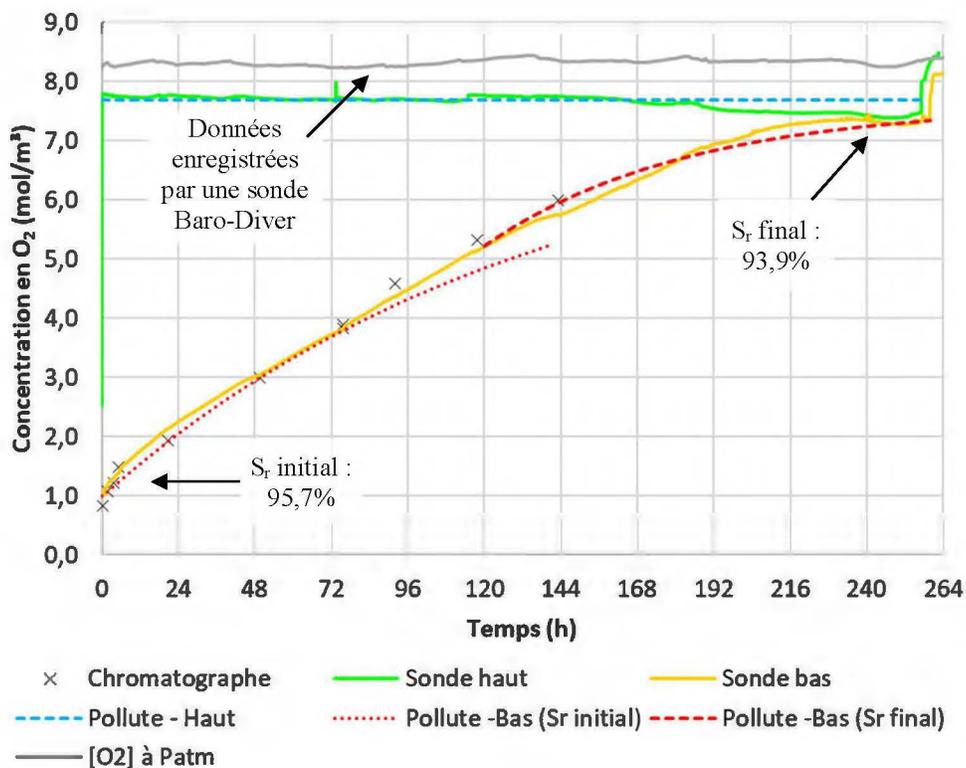


Figure 5-10 : Concentrations mesurées expérimentalement et ajustement obtenu pour le GCB12

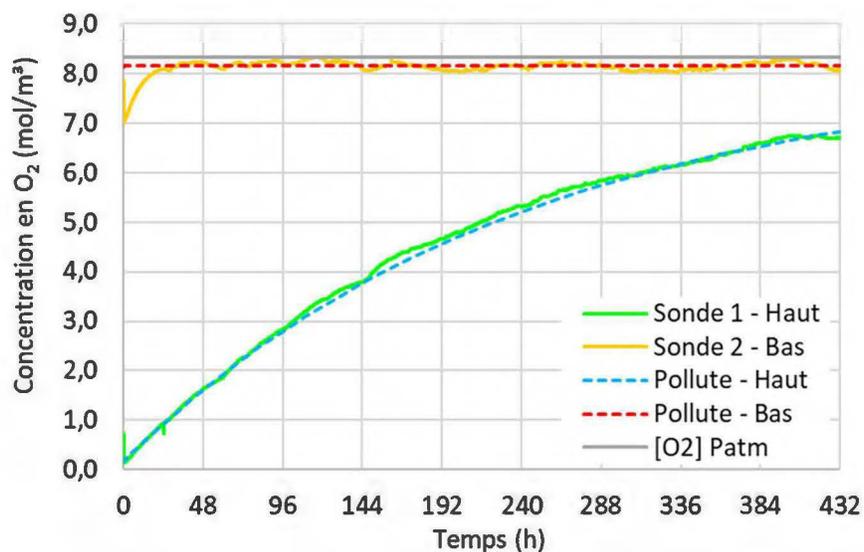


Figure 5-11 : Concentrations mesurées expérimentalement et ajustement obtenu pour le GCB18

Tel que l'illustre la figure 5-11, les mesures expérimentales du GCB18 et la modélisation avec POLLUTEv7, en utilisant les conditions initiales de l'essai, sont similaires. Dans ce cas, l'essai a été réalisé à la suite de 17 jours de conditionnement, pendant lesquels plusieurs purges à l'azote ont été réalisées dans le réservoir du haut, tandis que le réservoir du bas était maintenu fermé ou partiellement fermé. Ces manipulations avaient comme objectif d'améliorer la purge de l'échantillon de GCB, considérant les observations et hypothèses formulées lors des essais à système fermé. Vu les bons résultats obtenus pour cet essai, il s'avérerait intéressant d'investiguer davantage l'effet de la méthode de purge sur la diffusion d'oxygène lors de recherches ultérieures.

### 5.3.3 Sommaire des résultats

Le bilan  $D_e$  prédits par le modèle d'Aachib et al. (2004) (équation 2-12) ainsi que ceux déterminés en laboratoire sont présentés au tableau 5-7 ainsi qu'à la figure 5-12. Les  $D_e$  expérimentaux obtenus sont tous comparables aux valeurs de  $D_e$  estimées à partir du modèle prédictif d'Aachib et al. (2004), peu importe le liquide hydratant utilisé.

Pourtant, l'utilisation de DMAS plutôt que d'eau DI influence deux paramètres reliés au  $D_e$ , soit la concentration en oxygène dissout dans la phase liquide et le coefficient de diffusion libre de l'oxygène dans cette même phase. La quantité d'oxygène dans un liquide salé peut être estimée avec le logiciel en ligne DOTABLES (U.S. Geological Survey, 2019) qui utilise les équations de Benson and Krause (Benson & Krause, 1980; Benson & Krause Jr, 1984; Meyers, 2011). À une température de 21°C et une pression atmosphérique de 101,3 kPa, la concentration en oxygène dissout est de 7,7 mg/l pour une solution ayant une salinité de 2,5 %, tel le DMAS utilisé pour saturer les GCB 20 et 22, comparativement à une concentration de 8,9 mg/l pour de l'eau DI. La constante de Henry (H), utilisée à l'équation 2-12, est donc légèrement plus faible pour une hydratation au DMAS (0,026) que pour une hydratation à l'eau DI (0,032). Les coefficients de diffusion libre de l'oxygène dans l'eau DI et dans des solutions salées peuvent pour leur part être évalués à l'aide de la corrélation de Fuller (Fuller et al., 1966) et de la formule semi-empirique de (Garcia & Gordon, 1992). À une température de 21°C et une pression atmosphérique de 101,3 kPa, la diffusion libre de l'oxygène est estimée à  $2,16 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s dans l'eau DI et à  $2,05 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s dans le DMAS. La valeur de  $D_w^0$  utilisée à l'équation 2-12 est donc 5% plus faible pour une hydratation au DMAS qu'à l'eau DI, ce qui devrait très légèrement affecter à la baisse le  $D_e$  de l'oxygène au travers d'un GCB ayant un haut  $S_r$ .

Tableau 5-7 : Coefficients de diffusion effectifs prédits et modélisés

Échantillon (Hydratation)	Épaisseur (mm)	Porosité (n)	S <sub>r</sub> final (%)	D <sub>e</sub> prédit (m <sup>2</sup> /s)	D <sub>e</sub> modélisé (m <sup>2</sup> /s)
Sable	10,5	0,40	0	5,0 × 10 <sup>-6</sup>	3,6 × 10 <sup>-6</sup>
12 (Eau DI)	8,7	0,81	94	1,0 × 10 <sup>-9</sup>	2,1 × 10 <sup>-9</sup>
13 (Eau DI)	9,0	0,71	88	9,7 × 10 <sup>-9</sup>	1,3 × 10 <sup>-8</sup>
16 (Eau DI)	7,2	0,65	93	1,2 × 10 <sup>-9</sup>	3,2 × 10 <sup>-9</sup>
18 (Eau DI)	10,8	0,79	92	2,3 × 10 <sup>-9</sup>	1,6 × 10 <sup>-8</sup>
20 (DMAS)	7,7	0,68	92	2,0 × 10 <sup>-9</sup>	8,4 × 10 <sup>-9</sup>
22 (DMAS)	7,6	0,65	88	7,4 × 10 <sup>-9</sup>	3,4 × 10 <sup>-9</sup>

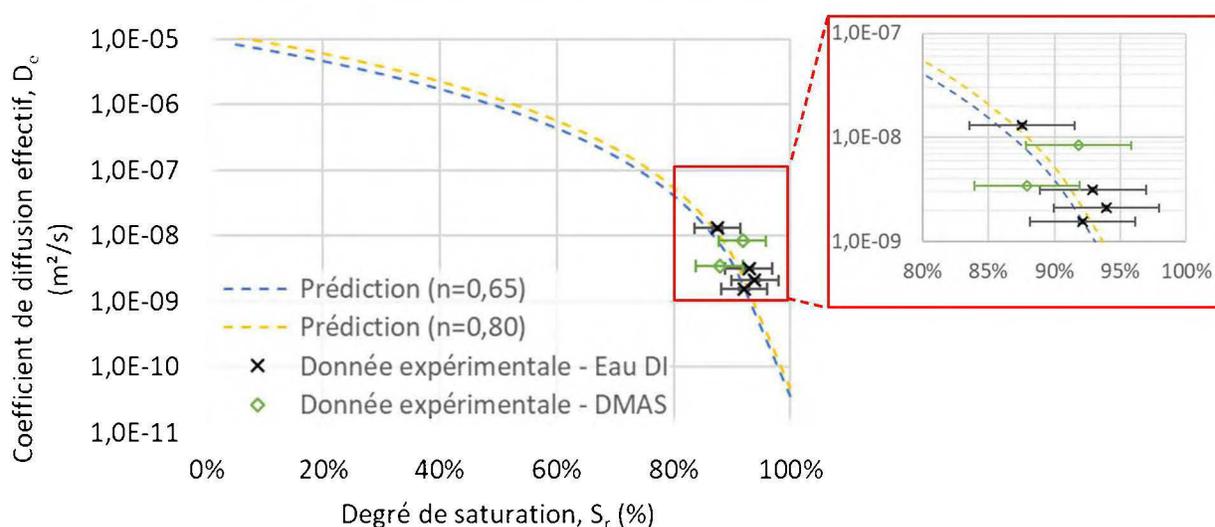


Figure 5-12 Coefficients de diffusion effectifs estimés et résultats expérimentaux obtenus

Basé sur l'équation 2-11, une différence de  $D_e$  d'un peu plus de 20% devrait être observée à un  $S_r$  de 100% entre un GCB hydraté à l'eau DI et au DMAS, mais de seulement 2% à un  $S_r$  de 95%. Toutefois, puisque les valeurs de  $D_e$  sont très faibles à de tels  $S_r$  ( $\sim 10^{-11}$  cm/s), les différences de  $D_e$  associées au liquide hydratant le sont également. En somme, considérant que les incertitudes associées au  $S_r$  calculé pour les divers échantillons de GCB sont plus importantes que la variation de  $D_e$  découlant de l'utilisation de DMAS au lieu d'eau DI et que le  $S_r$  mesuré à la fin des essais était généralement  $< 95\%$ , il semble cohérent qu'aucune différence de  $D_e$  n'ait été observée dans le cadre des essais réalisés.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans le cadre d'une restauration minière où un recouvrement d'ingénierie de type multicouche pourrait s'avérer avantageux, mais où des matériaux naturels ne sont pas disponibles à proximité ou en quantité suffisante, l'utilisation de géocomposite bentonitique pourrait être une alternative intéressante. Ce matériau possède une faible  $k_{\text{sat}}$  et une capacité d'auto-réparation découlant de son important gonflement lorsqu'hydraté à l'eau. Toutefois, certaines études ont indiqué que les propriétés avantageuses du matériau pouvaient être amoindries lors d'une hydratation avec des liquides ayant une forte force ionique. De plus, les effets d'une hydratation au DMA (faible pH et forte concentration en métaux dissous) dans un contexte de recouvrement minier localisé en climat froid (i.e. avec cycles de gel-dégel) sont peu documentés. Le présent projet s'attaque donc à cette problématique. Pour ce faire, la  $k_{\text{sat}}$  (avant et après cycles de gel-dégel), la CRE et le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène ont été déterminés puis comparés pour des échantillons hydratés à l'eau déionisée (DI) et par un drainage minier acide synthétique (DMAS).

### 6.1 Sommaire et conclusions

Le présent projet de recherche a permis d'évaluer l'impact de l'hydratation d'un GCB au DMAS sur sa performance comme barrière aux fluides. Une caractérisation du GCB utilisé pour mener les divers essais a tout d'abord été réalisée. La masse surfacique moyenne de bentonite s'est avérée plus élevée que les valeurs indiquées à la fiche technique du fabricant (5195 g/m<sup>2</sup> versus 4100 g/m<sup>2</sup>). Toutefois, le contenu en smectites et en montmorillonite dans la bentonite était moindre qu'attendu (65% de smectites, dont environ 35% de montmorillonite versus 90% de smectites/montmorillonite) et l'indice de plasticité de la bentonite était relativement faible (~400%). La bentonite du GCB utilisé lors des expérimentations correspondait donc à une bentonite de qualité inférieure.

Sous de faibles pressions de confinement, similaires à celles exercées par un recouvrement minier, la  $k_{\text{sat}}$  des échantillons de GCB hydratés au DMAS était d'environ 10<sup>-8</sup> cm/s, soit un ordre de grandeur de plus que celle d'échantillons hydratés à l'eau DI. De plus, les échantillons hydratés à l'eau DI avaient une épaisseur d'environ 9,5 mm après les essais de perméabilité, comparativement à une épaisseur d'environ 8,5 mm pour les échantillons hydratés au DMAS. Une différence d'un ordre de grandeur additionnel de  $k_{\text{sat}}$  a été observée pour un échantillon soumis à des cycles de gel-

dégel ( $10^{-7}$  cm/s), tandis qu'une augmentation de deux ordres de grandeur a été mesurée pour l'échantillon soumis à des cycles de gel-dégel et une désaturation occasionnelle ( $10^{-6}$  cm/s). Le suivi de la conductivité électrique et du pH pendant les essais de perméabilité, le prélèvement occasionnel de DMAS à l'effluent du système ainsi que les analyses minéralogiques réalisées en fin d'essai ont indiqué qu'une partie des cations  $\text{Na}^+$  initialement présents au sein des smectites ont été remplacés par des cations multivalents pendant l'hydratation au DMAS. Ces échanges cationiques ont pu limiter le pouvoir gonflant de la bentonite et sa capacité d'auto-réparation par le fait même, ce qui expliquerait les résultats de  $k_{\text{sat}}$  obtenus.

Les résultats des analyses chimiques, électrochimiques et minéralogiques ont également indiqué que les étapes typiques de neutralisation d'un DMAS avec faible pH et concentration élevée en sulfate et en fer ont été suivies en cours de perméation. Pour les deux essais de perméation réalisés sur une longue durée (de 59 à 66 jours) des plateaux de pH ont successivement été observés à des pH d'environ 4,0-4,5 et de 3,0-3,5, correspondant au tamponnement de l'acidité par des (oxy)hydroxydes d'aluminium et de fer respectivement. Les essais ont été interrompus à des pH de 3,2 et 3,5, sans qu'un équilibre chimique n'ait été atteint.

Des courbes de rétention d'eau ont été évaluées en combinant les méthodes de l'extracteur à pression, du WP4C et de l'équilibre des pressions de vapeur avec des solutions salines. Des courbes similaires ont été obtenues pour les échantillons hydratés à l'eau DI et au DMAS. L'AEV a été estimé à 0,12-0,20 MPa pour une hydratation à l'eau DI et à 0,35-0,45 MPa pour une hydratation au DMA. Ainsi d'importantes forces de succion devront être appliquées afin de désaturer un GCB initialement bien hydraté, tant à l'eau DI qu'au DMAS.

Les essais de  $D_e$ , réalisés sur des GCB à des  $S_r$  de 88 à 94 %, ont tous conduit à des valeurs similaires à celles estimées par le modèle d'Aachib, peu importe le liquide hydratant utilisé. Les valeurs prédites variaient de  $1,0 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s à  $9,7 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, tandis que les valeurs modélisées variaient de  $2,1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s à  $1,6 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s. Ainsi, à des valeurs de  $S_r$  élevées, ce dernier paramètre demeure l'élément influençant majoritairement les valeurs de  $D_e$ , plutôt que la nature du liquide interstitiel dans le GCB. Toutefois, puisqu'un GCB hydraté au DMAS a tendance à être plus mince qu'un GCB hydraté à l'eau DI à saturation, le gradient de concentration au travers du GCB est légèrement plus élevé, ce qui se traduit par un flux diffusif plus élevé et une moins bonne performance comme barrière à l'oxygène.

En somme, la série d'essais réalisés sur les échantillons de GCB conventionnels hydratés à l'eau DI et au DMAS dans le cadre du présent projet de recherche indiquent que :

- Les pressions de confinement appliquées lors d'essais de perméabilité influencent significativement les valeurs de  $k_{sat}$  mesurées.
- La  $k_{sat}$  des échantillons hydratés au DMAS est supérieure à celle du même GCB hydraté à l'eau DI.
- L'exposition à des cycles de gel-dégel amplifie la différence de  $k_{sat}$  entre les échantillons de GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS. Si ces cycles de gel-dégel sont combinés à des périodes de séchage du GCB, l'écart s'accroît davantage.
- Le fait d'utiliser de l'eau DI ou du DMAS n'a que peu d'impacts sur la CRE du GCB. L'AEV est élevée tant pour une hydratation à l'eau DI qu'au DMAS.
- L'utilisation d'eau DI ou de DMAS pour hydrater un GCB n'a pas d'impact significatif sur son  $D_e$ . Toutefois, les GCB hydratés au DMAS sont généralement moins épais, ce qui se traduit par un flux diffusif plus élevé que pour hydratation à l'eau DI, pour un même  $D_e$ .

Les résultats obtenus dans cette étude ont été réalisés en laboratoire et sont spécifiques à la combinaison de GCB et de DMAS utilisée. Des résultats différents pourraient être obtenus avec d'autres GCB et liquides. De plus, les essais ont été réalisés dans des conditions de laboratoire contrôlées. Les mécanismes et risques de défaillance identifiés sont donc considérables dans un contexte plus large, mais l'utilisation des valeurs obtenues devraient se limiter au contexte de l'actuel projet de recherche.

## 6.2 Recommandations

Le présent projet est une première étape d'un programme de recherche plus vaste portant sur l'utilisation de GCB comme barrière aux fluides dans des recouvrements miniers multicouches. Basée sur la démarche méthodologique utilisée et les résultats obtenus, la série de recommandations suivante a été développée, en termes de travaux de recherche :

1. Réaliser un ou des essais de perméabilité avec du DMAS à très long terme, jusqu'à l'atteinte d'un équilibre chimique, et suivre l'évolution de la qualité du DMAS entrant et sortant du perméamètre, en plus du pH et de la CE. Un tel essai permettrait de déterminer un  $k_{sat}$

maximal et nombre de PVF requis pour l'atteindre, d'améliorer la compréhension des interactions bentonite-DMAS en cours d'essai et de mieux contextualiser les résultats obtenus dans le cadre du présent projet de recherche.

2. Afin d'identifier la cause des différences obtenus en début d'essai de diffusion d'oxygène entre les valeurs enregistrées et celles modélisée avec POLLUTEv7 (section 5.3), investiguer davantage les effets de la méthode de préparation des échantillons sur les résultats obtenus lors d'essais de diffusion de l'oxygène, ainsi que les mécanismes et équations utilisée par POLLUTEv7 lors de la modélisation de systèmes multicouche avec GCB non purgés.
3. Documenter les modifications structurales induites dans un GCB exposés à des cycles de gel-dégel, combinés ou non à des cycles de mouillage-séchage. Plusieurs hypothèses ont été formulées dans le cadre du présent projet de recherche, à partir de recherches antérieures et d'observations visuelles, mais des analyses par tomographie par exemple, permettraient de préciser ce volet du projet.
4. Reproduire la même série d'essais de perméabilité avec cycles de gel-dégel que celle réalisée dans le présent projet de recherche (sections 3.3.1, 3.3.2), mais en utilisant un GCB avec bentonite traitée aux polymères. Ce dernier traitement a été développé afin d'améliorer la résistance chimique de la bentonite aux échanges cationiques. Il serait donc intéressant de comparer la performance de ce type de GCB à celle d'un GCB conventionnel dans un contexte de recouvrement minier, et de vérifier si la résistance chimique se maintient au fil des PVF.
5. Poursuivre les travaux de recherche sur des recouvrements multicouches avec GCB. Le présent projet de recherche a été mené directement sur des échantillons de GCB, sans considérer l'impact de la présence des sols adjacents, et uniquement à de hauts degrés de saturation. Toutefois, la saturation totale d'un GCB sur le terrain n'est pas garantie, et la qualité de l'hydratation est influencée, entre autres, par les liquides disponibles de part et d'autre du GCB (précipitations percolant dans les sols sus-jacents, eau interstitielle contenue dans les sols sous-jacents et nappe phréatique).

Les divers résultats obtenus ont mis en lumière certains risques liés à l'utilisation des GCB dans le cadre de recouvrement miniers, qui seront davantage documentés à la suite de la réalisation des

prochaines phases de recherche. D'ici là, il est recommandé aux divers acteurs de l'industrie minière qui considéreraient l'utilisation d'un recouvrement multicouche avec GCB de :

6. Baser la conception du recouvrement à partir de valeurs obtenues dans un contexte représentatif des conditions d'utilisation, plutôt que des valeurs issues de la norme ASTM D5887 qui figurent habituellement sur la fiche technique du fabricant.
7. Prévoir un bris de capillarité entre les rejets miniers et le GCB en présence de rejets miniers dont l'eau interstitielle a une force ionique élevée et un RMD faible, afin de limiter l'hydratation et le contact entre l'eau interstitielle et le GCB.
8. Protéger le GCB des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage s'il risque d'être hydraté avec un liquide ayant une force ionique élevée et un RMD faible.

Finalement, les travaux de recherche présentés dans ce mémoire portant sur l'évaluation de la performance des GCB comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier illustrent la pertinence de poursuivre la recherche sur ce sujet et, tout comme l'ont mentionné Aubertin et al. (2015) et Bouazza (2018) récemment, devraient inciter les divers intervenants du domaine minier à jouer de prudence avec ce matériau vu l'état actuel des connaissances.

## RÉFÉRENCES

- Aachib, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2002). *Laboratory measurements and predictive equations for gas diffusion coefficient of unsaturated soils*. Communication présentée à Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Niagara Falls, Ont (p. 20-23).
- Aachib, M., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156(1), 163-193.
- Abichou, T., Benson, C., & Edil, T. B. (2002). Micro-structure and hydraulic conductivity of simulated sand-bentonite mixtures. *Clays and Clay Minerals*, 50(5), 537-545.
- Abuel-Naga, H., & Bouazza, A. (2010). A novel laboratory technique to determine the water retention curve of geosynthetic clay liners. *Geosynthetics International*, 17(5), 313-322.
- Acikel, A. S., Singh, R. M., Bouazza, A., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2015). Applicability and accuracy of the initially dry and initially wet contact filter paper tests for matric suction measurement of geosynthetic clay liners. *Geotechnique: International Journal of Soil Mechanics*, 65(9), 780-787.
- Adu-Wusu, C., & Yanful, E. K. (2006). Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(1), 1-18.
- Adu-Wusu, C., & Yanful, E. K. (2007). Post-closure investigation of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(4), 496-506.
- Ait Khouia, A. (2019). *Évaluation de la capacité de diversion latérale de la couche de contrôle des écoulements dans un modèle physique au laboratoire*. (Mémoire de maîtrise en génie minéral à paraître, Polytechnique Montréal offert en extension à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamigue).
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145.
- Anderson, D. M., & Hoekstra, P. (1965). Migration of Interlamellar Water During Freezing and Thawing of Wyoming Bentonite 1. *Soil Science Society of America Journal*, 29(5), 498-504.
- Arifin, Y. F., & Schanz, T. (2009). Osmotic suction of highly plastic clays. *Acta Geotechnica*, 4(3), 177-191.
- Ashe, L., Rowe, R. K., Brachman, R. W., & Take, W. A. (2014). Laboratory simulation of bentonite erosion by downslope flow on a GCL. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(8), 04014044.
- Ashe, L., Rowe, R. K., Brachman, R. W., & Take, W. A. (2015). Laboratory study of downslope erosion for 10 different GCLs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1), 04014079.

- Association Minière du Canada. (2018). À propos de l'industrie minière. Tiré de <http://mining.ca/fr/ressources/%C3%A0-propos-de-l%E2%80%99industrie-mini%C3%A8re>
- ASTM. (2009). D5887-09 Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2010a). D2216-10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2010b). D7503-10 Standard Test Method for Measuring the Exchange Complex and Cation Exchange Capacity of Inorganic Fine-Grained Soils. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2011). D5890-11 Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liner. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2012a). D5199-12 Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2012b). D6766-12 Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2013). D6035/D035 M Standard Test Method for Determining the Effect of Freeze-Thaw on Hydraulic Conductivity of Compacted or Intact Soil Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2014a). D5550-14 Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2014b). D5993-14 Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geosynthetic Clay Liners. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2014c). D6141-14 Screening Clay Portion and Index Flux of Geosynthetic Clay Liner (GCL) for Chemical Compatibility to Liquids. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2016a). D5084-16 Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using Flexible Wall Permeameter. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*

- ASTM. (2016b). D5298 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2016c). D5887 /D5887M-16 Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2016d). D6836-16 Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- ASTM. (2017). D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*
- Aubertin, M., Achib, M., & Authier, K. (2000). Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 215-233. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026611449900028X>
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers: manuel sur cédérom*: Presses International Polytechnique.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M., & Mbonimpa, M. (2016). Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. Dans *Geo-Chicago 2016* (p. 343-358).
- Aubertin, M., Chapuis, R., Achib, M., Bussière, B., Ricard, J., & Tremblay, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers, MEND Report 2.22. 2a. *CANMET, Ottawa, Ontario (Canada).*
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Bezaazoua, A., & Maqsoud, A. (2015). *Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA*. Communication présentée à Symposium 2015 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda.
- 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.
- Bannour, H., Stoltz, G., Delage, P., & Touze-Foltz, N. (2014). Effect of stress on water retention of needlepunched geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(6), 629-640.
- Barroso, M., Touze-Foltz, N., & Saidi, F. (2006). *Validation of the use of filter paper suction measurements for the determination of GCL water retention curves*. Communication présentée à Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama (p. 171-174).
- Barthelmy, D. (2012). Mineralogy Database. Tiré de <http://www.webmineral.com/>

- Beddoe, R. A., Take, W. A., & Rowe, R. K. (2010). Development of suction measurement techniques to quantify the water retention behaviour of GCLs. *Geosynthetics International*, 17(5), 301-312. doi:10.1680/gein.2010.17.5.301
- Beddoe, R. A., Take, W. A., & Rowe, R. K. (2011). Water-retention behavior of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1028-1038.
- Benchouk, A. (2005). *Comportement des argiles des barrages Sikkak et Boughrara soumis à une pression interstitielle négative*.
- Benson, B. B., & Krause, D. (1980). The concentration and isotopic fractionation of gases dissolved in freshwater in equilibrium with the atmosphere. 1. Oxygen. *Limnology and Oceanography*, 25(4), 662-671.
- Benson, B. B., & Krause Jr, D. (1984). The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere 1. *Limnology and Oceanography*, 29(3), 620-632.
- Benson, C., Kucukkirca, I. E., & Scalia, J. (2010). Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(6), 536-546. doi:10.1016/j.geotexmem.2010.03.001
- Benson, C., & Meer, S. R. (2009). Relative abundance of monovalent and divalent cations and the impact of desiccation on geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 349-358.
- Benson, C., Wang, X., Gassner, F., & Foo, D. (2008). Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with an aluminum residue leachate. *GeoAmericas 2008, International Geosynthetics Society*.
- Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J., & Weisener, C. (2003). The geochemistry of acid mine drainage. *Treatise on geochemistry*, 9, 612.
- Blowes, D. W., Frind, E. O., Johnson, R. H., Robertson, W. D., Molson, J. W., & Ptacek, C. J. (1994). *Acid-neutralization reactions in inactive mine tailings impoundments and their effect on the transport of dissolved metals*. United States: Government Printing Office.
- 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. Dans H. D. Holland & K. K. Turekian (édit.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* (p. 131-190). Oxford: Elsevier.
- Bouazza, A. (2002). Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 3-17. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114401000255>
- Bouazza, A. (2018). *Geosynthetics Clay Liners : Pushing the Application Boundaries, but how Far ?* Communication présentée à Symposium 2018 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- Bouazza, A., Gates, W. P., & Abuel-Naga, H. (2006). Factors impacting liquid and gas flow through geosynthetic clay liners. *Geosynthetics—Recent Developments. Commemorating Two Decades of Geosynthetics in India*, 119-146.

- Bouazza, A., Jefferis, S., & Vangpaisal, T. (2007). Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet–dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 170-185.
- Bouazza, A., & Vangpaisal, T. (2003). An apparatus to measure gas permeability of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), 85-101.
- Bouazza, A., & Vangpaisal, T. (2004). *Gas transmissivity of a partially hydrated geosynthetic clay liner-geomembrane interface*. Communication présentée à Proceedings of the Third Asian Conference on Geosynthetics, Seoul (p. 603-610).
- Bouazza, A., Vangpaisal, T., & Jefferis, S. (2006). Effect of wet–dry cycles and cation exchange on gas permeability of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1011-1018.
- Boulanger-Martel, V. (2015). *Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques*. (Mémoire de maîtrise en génie minéral, Polytechnique Montréal offert en extension à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamigue).
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2014). *Laboratory evaluation of crushed rock-bentonite hydro-geotechnical properties*. Communication présentée à Proceedings of the 67th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, Canada (vol. 329).
- Bradshaw, S. L., Benson, C., & Scalia, J. (2013). Hydration and Cation Exchange during Subgrade Hydration and Effect on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(4), 526-538.
- Brooks, R., & Corey, T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers, Colorado State University*, 24, 37.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. W., & Chapuis, R. P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- CEAEQ. (2018). Critères de variation relatifs - PALA (p. 27).
- Chapuis, R. P. (2002). The 2000 RM Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 417-439.
- Chapuis, R. P., Mbonimpa, M., Dagenais, A.-M., & Aubertin, M. (2006). A linear graphical method to predict the effect of compaction on the hydraulic conductivity of clay liners and covers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(1), 93-98.
- Chevé, N. (2019). *Évaluation de la performance de géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier*. (Université du Québec en Abitibi-Témiscamigue).
- Chevrier, B., Cazaux, D., Didier, G., Gamet, M., & Guyonnet, D. (2012). Influence of subgrade, temperature and confining pressure on GCL hydration. *Geotextiles and Geomembranes*, 33, 1-6.

- Conzelmann, J., Scalia IV, J., & Shackelford, C. D. (2017). Effect of Backpressure Saturation on the Hydraulic Conductivity of GCLs. Dans *Geotechnical Frontiers 2017* (p. 227-235).
- Corey, A. T. (1957). Measurement of Water and Air Permeability in Unsaturated Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 21(1), 7-10.
- Cussler, E. L. (2009). *Diffusion: mass transfer in fluid systems*: Cambridge University Press.
- Daniel, D. (1993). *Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner*. Communication présentée à Geosynthetics' 93 (p. 1482-1496).
- Daniel, D. E., Bowders, J. J., & Gilbert, R. B. (1997). Laboratory hydraulic conductivity testing of GCLs in flexible-wall permeameters. Dans *Testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners*: ASTM International.
- Delage, P., & Cui, Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur - Construction*, (C 301).
- Devices, D. (2010). WP4C Dewpoint Potential Meter operator's manual, Version 2. *Decagon Devices, Pullman, WA*.
- Dickinson, S., & Brachman, R. W. I. (2006). Deformations of a geosynthetic clay liner beneath a geomembrane wrinkle and coarse gravel. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(5), 285-298.
- Didier, G., Bouazza, A., & Cazaux, D. (2000). Gas permeability of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 235-250. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114499000291>
- Didier, G., Norotte, V., Touze-Foltz, N., Buessard, J., Mazzonleni, G., & Mahuet, J. L. (2009). Influence d'une préhydratation sans confinement sur les performances hydrauliques des GSB.
- Edaphic Scientific. (2018). WP4C Water Potential Meter. Tiré de <https://www.edaphic.com.au/products/soils/decagon-wp4c-soil-water-potential-instrument/>
- Egloffstein, T. A. (2001). Natural bentonites—influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(7), 427-444. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114401000176>
- Eigenbrod, K. (2003a). Self-healing in fractured fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 435-449.
- Eigenbrod, K. D. (2003b). Self-healing in fractured fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 435-449. doi:10.1139/t02-110
- Fox, P. J., De Battista, D. J., & Mast, D. G. (2000). Hydraulic performance of geosynthetic clay liners under gravel cover soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 179-201.
- Fredlund, D., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*: John Wiley & Sons.

- Fuller, E. N., Schettler, P. D., & Giddings, J. C. (1966). New method for prediction of binary gas-phase diffusion coefficients. *Industrial & Engineering Chemistry*, 58(5), 18-27.
- Garcia, H. E., & Gordon, L. I. (1992). Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations. *Limnology and Oceanography*, 37(6), 1307-1312.
- Gates, W. P., Bouazza, A., & Churchman, G. J. (2009). Bentonite clay keeps pollutants at bay. *Elements*, 5(2), 105-110.
- Gibbs, D., & Gates, W. (2014). *A test method to determine expected GCL porosity under specific site conditions*. Communication présentée à 7th International Congress on Environmental Geotechnics: iceg2014 (p. 1193).
- Gleason, M. H., Daniel, D. E., & Eykholt, G. R. (1997). Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 438-445.
- Gustafsson, J. P. (2018). Visual MINTEQ 3.1 KTH, Department of Land and Water Resources, Stockholm, Sweden.
- Guyonnet, D., Touze-Foltz, N., Norotte, V., Pothier, C., Didier, G., Gailhanou, H., . . . Warmont, F. (2009). Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5), 321-331.
- Hamblin, C. (2009). *The Rehabilitation of the Kam Kotia Mine Site: An Exercise in Cover Construction and Water Management*. Communication présentée à 16th British Columbia MEND Metal Leaching/Acid Rock Drainage Workshop, Vancouver. Tiré de <http://bcmlard.ca/files/presentations/2009-20-HAMBLIN-rehab-kam-kotia-mine-site.pdf>
- Hanson, J. L., Risken, J. L., & Yeşiller, N. (2013). *Moisture-Suction Relationships for Geosynthetic Clay Liners*.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*: Presses inter Polytechnique.
- HORIBA Instruments. (2013). Dispersing Powders in Liquid for Particle Size Analysis.
- Hornsey, W. P., Scheirs, J., Gates, W. P., & Bouazza, A. (2010). The impact of mining solutions/liquors on geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 191-198. doi:10.1016/j.geotexmem.2009.10.008
- Hosney, M. S., & Rowe, K. (2016). Performance of polymer enhanced bentonite-sand mixture for covering arsenic-rich gold mine tailings for up to four years. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Hosney, M. S., & Rowe, R. K. (2013). Changes in geosynthetic clay liner (GCL) properties after 2 years in a cover over arsenic-rich tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(3), 326-342. doi:10.1139/cgj-2012-0367
- INAP. (2012). Global Acid Rock Drainage Guide. *The International Network for Acid Prevention*. Tiré de <http://www.gardguide.com>
- Instruments, A. (2016). Owner's Manual - Oxygen Sensor Models SO-110, SO-120, SO-210, and SO-220. Tiré de <https://www.apogeeinstruments.com/content/SO-100-200-manual.pdf>
- Jae-Myung, L., Shackelford, C. D., Benson, C. H., Ho-Young, J., & Edil, T. B. (2005). Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of*

*Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1319-1329. Tiré de <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=iih&AN=18581109&lang=fr&site=ehost-live>

- Jo, H. Y., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2006). Rate-limited cation exchange in thin bentonitic barrier layers. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(4), 370-391.
- Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2001). Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 557-567.
- Karland, O., Olsson, S., & Nilsson, U. (2006). *Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Kashir, M., & Yanful, E. K. (2001). Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1034-1048. Tiré de <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t01-027>
- Koerner, G. R. (2004). *Geosynthetic Institute's Efforts In Accreditation and Certification*. Communication présentée à Proceedings of Symposium Honoring the Research Achievement of Dr. Robert M. Koerner, Philadelphia, PA, GII Press (p. 204-215).
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (vol. 1): Xlibris Corporation.
- Kolstad, D., Benson, C., Edil, T., & Jo, H. (2004). Hydraulic conductivity of a dense prehydrated GCL permeated with aggressive inorganic. *Geosynthetics International*, 11(3), 233-241.
- Kolstad, D. C., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2004). Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1236-1249.
- Kong, D.-J., Wu, H.-N., Chai, J.-C., & Arulrajah, A. (2017). State-Of-The-Art Review of Geosynthetic Clay Liners. *Sustainability*, 9(11), 2110.
- Kosugi, K. i. (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 32(9), 2697-2703.
- Kraus, J. F., Benson, C. H., Erickson, A. E., & Chamberlain, E. J. (1997). Freeze-thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(3), 229-238.
- Lake, C. B., & Rowe, K. R. (2000). Swelling characteristics of needlepunched, thermally treated geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 77-101. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114499000229>
- Laloui, L. (2013). *Mechanics of unsaturated geomaterials*: John Wiley & Sons.
- Lange, K., Rowe, R., & Jamieson, H. (2007). Metal retention in geosynthetic clay liners following permeation by different mining solutions. *Geosynthetics International*, 14(3), 178-187.
- Lange, K., Rowe, R., & Jamieson, H. (2010). The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 199-205.

- Lapakko, K. A., Engstrom, J. N., & Antonson, D. A. (2006). *Effects of particle size on drainage quality from three lithologies*. Communication présentée à Poster paper presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD) (p. 1026-1050).
- Lee, J.-M., & Shackelford, C. D. (2005). Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 64-77. Tiré de <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=iih&AN=15382534&lang=fr&site=ehost-live>
- Leong, E.-C., Abuel-Naga, H., & Lu, Y. (2018). Water retention curves of geosynthetic clay liners. *7th International Conference on Unsaturated Soils, Hong Kong*.
- Lide, D. R. (1995). *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*: CRC press.
- Lin, L.-C., & Benson, C. H. (2000). Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(1), 40-49.
- Lindsay, M. B. J., Moncur, M. C., Bain, J. G., Jambor, J. L., Ptacek, C. J., & Blowes, D. W. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 57, 157-177.
- Liu, Y., Bouazza, A., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2015). Hydraulic performance of geosynthetic clay liners to sulfuric acid solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(1), 14-23.
- Liu, Y., Gates, W. P., & Bouazza, A. (2013). Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 71-80. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114412001008>
- Liu, Y., Wang, L. Z., & Jiang, W. (2018). Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners with Mining Solutions. 430-436.
- Lu, Y., Abuel-Naga, H., & Bouazza, A. (2017). Water retention curve of GCLs using a modified sample holder in a chilled-mirror dew-point device. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1), 23-28.
- Lu, Y., Abuel-Naga, H., Leong, E.-C., Bouazza, A., & Lock, P. (2018). Effect of water salinity on the water retention curve of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6), 707-714.
- Madore, L., & Caron, G. (2018). La production minérale au Québec en 2016. *Mines en chiffres [En ligne]*, Institut de la statistique du Québec. Tiré de [www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/mines-chiffres-2018.pdf](http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/mines-chiffres-2018.pdf)
- Makusa, G. P., Bradshaw, S. L., Berns, E., Benson, C. H., & Knutsson, S. (2014). Freeze-thaw cycling concurrent with cation exchange and the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 591-598.
- Malvern Panalytical. (2019). Diffraction laser (DL). Tiré de <https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>

- Matyas, E. (1967). Air and water permeability of compacted soils. Dans *Permeability and capillarity of soils*: ASTM International.
- Mazzieri, F., Di Emidio, G., Fratolocchi, E., Di Sante, M., & Pasqualini, E. (2013). Permeation of two GCLs with an acidic metal-rich synthetic leachate. *Geotextiles and Geomembranes*, 40, 1-11.
- Mazzieri, F., Di Emidio, G., & Pasqualini, E. (2017). Effect of wet-and-dry ageing in seawater on the swelling properties and hydraulic conductivity of two amended bentonites. *Applied Clay Science*, 142, 40-51.
- Mazzieri, F., & Pasqualini, E. (2000). Permeability of damaged geosynthetic clay liners. *Geosynthetics International*, 7(2), 101-118.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(8), 773-787.
- 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., Aubertin, M., Maqsood, A., & Bussière, B. (2006). Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1121-1132.
- McBride, M. (1994). Environmental chemistry of soils. Oxford Univ. Press, New York. *Environmental chemistry of soils*. Oxford Univ. Press, New York., -.
- Meer, S. R., & Benson, C. H. (2007). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 550-563.
- Melchior, S. (2002). *Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers*. Communication présentée à Clay Geosynthetics Barriers, Proceedings of the international symposium IS Nuremberg (p. 321-330).
- Merkus, H. G. (2009). *Particle size measurements: fundamentals, practice, quality* (vol. 17): Springer Science & Business Media.
- MERN et MDELCC. (2017). *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec*. Tiré de [mern.gouv.qc.ca/mines/publications/index.jsp](http://mern.gouv.qc.ca/mines/publications/index.jsp)
- Mesri, G., & Olson, R. E. (1971). Mechanisms Controlling the Permeability of Clays.
- Meyers, D. (2011). Office of Water Quality Technical Memorandum 2011.03: Analysis to Support the Replacement of Weiss (1970) Equations by Benson and Krause (1980, 1984) Equations for USGS Computation of Solubility of Dissolved Oxygen in Water. *Office of Water Quality, Reston, VA, USA*.
- Miller, S., & Murray, G. (1988). *Prediction of time dependent factors in acid mine drainage*. Communication présentée à Proceedings of the 3rd International Mine Water Congress, Melbourne, Australia.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior.

- Moncur, M., Ptacek, C., Blowes, D., & Jambor, J. (2005). Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry*, 20(3), 639-659.
- Mooney, R., Keenan, A., & Wood, L. (1952). Adsorption of water vapor by montmorillonite. II. Effect of exchangeable ions and lattice swelling as measured by X-ray diffraction. *Journal of the American Chemical Society*, 74(6), 1371-1374.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.
- Natural Resources Canada. (2018). Canadian Mineral Production. Tiré de <https://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/publications/17722>
- Nicholson, R., & Scharer, J. (1994). Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics, Environmental Geochemistry of sulphide oxidation: American Chemical Society, Washington, DC.
- Nicholson, R. V., Gillham, R. W., & Reardon, E. J. (1988). Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5), 1077-1085.
- Nordstrom, D. K. (1999). Geochemistry of acid mine waters. *The environmental geochemistry of mineral deposits*.
- Norrish, K., & Rausell-Colom, J. (1962). Effect of freezing on the swelling of clay minerals. *Clay Minerals Bulletin*, 5, 9-16.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 4(2), 439-473.
- Peterson, S. R., & Gee, G. W. (1985). Interactions between acidic solutions and clay liners: permeability and neutralization. Dans *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*: ASTM International.
- Petrov, R. J., & Rowe, R. K. (1997a). Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 863-885.
- Petrov, R. J., & Rowe, R. K. (1997b). Geosynthetic clay liner (GCL) - chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 863-885. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1139/t97-055>
- Petrov, R. J., Rowe, R. K., & Quigley, R. M. (1997). Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8), 683-695.
- Pintado, X., Lloret, A., & Romero, E. (2009). Assessment of the use of the vapour equilibrium technique in controlled-suction tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(4), 411-423. Tiré de <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/T08-130>
- Plumlee, G. S., Logsdon, M. J., & Filipek, L. H. (1999). *The environmental geochemistry of mineral deposits* (vol. 6): Pacific Section Society of economic.

- Podgorney, R. K., & Bennett, J. E. (2006). Evaluating the long-term performance of geosynthetic clay liners exposed to freeze-thaw. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(2), 265-268.
- Power, K. C., Vanapalli, S. K., & Garga, V. K. (2008). A revised contact filter paper method. *Geotechnical Testing Journal*, 31(6), 461-469.
- Pradhan, S. M., Katti, K. S., & Katti, D. R. (2015). Evolution of Molecular Interactions in the Interlayer of Na-Montmorillonite Swelling Clay with Increasing Hydration. *International Journal of Geomechanics*, 15(5).
- Price, W. A. (2009). Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. *MEND report*, 1(1), 579.
- Prost, R., Benchara, A., & Huard, E. (1998). State and location of water adsorbed on clay minerals: consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena.
- Rajesh, S., & Khan, V. (2018). Characterization of water sorption and retention behavior of partially saturated GCLs using vapor equilibrium and filter paper methods. *Applied Clay Science*, 157, 177-188.
- Rayhani, M. T., Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Take, W. A., & Siemens, G. (2011). Factors affecting GCL hydration under isothermal conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(6), 525-533.
- Renken, K. (2006). *Pilot Study of Soil-based Covers for Acid Rock Drainage Mitigation*. (Doctorate thesis in civil and environmental Engineering, University of Western Ontario).
- Renken, K., Yanful, E., & Mchaina, D. M. (2009). Field performance evaluation of soil-based cover systems to mitigate ARD for the closure of a potentially acid-generating tailings storage facility.
- Rouf, M., Singh, R., Bouazza, A., Gates, W., & Rowe, R. (2014). *Evaluation of a geosynthetic clay liner water retention curve using vapour equilibrium technique*. Communication présentée à Proceedings of the 6th international conference on unsaturated soils, UNSAT 2014 (p. 1003-1009).
- Rouf, M. A., Bouazza, A., Singh, R. M., Gates, W. P., & Rowe, R. K. (2016). Gas flow unified measurement system for sequential measurement of gas diffusion and gas permeability of partially hydrated geosynthetic clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(6), 1000-1012.
- Rowe, K., Brachman, R. W., Hosney, M. S., Take, W. A., & Arnepalli, D. (2017). Insight into hydraulic conductivity testing of GCLs exhumed after 5 and 7 years in a cover. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja).
- Rowe, R. K., Ashe, L. E., Take, W. A., & Brachman, R. W. I. (2014). Factors affecting the down-slope erosion of bentonite in a GCL. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(5), 445-456. doi:10.1016/j.geotexmem.2014.07.002
- Rowe, R. K., Bostwick, L. E., & Take, W. A. (2011). Effect of GCL Properties on Shrinkage When Subjected to Wet-Dry Cycles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1019-1027.

- Rowe, R. K., Brachman, R. W., Take, W. A., Rentz, A., & Ashe, L. E. (2016a). Field and laboratory observations of down-slope bentonite migration in exposed composite liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 686-706.
- Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Take, W. A., Rentz, A., & Ashe, L. E. (2016b). Field and laboratory observations of down-slope bentonite migration in exposed composite liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 686-706. doi:10.1016/j.geotexmem.2016.05.004
- Rowe, R. K., & Hosney, M. S. (2013). Laboratory investigation of GCL performance for covering arsenic contaminated mine wastes. *Geotextiles and Geomembranes*, 39, 63-77.
- Sari, K., & Chai, J. (2013). Self healing capacity of geosynthetic clay liners and influencing factors. *Geotextiles and Geomembranes*, 41, 64-71.
- Scalia IV, J., & Benson, C. H. (2011). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers with composite barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(1), 1-13.
- Scalia, J., & Benson, C. H. (2010). Preferential flow in geosynthetic clay liners exhumed from final covers with composite barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(10), 1101-1111.
- Sere, A. (1995). *Ouvrages renforcés par géotextiles charges en tête: comportement et dimensionnement*. (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
- Serna, F., Lagneau, J., & Carpentier, J.-M. (2014). La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques. *Chim. Nouv*, 1-12.
- Shackelford, C. D. (1994). Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. Dans *Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil*: ASTM International.
- Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., & Lin, L. (2000). Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 133-161. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114499000242>
- Shackelford, C. D., Malusis, M. A., Majeski, M. J., & Stern, R. T. (1999). Electrical conductivity breakthrough curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4), 260-270.
- Shackelford, C. D., Meier, A., & Sample-Lord, K. (2016). Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 707-718.
- Shackelford, C. D., Sevick, G. W., & Eykholt, G. R. (2010). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 149-162.
- Shan, H.-Y., & Chen, R.-H. (2003). Effect of gravel subgrade on hydraulic performance of geosynthetic clay liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(6), 339-354.
- Shan, H.-Y., & Lai, Y.-J. (2002). Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(1), 19-38. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114401000231>

- Shan, H.-Y., & Yao, J.-T. (2000). Measurement of air permeability of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 251-261. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114499000308>
- Sivakumar Babu, G. L., Sporer, H., Zanzinger, H., & Gartung, E. (2001). Self-Healing Properties of Geosynthetic Clay Liners. *Geosynthetics International*, 8(5), 461-470.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis*: Cengage learning.
- Southen, J. M., & Rowe, K. (2007). Evaluation of the water retention curve for geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 2-9.
- Southen, J. M., & Rowe, R. K. (2004). *Investigation of the behavior of geosynthetic clay liners subjected to thermal gradients in basal liner applications*. Communication présentée à Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology: 2nd Symposium.
- St-Laurent, J.-F., Chev e, N., & Paradis, M. (2015). tude de cas : Site minier New Calumet, validation d'un recouvrement avec g eomembrane bentonitique. *68e Conf erence Canadienne de G eotechnique, Québec, Canada*.
- Stark, T. D. (1998). *Bentonite migration in geosynthetic clay liners*. Communication pr esent e   Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta (vol. 1, p. 315-320).
- Svensson, P. D., & Hansen, S. (2010). Freezing and thawing of montmorillonite — A time-resolved synchrotron X-ray diffraction study. *Applied Clay Science*, 49(3), 127-134.
- Takeo, N. (2005). Atlas of Eh-pH diagrams. *Geological survey of Japan open file report*, 419, 102.
- Tang, G. X., Graham, J., Blatz, J., Gray, M., & Rajapakse, R. (2002). Suctions, stresses and strengths in unsaturated sand–bentonite. *Engineering Geology*, 64(2-3), 147-156.
- Taylor-Lange, S. C., Lamon, E. L., Riding, K. A., & Juenger, M. C. G. (2015). Calcined kaolinite–bentonite clay blends as supplementary cementitious materials. *Applied Clay Science*, 108, 84-93. Tiré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131715000423>
- Toussaint, R. (2016). *Influences des caractéristiques physico-chimiques de résidus miniers sulfureux sur leur réactivité à l'oxygène*. ( cole Polytechnique de Montréal).
- Touze-Foltz, N. (2012). Geosynthetic clay liners: performance and long-term durability. (Retrieved from <https://geosynt.files.wordpress.com/2012/04/nathalie-touze-foltz-gcl.pdf>).
- Touze-Foltz, N., Bannour, H., Barral, C., & Stoltz, G. (2016). A review of the performance of geosynthetics for environmental protection. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(5), 656-672.
- Touze-Foltz, N., Court e, A., & Croissant, D. (2011). *Influence de la masse surfacique de bentonite sur le flux à travers les géosynthétiques bentonitiques*. Communication pr esent e   8 emes Rencontres G eosynth tiques (p. p. 255-p. 260).
- U.S. Geological Survey. (2019). DOTABLES - Dissolved oxygen solubility tables. Tiré de <https://water.usgs.gov/software/DOTABLES/>

- van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- van Genuchten, M. T., Simunek, F., Leij, F., & Sejna, M. (2009). The RETC code (version 6.02) for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Vasko, S., Jo, H., Benson, C. H., Edil, T. B., & Katsumi, T. (2001). *Hydraulic conductivity of partially prehydrated geosynthetic clay liners permeated with aqueous calcium chloride solutions*. Communication présentée à Geosynthetics Conference (vol. 2001, p. 685-699).
- Villar, M. V., & Lloret, A. (2008). Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 39(1-2), 38-49.
- von Maubeuge, K. (2002). Investigation of bentonite requirements for geosynthetic clay barriers. *Clay Geosynthetic Barriers*, 155-163.
- von Maubeuge, K. P., & Ehrenberg, H. (2014). Investigation of Bentonite Mass per Unit Area Requirements for Geosynthetic Clay Liners. Dans *Paper Presented at the 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin*.
- Wexler, A., & Hasegawa, S. (1954). Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range 0 to 50 C. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 53(1), 19-26.
- Wijaya, M., Leong, E. C., & Rahardjo, H. (2015). Effect of shrinkage on air-entry value of soils. *Soils and Foundations*, 55(1), 166-180.
- Yesiller, N., Risken, J., Hanson, J., & Darius, J. (2014). Effects of Hydration Fluid on Moisture-Suction Relationships for Geosynthetic Clay Liners. *Proceedings UNSAT2014*.
- Yong, R. (1995). *The Rietveld Method*, International Union of Crystallography: Oxford Science Publications.
- Young, J. F. (1967). Humidity control in the laboratory using salt solutions—a review. *Journal of Applied Chemistry*, 17(9), 241-245.
- Zhu, W., Lu, C.-H., Chang, F.-C., & Kuo, S.-W. (2012). Supramolecular ionic strength-modulating microstructures and properties of nacre-like biomimetic nanocomposites containing high loading clay. *RSC Advances*, 2(15), 6295-6305.

## ANNEXE A - ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

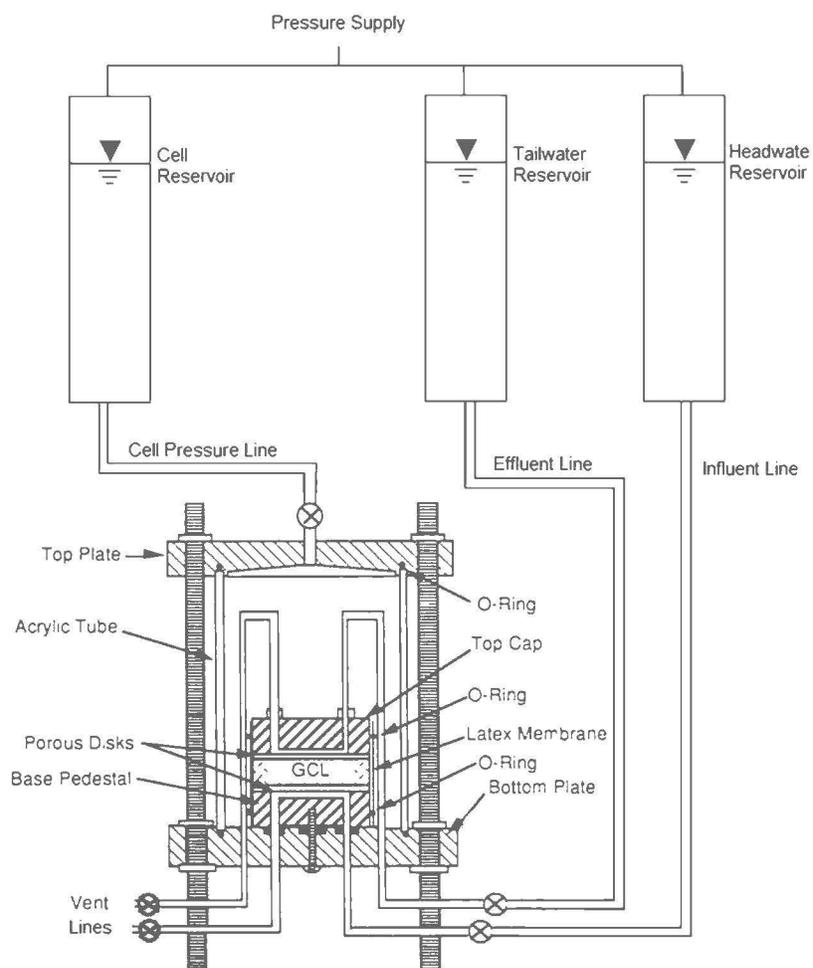


Figure A-1 : Perméamètre à paroi flexible et montage utilisé pour l'essai encadré par la norme ASTM D5887

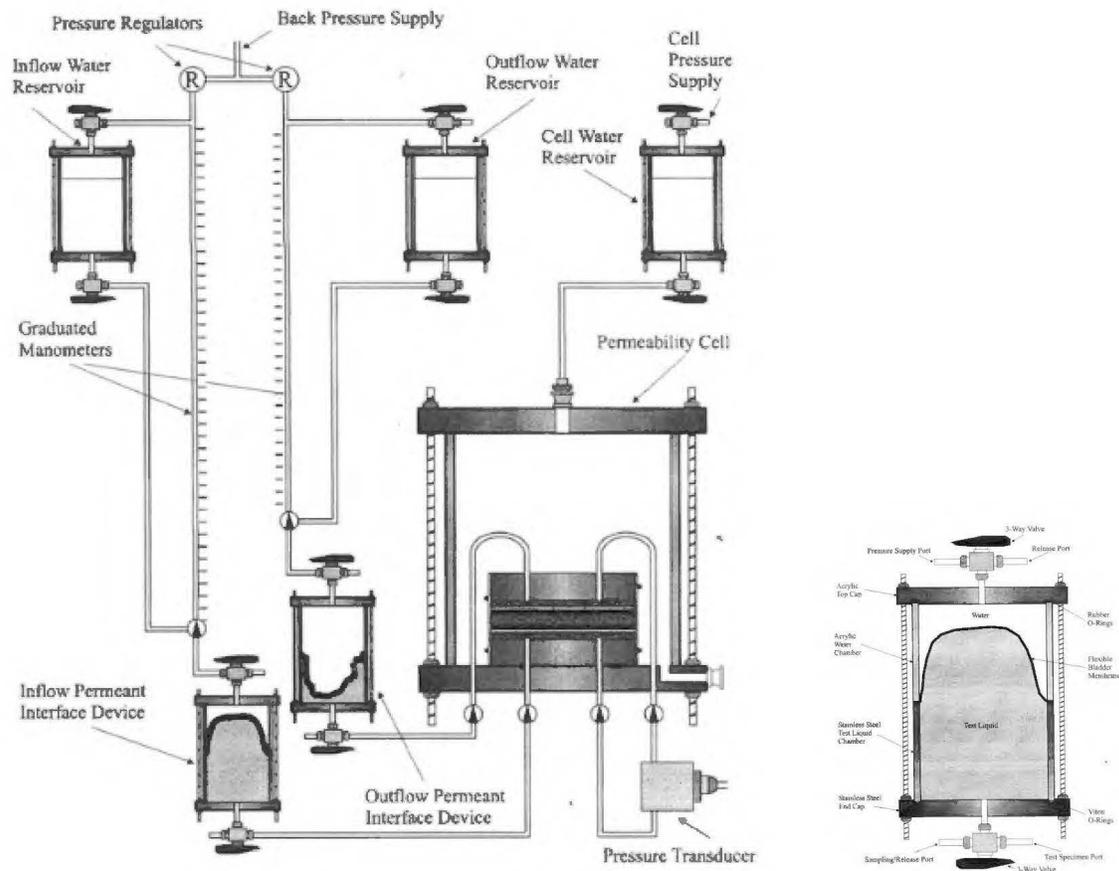


Figure A-2: Perméamètre à paroi flexible et montage utilisé pour l'essai encadré par la norme ASTM D6766

## ANNEXE B – RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION PHYSIQUE

Tableau B-1 : Résultats d'analyse  
granulométrique – Bnt-Ref-01

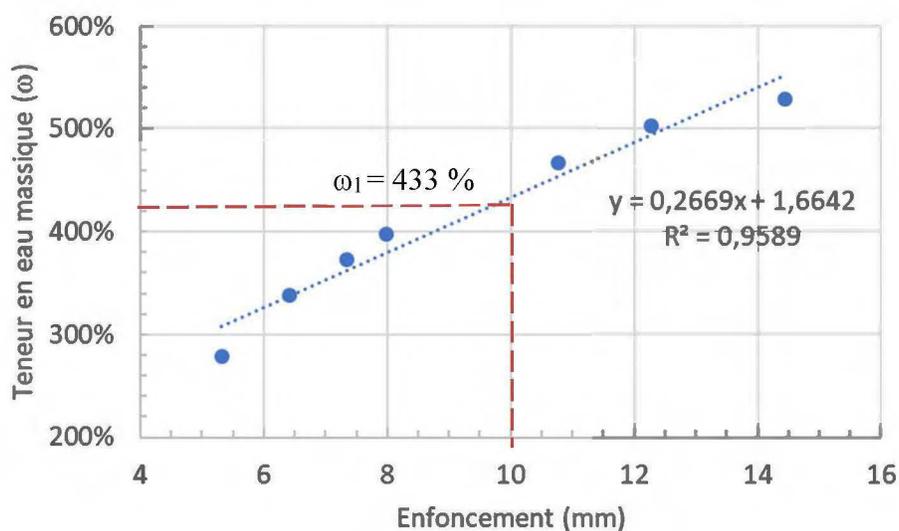
Paramètre	Unités	Valeur
$Cu = D_{60}/D_{10}$	(-)	11,14062
$Cc = D_{30}^2/(D_{60} * D_{10})$	(-)	3,038923
$U = (D_{90}-D_{10})/D_{50}$	(-)	2,074647
$D_{10}$	( $\mu\text{m}$ )	26,30228
$D_{20}$	( $\mu\text{m}$ )	103,472
$D_{30}$	( $\mu\text{m}$ )	153,0411
$D_{40}$	( $\mu\text{m}$ )	197,9505
$D_{50}$	( $\mu\text{m}$ )	243,8051
$D_{60}$	( $\mu\text{m}$ )	293,0237
$D_{70}$	( $\mu\text{m}$ )	348,6898
$D_{80}$	( $\mu\text{m}$ )	421,468
$D_{90}$	( $\mu\text{m}$ )	532,1118

Tableau B-2 : Résultats d'analyse  
granulométrique – Bnt-Ref-02

Paramètre	Unités	Valeur
$Cu = D_{60}/D_{10}$	(-)	16,09459
$Cc = D_{30}^2/(D_{60} * D_{10})$	(-)	4,145406
$U = (D_{90}-D_{10})/D_{50}$	(-)	2,140557
$D_{10}$	( $\mu\text{m}$ )	17,81452
$D_{20}$	( $\mu\text{m}$ )	90,18997
$D_{30}$	( $\mu\text{m}$ )	145,5116
$D_{40}$	( $\mu\text{m}$ )	191,2922
$D_{50}$	( $\mu\text{m}$ )	237,1986
$D_{60}$	( $\mu\text{m}$ )	286,7173
$D_{70}$	( $\mu\text{m}$ )	342,4808
$D_{80}$	( $\mu\text{m}$ )	413,4639
$D_{90}$	( $\mu\text{m}$ )	525,5515

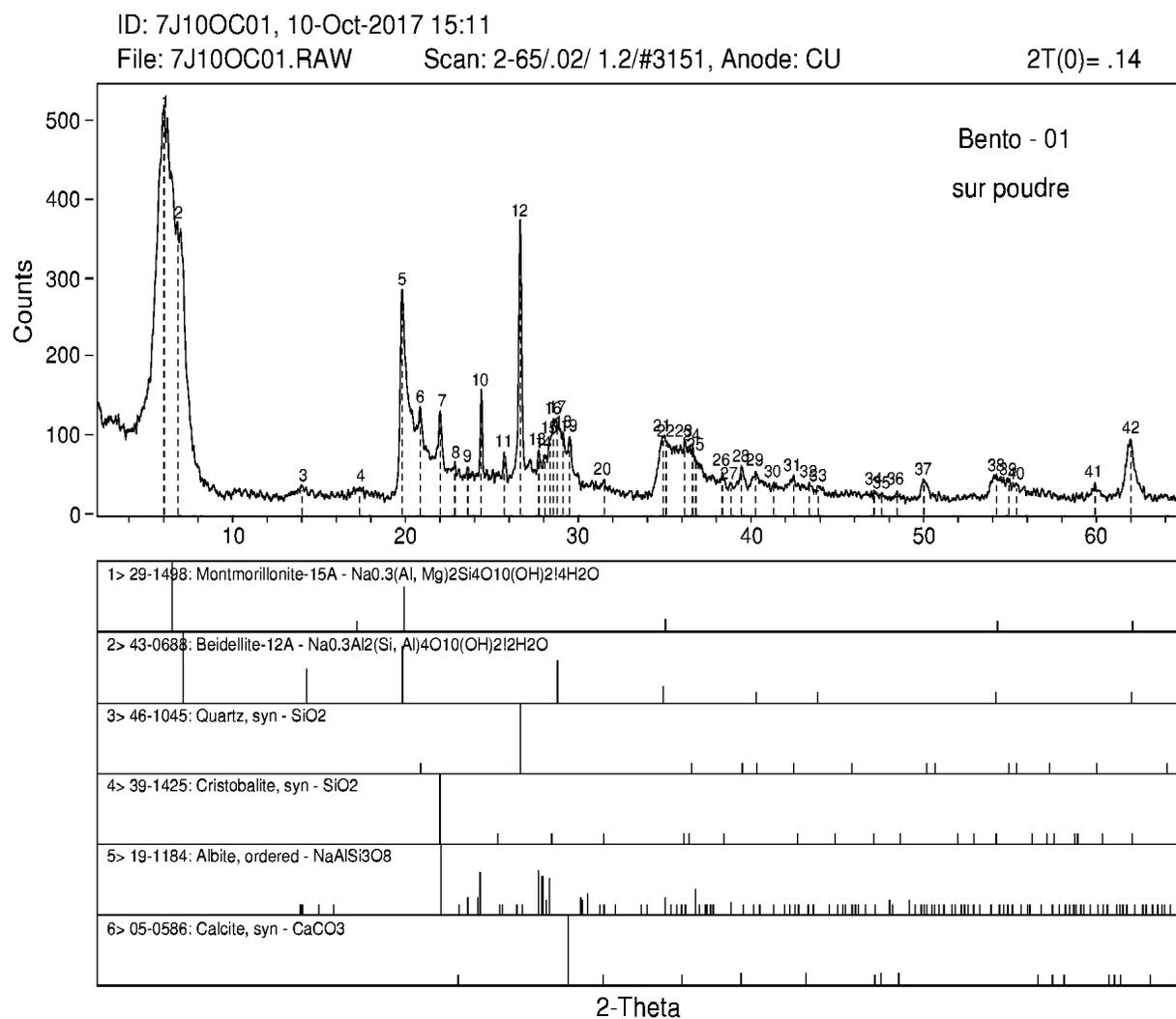
Tableau B-3 : Détermination de la limite de liquidité ( $\omega_l$ )

Point	Enfoncement (mm)			Enfoncement moyen (mm)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau (%)
1 - 1	5,42	5,34	5,53	5,43	11,0	2,9	279
1 - 2	5,20	5,25	5,18	5,21			
2	6,53	6,43	6,30	6,42	27,2	6,2	339
3	7,21	7,39	7,44	7,35	31,2	6,6	373
4	7,86	8,08	8,05	7,99	23,4	4,7	398
5	10,84	10,75	10,71	10,77	42,0	7,4	468
6	12,42	12,25	12,18	12,28	42,2	7,0	503
7	14,36	14,55	14,40	14,44	36,5	5,8	529

Figure B-1 : Détermination de la limite de liquidité ( $\omega_L$ )Tableau B-4 : Détermination de la limite de plasticité ( $\omega_p$ )

Essai	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau (%)
1	12,2	8,8	39
2	13,0	9,9	31

## ANNEXE C – RÉSULTATS MINÉRALOGIQUES



site Laval, Quebec - Thu Oct 19 2017 @9:34am

Figure C-1 : Diffractogramme et interprétation qualitative (Bnt-Ref-06)

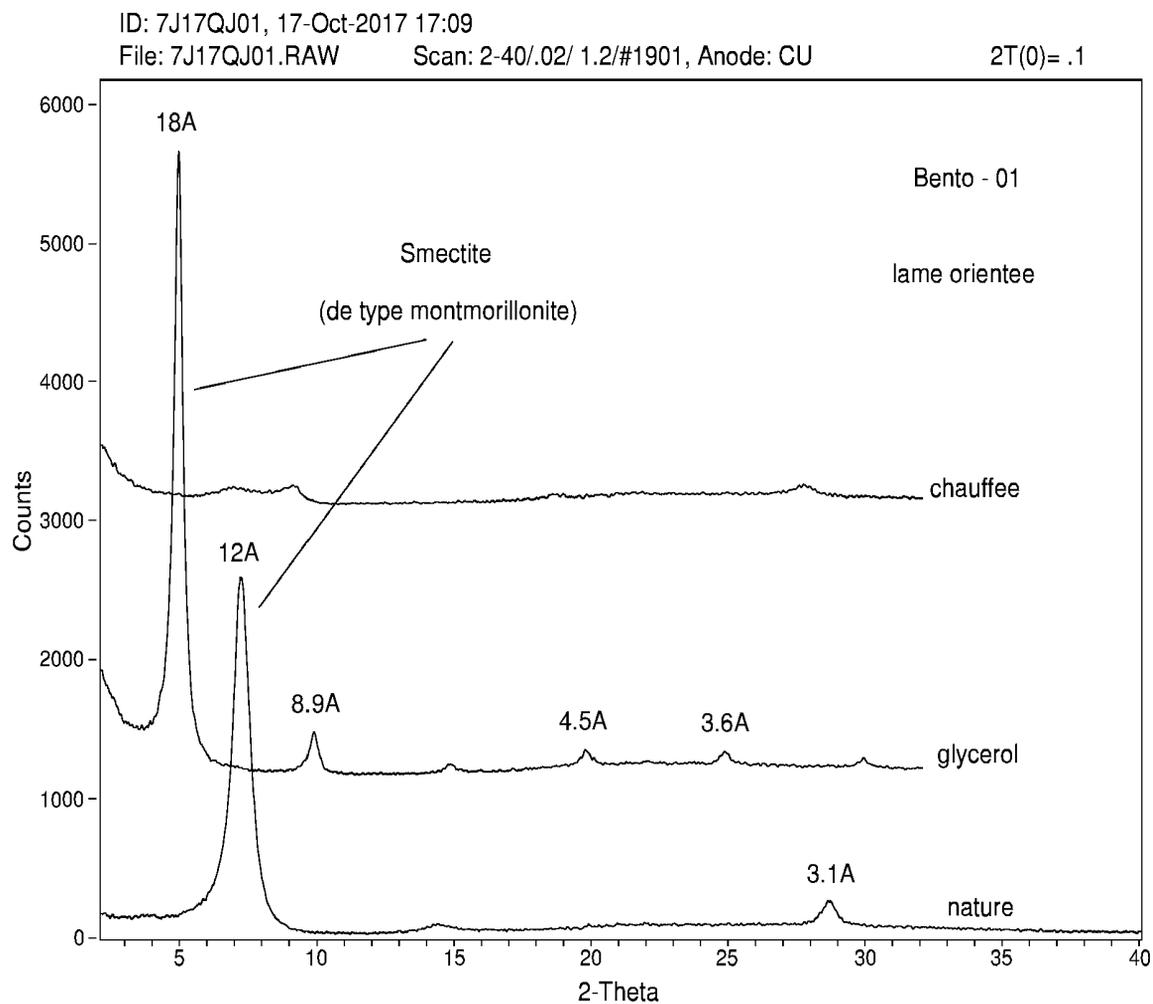


Figure C-2 : Identification des phases potentielles par traitements complémentaires (Bnt-Ref-06)

## Tableau C-1 : Pics du diffractogramme (Bnt-Ref-06)

==== Universite Laval, Quebec. =====  
 Jade: Peak Listing Wed Oct 18 2017 @4:13pm

File: 7J100C01.RAW> 7J100C01, 10-Oct-2017 15:11

----- Scan Parameters: ----- Search Parameters: -----  
 Radiation = CU\_1.54184 || Filter length(pts) = 19  
 Scan Range = 2- 65 || Noise level(sigmas) = 3.5  
 Step Size = .02 || Intensity cutoff(%) = .5-100  
 Count Time = 1.2 sec. || 2-Theta Zero (degs) = .14

#	Peak-Position		Centroid-Position		Peak & Area are without Bkgrd					
	2Theta	d	2Theta	d	Bkgrd	Peak	I%	Area	I%	FWHM*
1:	6.020	14.6814	6.024	14.6719	84	434	100.0	661	100.0	1.371
2:	6.819	12.9622	6.818	12.9649	80	290	66.8	332	50.2	1.030
3:	14.019	6.3174	14.023	6.3155	18	18	4.1	15	2.3	0.750
4:	17.341	5.1138	17.346	5.1124	17	17	3.9	7	1.1	0.371
5:	19.800	4.4839	19.832	4.4769	36	249	57.4	81	12.3	0.293
6:	20.859	4.2587	20.844	4.2616	37	98	22.6	122	18.5	1.120
7:	22.018	4.0371	22.015	4.0377	62	68	15.7	12	1.8	0.159
8:	22.860	3.8902	22.856	3.8909	48	18	4.1	2	0.3	0.100
9:	23.602	3.7695	23.602	3.7695	43	17	3.9	2	0.3	0.106
10:	24.382	3.6506	24.386	3.6501	43	115	26.5	16	2.4	0.125
11:	25.719	3.4639	25.723	3.4633	42	36	8.3	5	0.8	0.125
12:	26.640	3.3462	26.640	3.3461	47	326	75.1	67	10.1	0.185
13:	27.719	3.2183	27.718	3.2184	47	34	7.8	4	0.6	0.106
14:	28.079	3.1778	28.084	3.1773	42	33	7.6	16	2.4	0.436
15:	28.361	3.1470	28.370	3.1460	45	49	11.3	29	4.4	0.533
16:	28.561	3.1254	28.578	3.1235	44	76	17.5	83	12.6	0.983
17:	28.794	3.1005	28.794	3.1005	44	77	17.7	84	12.7	0.982
18:	29.120	3.0665	29.097	3.0689	40	64	14.7	69	10.4	0.970
19:	29.500	3.0280	29.485	3.0295	38	60	13.8	19	2.9	0.285
20:	31.516	2.8387	31.503	2.8399	27	16	3.7	4	0.6	0.225
21:	34.920	2.5694	34.924	2.5691	40	59	13.6	36	5.4	0.549
22:	35.080	2.5581	35.065	2.5591	39	54	12.4	51	7.7	0.850
23:	36.141	2.4853	36.139	2.4855	30	62	14.3	123	18.6	1.785
24:	36.620	2.4539	36.618	2.4541	46	41	9.4	20	3.0	0.439
25:	36.815	2.4414	36.815	2.4414	68	4	0.9	1	0.2	0.100
26:	38.343	2.3476	38.349	2.3472	34	19	4.4	3	0.5	0.142
27:	38.839	2.3187	38.836	2.3189	31	8	1.8	1	0.2	0.112
28:	39.443	2.2846	39.446	2.2844	30	31	7.1	4	0.6	0.116
29:	40.280	2.2390	40.275	2.2393	29	25	5.8	10	1.5	0.360
30:	41.322	2.1849	41.319	2.1851	29	11	2.5	2	0.3	0.164
31:	42.462	2.1289	42.444	2.1297	27	21	4.8	10	1.5	0.429
32:	43.363	2.0867	43.375	2.0861	25	15	3.5	5	0.8	0.300
33:	43.897	2.0625	43.912	2.0619	26	10	2.3	2	0.3	0.180
34:	47.129	1.9284	47.129	1.9284	19	11	2.5	1	0.2	0.082
35:	47.563	1.9118	47.563	1.9118	20	6	1.4	1	0.2	0.150
36:	48.458	1.8785	48.473	1.8780	16	13	3.0	3	0.5	0.208
37:	50.010	1.8238	50.010	1.8238	14	30	6.9	19	2.9	0.570
38:	54.219	1.6918	54.214	1.6919	20	30	6.9	23	3.5	0.690
39:	54.942	1.6712	54.924	1.6717	20	24	5.5	37	5.6	1.388
40:	55.378	1.6591	55.356	1.6597	21	18	4.1	13	2.0	0.650
41:	59.919	1.5437	59.920	1.5437	16	24	5.5	13	2.0	0.488
42:	61.995	1.4969	61.995	1.4969	16	79	18.2	46	7.0	0.524

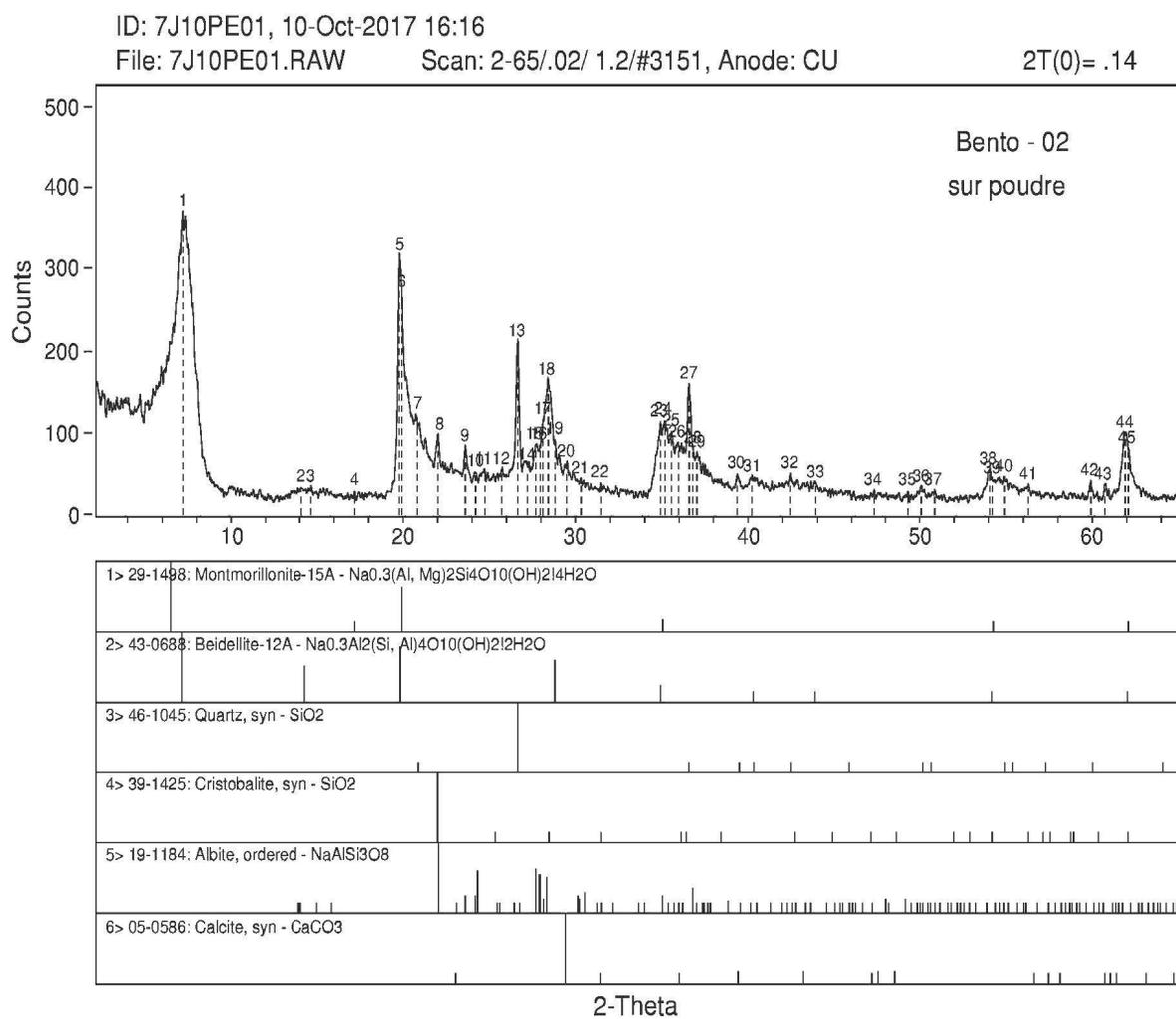
\* Intensity values are based on total raw counts.

Tableau C-2 : Intensité des pics associés à un minéral (Bnt-Ref-06)

# de pic	Minéral associé au pic	Intensité du pic sur le diffractogramme (sans bruit de fond)	Intensité de référence du pic du minéral ( $I_0$ )	Ratio du minéral (Pic / $I_0$ )
1	Mnt 15A	434	100	4,3
2	Beidellite 12A	290	100	2,9
Légèrement avant #7	Cristobalite	58	100	0,6
7	Albite	90	100	0,9
9	Orthose	17	80	0,2
10	Albite	115	60	1,9
12	Quartz	326	100	3,3
13	Albite	34	65	0,5
17	Beidellite	77	60	1,3
19	Calcite	60	100	0,6
37	Albite et quartz	19	12 pour chaque minéral	1,6

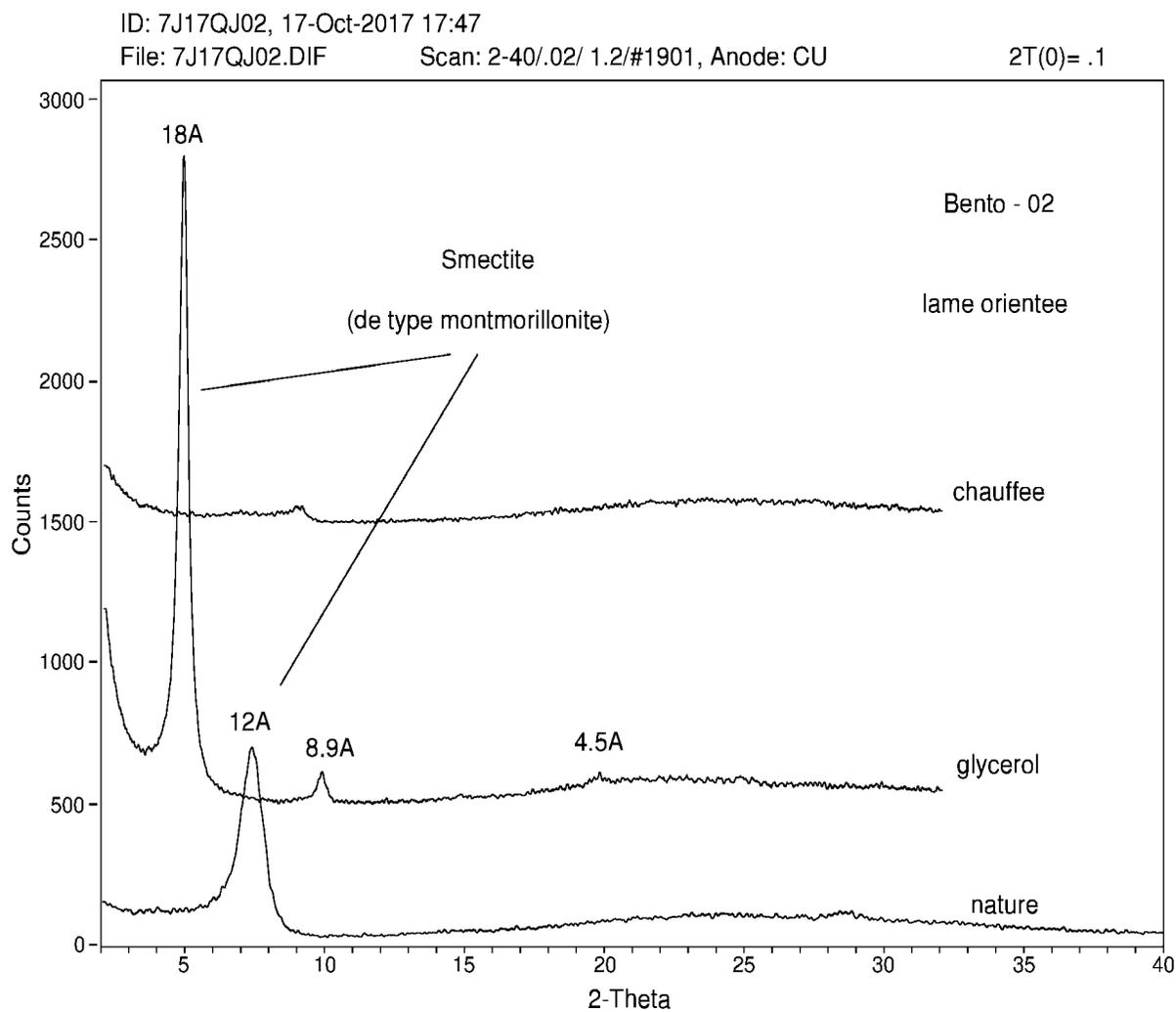
Tableau C-3 : Analyse semi-quantitative des phases minérales (Bnt-Ref-06)

Minéral	Ratio du minéral	Pourcentage massique
Montmorillonite 15A	4,3	40
Beidellite 12A	2,1	19
Cristobalite	0,6	5
Orthose	0,2	2
Albite	1,1	10
Calcite	0,6	5
Quartz	2,0	19
Somme	10,9	100%



Universite Laval, Quebec. - Thu Oct 19 2017 @9:35am

Figure C-3 : Diffractogramme et interprétation qualitative (Bnt-Ref-07)



Universite Laval, Quebec. - Thu Oct 19 2017 @9:38am

Figure C-4 : Identification des phases potentielles par traitements complémentaires (Bnt-Ref-07)

Tableau C-4 : Pics du diffractogramme (Bnt-Ref-07)

==== Universite Laval, Quebec. =====  
 Jade: Peak Listing Wed Oct 18 2017 @4:41pm  
 =====

File: 7J10PE01.RAW> 7J10PE01, 10-Oct-2017 16:16

----- Scan Parameters: ----- Search Parameters: -----  
 Radiation = CU\_1.54184 || Filter length(pts) = 19  
 Scan Range = 2- 65 || Noise level(sigmas) = 3.5  
 Step Size = .02 || Intensity cutoff(%) = .5-100  
 Count Time = 1.2 sec. || 2-Theta Zero (degs) = .14  
 -----

#	Peak-Position		Centroid-Position		Peak & Area are without Bkgrd					
	2Theta	d	2Theta	d	Bkgrd	Peak	I%	Area	I%	FWHM*
1:	7.200	12.2780	7.206	12.2669	83	288	100.0	365	100.0	1.141
2:	14.081	6.2895	14.076	6.2918	18	15	5.2	15	4.1	0.900
3:	14.662	6.0418	14.646	6.0484	18	17	5.9	9	2.5	0.476
4:	17.180	5.1613	17.177	5.1622	17	11	3.8	1	0.3	0.082
5:	19.781	4.4882	19.819	4.4798	32	288	100.0	97	26.6	0.303
6:	19.918	4.4577	19.892	4.4634	34	239	83.0	148	40.5	0.557
7:	20.825	4.2656	20.825	4.2656	36	86	29.9	130	35.6	1.360
8:	22.019	4.0369	22.017	4.0373	58	40	13.9	6	1.6	0.135
9:	23.603	3.7695	23.604	3.7692	44	40	13.9	5	1.4	0.112
10:	24.198	3.6780	24.193	3.6787	39	12	4.2	2	0.5	0.150
11:	24.736	3.5993	24.736	3.5993	41	15	5.2	2	0.5	0.120
12:	25.728	3.4626	25.728	3.4626	45	11	3.8	1	0.3	0.082
13:	26.658	3.3439	26.646	3.3454	52	161	55.9	32	8.8	0.179
14:	27.199	3.2786	27.199	3.2786	52	9	3.1	1	0.3	0.100
15:	27.701	3.2204	27.708	3.2195	49	36	12.5	8	2.2	0.200
16:	27.961	3.1910	27.960	3.1911	44	41	14.2	33	9.0	0.724
17:	28.121	3.1732	28.165	3.1683	44	71	24.7	88	24.1	1.115
18:	28.420	3.1405	28.422	3.1403	46	118	41.0	73	20.0	0.557
19:	28.820	3.0979	28.816	3.0982	42	49	17.0	12	3.3	0.220
20:	29.501	3.0278	29.501	3.0278	48	17	5.9	2	0.5	0.106
21:	30.337	2.9463	30.337	2.9463	37	7	2.4	1	0.3	0.129
22:	31.466	2.8431	31.469	2.8429	27	11	3.8	1	0.3	0.082
23:	34.919	2.5695	34.934	2.5684	33	80	27.8	67	18.4	0.754
24:	35.180	2.5510	35.171	2.5516	38	76	26.4	66	18.1	0.782
25:	35.560	2.5246	35.546	2.5256	33	68	23.6	112	30.7	1.482
26:	35.959	2.4975	35.960	2.4974	31	57	19.8	119	32.6	1.879
27:	36.579	2.4566	36.587	2.4560	47	112	38.9	37	10.1	0.297
28:	36.796	2.4426	36.797	2.4425	60	21	7.3	3	0.8	0.129
29:	37.041	2.4270	37.041	2.4270	65	11	3.8	1	0.3	0.082
30:	39.381	2.2880	39.395	2.2872	29	20	6.9	4	1.1	0.180
31:	40.240	2.2411	40.250	2.2406	28	20	6.9	11	3.0	0.495
32:	42.441	2.1299	42.438	2.1300	28	22	7.6	11	3.0	0.450
33:	43.899	2.0625	43.893	2.0627	26	13	4.5	3	0.8	0.208
34:	47.298	1.9218	47.295	1.9220	17	13	4.5	1	0.3	0.069
35:	49.322	1.8476	49.316	1.8479	16	12	4.2	1	0.3	0.075
36:	50.082	1.8214	50.085	1.8212	15	20	6.9	9	2.5	0.405
37:	50.864	1.7952	50.843	1.7959	15	15	5.2	7	1.9	0.420
38:	54.060	1.6964	54.066	1.6962	19	36	12.5	19	5.2	0.475
39:	54.218	1.6918	54.191	1.6926	20	25	8.7	25	6.8	0.900
40:	54.905	1.6722	54.905	1.6722	20	26	9.0	30	8.2	1.038
41:	56.280	1.6346	56.269	1.6349	23	14	4.9	2	0.5	0.129
42:	59.917	1.5438	59.915	1.5438	18	23	8.0	3	0.8	0.117
43:	60.724	1.5252	60.724	1.5252	18	19	6.6	2	0.5	0.095

Tableau C-5 : Intensité des pics associés à un minéral (Bnt-Ref-07)

# de pic	Minéral associé au pic	Intensité du pic sur le diffractogramme (sans bruit de fond)	Intensité de référence du pic du minéral ( $I_0$ )	Ratio du minéral (Pic / $I_0$ )
Avant 1 ( $2\theta = 6.5$ )	Mnt 15A	149	100	1,5
1	Beidellite 12A	288	100	2,9
5	Beidellite 12A	288	80	3,6
6	Mnt 15A	239	65	3,7
Entre 7 et 8 ( $2\theta = 21.9$ )	Cristobalite	42	100	0,4
8	Albite	40	100	0,4
9	Orthose	40	80	0,5
10	Albite	12	60	0,2
13	Quartz	161	100	1,6
15	Albite	36	65	0,6
20	Calcite	17	100	0,2

Tableau C-6 : Analyse semi-quantitative des phases minérales (Bnt-Ref-07)

Minéral	Ratio du minéral	Pourcentage massique
Montmorillonite 15A	2,6	29
Beidellite 12A	3,2	36
Cristobalite	0,4	5
Orthose	0,5	6
Albite	0,4	4
Calcite	0,2	2
Quartz	1,6	18
Somme	8,9	100

Tableau C-7 : Réconciliation minéralogie – Bnt-Ref

Minéral	Proportion (wt%)	Pourcentage massique							
		C	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Smectite	65,0	---	0,23	0,75	10,47	17,62	---	0,34	1,74
Calcite	2,0	0,30	---	---	---	---	---	0,66	---
Albite (ordered)	12,0	---	1,05	---	1,23	3,86	---	---	---
Cristobalite et quartz	15,0	---	---	---	---	7,01	---	---	---
Orthoclase	4,0	---	---	---	0,39	1,21	0,47	---	---
Somme des minéraux	98,0	0,30	1,28	0,75	12,09	29,69	0,47	1,00	1,74
Moyenne des analyses chimiques	---	n.d.	1,40	1,29	10,19	27,56	0,45	0,97	2,61

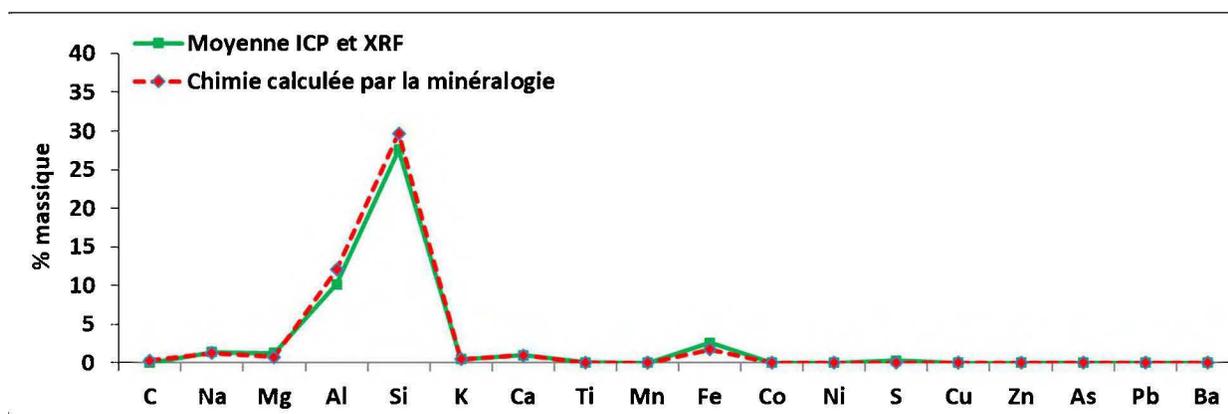


Figure C.5 : Réconciliation minéralogie – Bnt-Ref

## ANNEXE D – TEMPÉRATURES DES ÉCHANTILLONS – CYCLES DE GEL-DÉGEL

Tableau D-1 : Suivi des températures de gel et dégel – GCB24 (GCL1 – hydratation eau DI)

Phase	Complétée	Temp. (°C)	Durée (hrs)	Phase	Complétée	Temp. (°C)	Durée (hrs)
Gel 1	J1 – 07 :45*	-16,0	15,5	Gel 6	J1 - 07 :30	-13,8	13,2
Dégel 1	J1 – 13 :37	6,9	5,9	Dégel 6	J1 – 17 :30	21,3	10,0
Gel 2	J1 – 21 :15	-4,8	7,6	Gel 7	J2 - 08 :14	-15,5	14,8
Dégel 2	J2 – 06 :42	19,6	9,5	Dégel 7	J2 – 13 :30	2,8	5,3
Gel 3	J2 – 14 :29	-4,8	7,8	Gel 8	J2 – 20 :00	-4,8	6,5
Dégel 3	J2 – 19 :01	5,3	4,5	Dégel 8	J3 – 01 :10	3,1	5,2
Essai de perméabilité				Gel 9	J3 – 10 :14	-12,3	9,0
Gel 4	J1 – 10 :03	-5,5	7,0	Dégel 9	J3 – 16 :35	2,9	6,4
Dégel 4	J1 – 17 :05	15,1	14,7	Gel 10	J3 – 23 :30	-5,3	6,9
Gel 5	J2 – 07 :46	-5,3	7,8	Dégel 10	J4 – 09 :07	20,0	10,6
Dégel 5	J2 – 15 :33	20,2	17,5	Essai de perméabilité			
Essai de perméabilité							

\* Enregistrement des mesures en continues illustrées à la figure 3-5 arrêtées le jour 2 à 02 :30.

Tableau D-2 : Suivi des températures de gel et dégel – GCB21 (GCL3- hydratation DMAS)

Phase	Complétée	Temp. (°C)	Durée (hrs)	Phase	Complétée	Temp. (°C)	Durée (hrs)
Gel 1	J1 – 09 :00	-15,8	16,4	Gel 6	J1 – 06 :31	-16,0	11,0
Dégel 1	J1 – 14 :17	13,6	5,3	Dégel 6	J1 – 12 :10	19,2	5,7
Gel 2	J3 – 09 :29	-15,2	43,2	Gel 7	J1 – 16 :10	-7,8	4,0
Dégel 2	J3 – 17 :21	21,3	7,9	Dégel 7	J1 – 19 :51	12,8	3,7
Gel 3	?	?	?	Gel 8	J2 – 06 :10	-16,5	10,3
Dégel 3	J7 – 14 :19	13,0	n.d.	Dégel 8	J2 – 10 :14	11,6	4,1
Essai de perméabilité				Gel 9	J2 – 14 :23	-9,9	4,2
Gel 4	J1 – 08 :47	-16,3	15,5	Dégel 9	J2 – 18 :23	14,4	4,0
Dégel 4	J1 – 12 :40	12,2	3,9	Gel 10	J3 – 00 :30	-13,2	6,1
Gel 5	J1 – 15 :47	-4,7	3,1	Dégel 10	J4 – 11 :23	22,2	10,9
Dégel 5	J1 – 19 :06	14,7	3,3	Essai de perméabilité			
Essai de perméabilité							

Tableau D-3 : Suivi des températures de gel et dégel – GCB22 (GCL2- hydratation DMAS)

Phase	Complétée	Temp, (°C)	Durée (hrs)
Gel 1	J1 – 22 :00	-15,0	12,0
Dégel 1	J2 – 08 :52	20,2	10,9
Gel 2	J2 – 15 :32	-13,5	6,7
Dégel 2	J3 – 10 :20	20,4	18,8
Gel 3	J3 – 20 :45	-15,5	10,4
Dégel 3	J4 – 10 :03	19,3	13,3
Essai de perméabilité			
Gel 4	J1 – 10 :03	-14,3	16,5
Dégel 4	J1 – 17 :05	19,0	5,1
Gel 5	J2 – 07 :46	-13,8	18,8
Dégel 5	J2 – 15 :33	20,0	5,8
Essai de perméabilité			

Phase	Complétée	Temp, (°C)	Durée (hrs)
Gel 6	J1 - 07 :30	-14,1	20,2
Dégel 6	J1 – 17 :30	19,1	4,7
Gel 7	J2 - 08 :14	-14,0	18,1
Dégel 7	J2 – 13 :30	19,0	5,3
Gel 8	J2 – 20 :00	-6,0	3,1
Dégel 8	J3 – 01 :10	14,9	3,1
Gel 9	J3 – 10 :14	-15,7	12,0
Dégel 9	J3 – 16 :35	8,0	2,3
Gel 10	J3 – 23 :30	-14,6	4,8
Dégel 10	J4 – 09 :07	20,3	4,8
Essai de perméabilité			

## ANNEXE E – RÉSULTATS – COURBES DE RÉTENTION D’EAU

Tableau E-1 : Résultats détaillés des essais au WP4C – échantillons intacts

Échantillon	Succion (Mpa)	Épaisseur mm	Diamètre mm	Volume cm <sup>3</sup>	Masse	Masse	Mass eau	Teneur en	Degré	Indice des
					humide g	sèche g	ou DMA g	eau, w %	saturation, Sr %	
20A Intact	2,81	7,47	38,0	8,47	9,30	6,4	2,95	47,1%	53%	1,93
	7,00	7,13	37,0	7,66	8,43	6,4	2,08	33,1%	44%	1,65
	148,92	7,12	35,0	6,85	7,15	6,4	0,80	12,6%	20%	1,37
	107,84	7,01	33,2	6,08	7,23	6,4	0,88	13,9%	28%	1,11
20C Intact	2,19	7,40	37,0	7,95	8,88	6,2	2,69	43,9%	52%	1,82
	11,14	7,19	36,0	7,32	8,07	6,2	1,88	30,6%	42%	1,60
	24,81	7,10	34,8	6,75	7,58	6,2	1,39	22,5%	35%	1,40
	106,69	7,21	34,0	6,55	7,16	6,2	0,97	15,7%	26%	1,33
	186,61	7,23	33,8	6,49	6,86	6,2	0,67	10,8%	18%	1,31
	268,35	7,14	33,8	6,40	6,66	6,2	0,47	7,5%	13%	1,27
23C Intact	0,89	7,90	36,5	8,27	9,75	5,4	4,37	81,2%	75%	2,38
	1,27	7,71	36,0	7,84	8,81	5,4	3,43	63,8%	64%	2,21
	41,46	6,74	35,0	6,48	6,60	5,4	1,22	22,7%	30%	1,65
	23,37	6,66	33,9	6,01	6,54	5,4	1,16	21,6%	33%	1,46
	187,38	6,38	33,5	5,62	5,46	5,4	0,08	1,5%	3%	1,30
	167,31	6,62	33,2	5,73	5,56	5,4	0,18	3,3%	5%	1,34

Tableau E-2 : Résultats détaillés des essais au WP4C – échantillons remaniés

Échantillon	Succion (Mpa)	Épaisseur	Diamètre	Volume	Masse humide	Masse sèche	Mass eau ou DMAS	Teneur en eau, w	Degré saturation, Sr	Indice des vides, e
		mm	mm	cm <sup>3</sup>	g	g	g	%	%	
20B	1,08	6,80	38,0	7,71	9,80	5,8	3,97	69,6%	78%	1,91
Remanié	1,14	7,10	35,0	6,83	8,99	5,8	3,16	55,2%	76%	1,58
	62,24	6,77	34,0	6,14	6,88	5,8	1,05	18,2%	30%	1,32
	196,31	6,65	33,0	5,69	6,32	5,8	0,49	8,5%	16%	1,15
	249,77	6,58	32,9	5,59	6,20	5,8	0,37	6,4%	13%	1,11
23A	0,96	6,76	36,5	7,07	8,80	4,3	4,46	105,8%	87%	2,58
Remanié	0,91	7,90	36,0	8,04	10,69	5,3	5,43	106,5%	96%	2,36
	10,79	6,51	35,8	6,55	6,7	5,3	1,44	27,6%	35%	1,74
	234,56	6,25	34,6	5,88	5,42	5,3	0,16	3,0%	5%	1,46
23B	0,91	7,19	37,5	7,94	9,89	4,2	5,65	133,0%	94%	3,11
Remanié	3,06	6,17	36,0	6,28	6,69	4,2	2,45	57,6%	56%	2,25
	4,54	6,20	34,5	5,80	6,22	4,2	1,98	46,5%	51%	2,00
	39,07	5,52	34,0	5,01	5,04	4,2	0,80	18,7%	26%	1,60

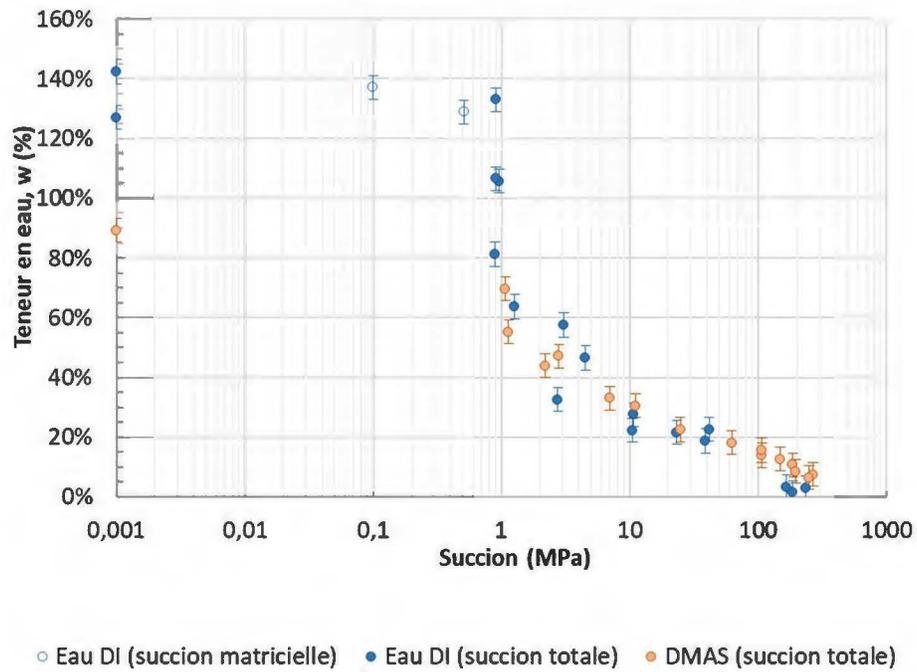


Figure E-1 Courbe de rétention d'eau  $\omega(\psi)$  de GCB hydratés à l'eau DI et au DMAS sous de faibles pressions de confinement

## ANNEXE F – RÉSULTATS – ESSAIS DE DIFFUSION D'OXYGÈNE ET INTERPRÉTATION

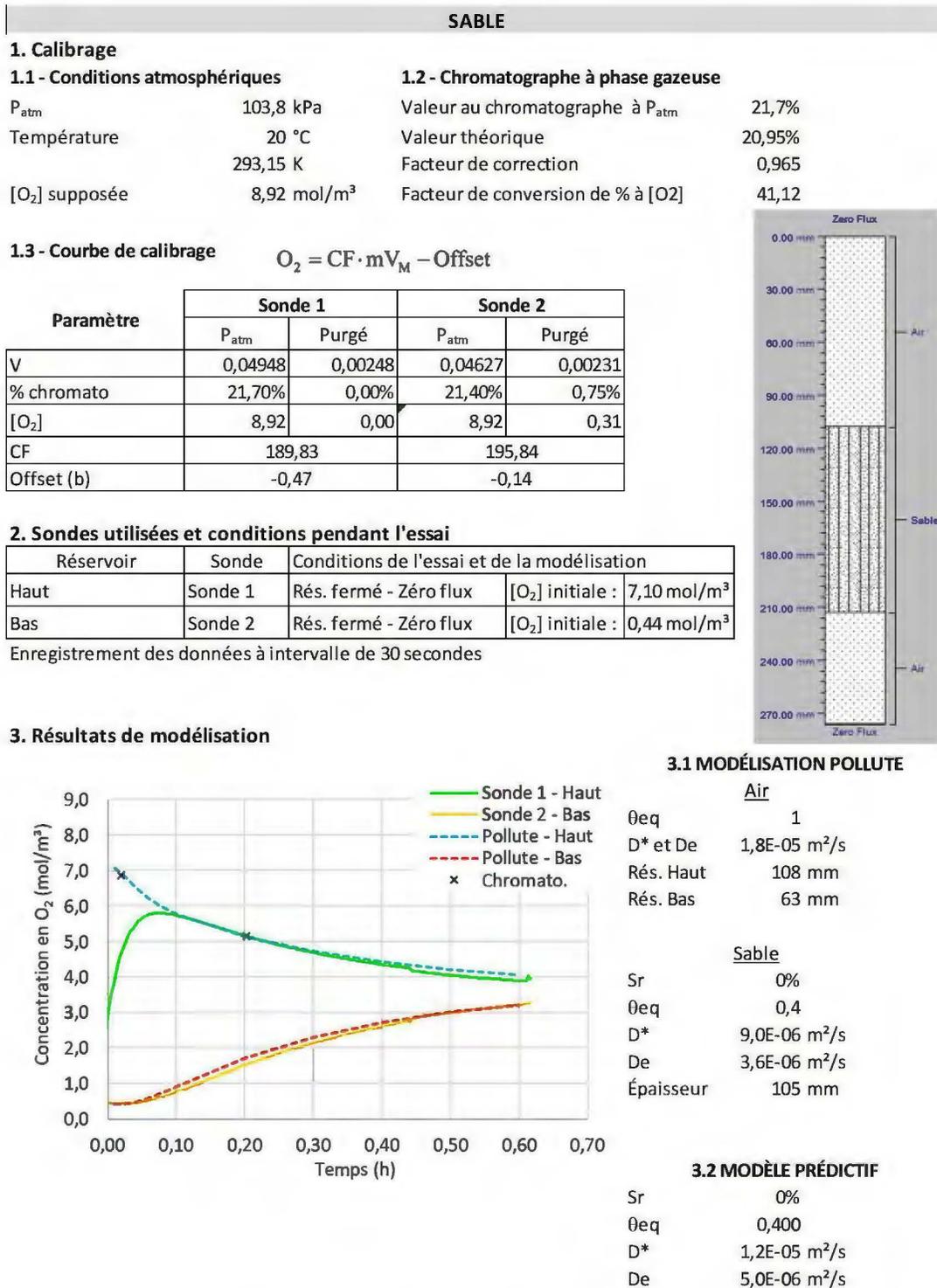


Figure F-1 : Essai de diffusion sur le sable sec

GCB 12 - avec Sr FINAL

1. Calibrage

1.1 - Conditions atmosphériques

P <sub>atm</sub>	97,8 kPa
Température	23,5 °C
	296,7 K
[O <sub>2</sub> ]	8,31 mol/m <sup>3</sup>

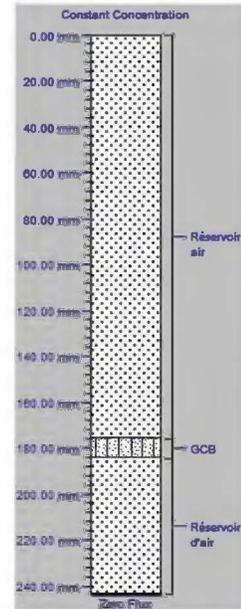
1.2 - Chromatographe à phase gazeuse

Valeur au chromatographe à P <sub>atm</sub>	21,7%
Valeur théorique	20,95%
Facteur de correction	0,964
Facteur de conversion de % à [O <sub>2</sub> ]	38,23

1.3 - Courbe de calibrage

$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

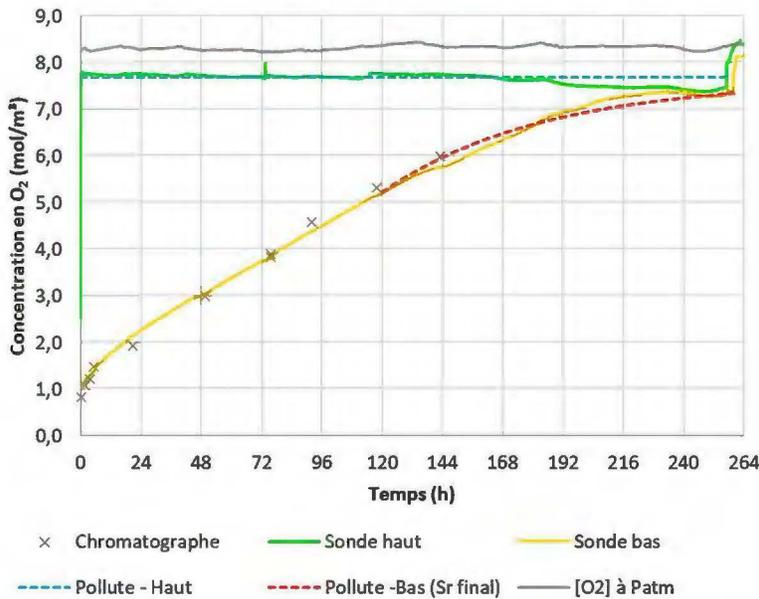
Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	P <sub>atm</sub>	Purgé	P <sub>atm</sub>	Purgé
mV	0,04997	0,00183	0,04773	0,00233
% chromato	21,73%	0	21,73%	2,04%
[O <sub>2</sub> ] mol/m <sup>3</sup>	8,31	0	8,31	1,00
CF	172,56		160,95	
Offset (b)	-0,32		0,62	



2. Sondes utilisées et conditions pendant l'essai

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai et de la modélisation	
Réservoir du haut	Sonde 1	Rés. Ouvert - [O <sub>2</sub> ] cst	[O <sub>2</sub> ] initiale : 7,8 mol/m <sup>3</sup>
Réservoir du bas	Sonde 2	Rés. Fermé - Zéro Flux	[O <sub>2</sub> ] initiale : 5,2 mol/m <sup>3</sup>

3. Résultats



3.1 MODÉLISATION POLLUTE

Air	
θ <sub>eq</sub>	1
D* et De	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	176 mm
Rés. Bas	59 mm
Sable	
θ <sub>eq</sub>	n/a
D*	n/a m <sup>2</sup> /s
De	n/a m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	n/a mm
Rés. Bas	n/a mm

GCB	
θ <sub>eq</sub>	0,075
D*	2,8E-08 m <sup>2</sup> /s
De	2,1E-09 m <sup>2</sup> /s

3.2 MODÈLE PRÉDICTIF

Sr	94%
θ <sub>eq</sub>	0,072
D*	1,4E-08 m <sup>2</sup> /s
De	1,0E-09 m <sup>2</sup> /s

Figure F-2 : Essai de diffusion sur le GCB 12 (S<sub>r</sub> final)

## GCB 12 - avec Sr INITIAL

## 1. Calibrage

## 1.1 - Conditions atmosphériques

P<sub>atm</sub> 97,8 kPa

Température 23,5 °C

296,7 K

[O<sub>2</sub>] 8,31 mol/m<sup>3</sup>

## 1.2 - Chromatographe à phase gazeuse

Valeur au chromatographe à P<sub>atm</sub> 21,7%

Valeur théorique 20,95%

Facteur de correction 0,964

Facteur de conversion de % à [O<sub>2</sub>] 38,23

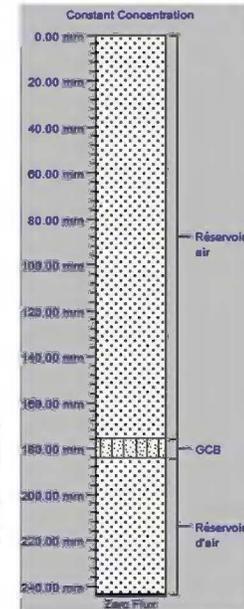
## 1.3 - Courbe de calibrage

$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

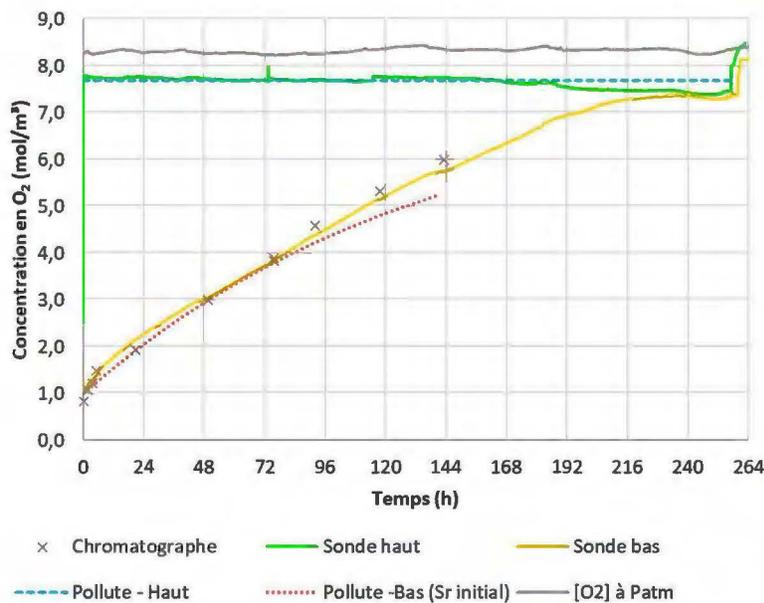
Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	P <sub>atm</sub>	Purgé	P <sub>atm</sub>	Purgé
mV	0,04997	0,00183	0,04773	0,00233
% chromato	21,73%	0	21,73%	2,04%
[O <sub>2</sub> ] mol/m <sup>3</sup>	8,31	0	8,31	1,00
CF	172,56		160,95	
Offset (b)	-0,32		0,62	

## 2. Sondes utilisées et conditions pendant l'essai

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai et de la modélisation	
Réservoir du haut	Sonde 1	Rés. Ouvert - [O <sub>2</sub> ] cst	[O <sub>2</sub> ] initiale : 7,8 mol/m <sup>3</sup>
Réservoir du bas	Sonde 2	Rés. Fermé - Zéro Flux	[O <sub>2</sub> ] initiale : 1,0 mol/m <sup>3</sup>



## 3. Résultats



## 3.1 MODÉLISATION POLLUTE

## Air

θ <sub>eq</sub>	1
D* et D <sub>e</sub>	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	176 mm
Rés. Bas	59 mm

## Sable

θ <sub>eq</sub>	n/a
D*	n/a m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	n/a m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	n/a mm
Rés. Bas	n/a mm

## GCB

θ <sub>eq</sub>	0,073
D*	2,4E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	1,8E-09 m <sup>2</sup> /s

## 3.2 MODÈLE PRÉDICTIF

Sr	96%
θ <sub>eq</sub>	0,061
D*	6,6E-09 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	4,1E-10 m <sup>2</sup> /s

Figure F-3 : Essai de diffusion sur le GCB 12 (S<sub>r</sub> initial)

## GCB 13

## 1. Calibrage

## 1.1 - Conditions atmosphériques

$P_{atm}$  ??? kPa

Température ??? °C

??? K

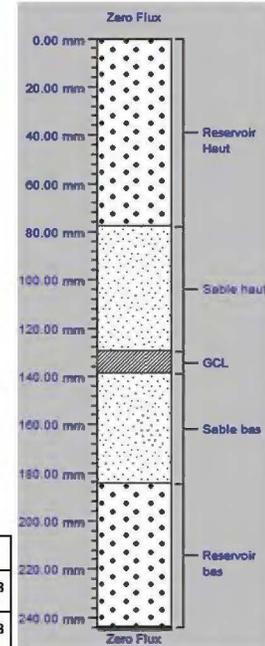
$[O_2]$  supposée 8,3 mol/m<sup>3</sup>

Callibrage basé sur les valeurs enregistrées à température ambiante et en supposant une purge avec 0,05 mol/m<sup>3</sup> restant

## 1.3 - Courbe de calibrage

$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	$P_{atm}$	Purgé	$P_{atm}$	Purgé
mV	0,04948	0,00247	0,04727	0,00179
% chromat	n/a	n/a	n/a	n/a
$[O_2]$	8,3	0	8,3	0,05
CF	176,56		181,40	
Offset (b)	-0,44		-0,27	

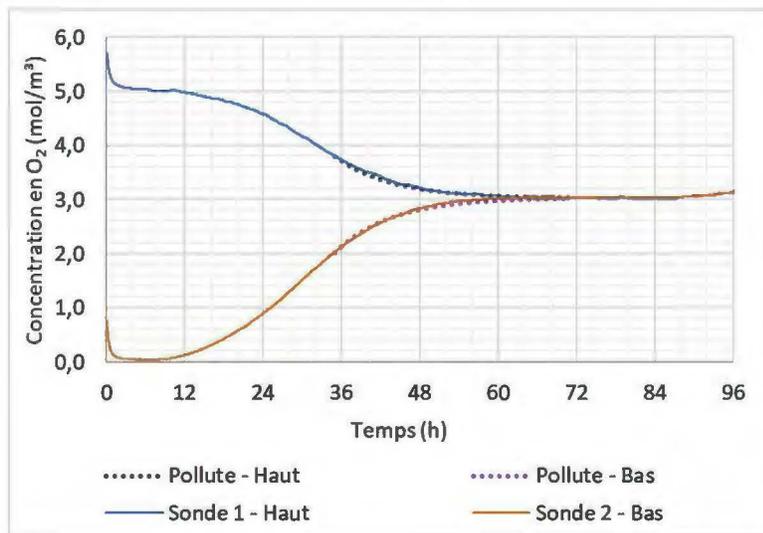


## 2. Sondes utilisées et conditions pendant l'essai

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai et de la modélisation	
Haut	Sonde 1	Rés. fermé - Zéro flux	$[O_2]$ initiale : 3,81 mol/m <sup>3</sup>
Bas	Sonde 2	Rés. fermé - Zéro flux	$[O_2]$ initiale : 2,04 mol/m <sup>3</sup>

Enregistrement des données à intervalle de 5 minutes

## 3. Résultats



## 3.1 MODÉLISATION POLLUTE

Air

$\theta_{eq}$	1
$D^*$ et $D_e$	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	78 mm
Rés. Bas	59 mm

Sable

$S_r$	0%
$\theta_{eq}$	0,4
$D^*$	9,0E-06 m <sup>2</sup> /s
$D_e$	3,6E-06 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	52 mm
Rés. Bas	46 mm

GCB

$\theta_{eq}$	0,100
$D^*$	1,3E-07 m <sup>2</sup> /s
$D_e$	1,3E-08 m <sup>2</sup> /s

## 3.2 MODÈLE PRÉDICTIF

$S_r$	88%
$\theta_{eq}$	0,110
$D^*$	8,8E-08 m <sup>2</sup> /s
$D_e$	9,7E-09 m <sup>2</sup> /s

Figure F-4 : Essai de diffusion sur le GCB 13

## GCB 16

## 1. Calibrage

## 1.1 - Conditions atmosphériques

P<sub>atm</sub> 98,0 kPa

Température 22,5 °C

295,65 K

[O<sub>2</sub>] supposée 8,35 mol/m<sup>3</sup>

## 1.2 - Chromatographe à phase gazeuse

Valeur au chromatographe à P<sub>atm</sub> 21,8%

Valeur théorique 20,95%

Facteur de correction 0,963

Facteur de conversion de % à [O<sub>2</sub>] 38,40

## 1.3 - Courbe de calibrage

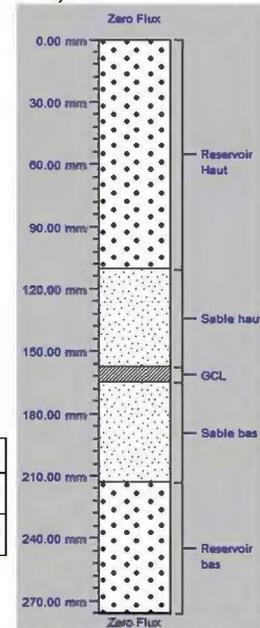
$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	P <sub>atm</sub>	Purgé	P <sub>atm</sub>	Purgé
mV	0,046	0,00031	0,039	0,00134
% chromato	21,75%	1,50%	21,75%	1,70%
[O <sub>2</sub> ]	8,35	0,58	8,35	0,65
CF	170,19		204,44	
Offset (b)	0,52		0,38	

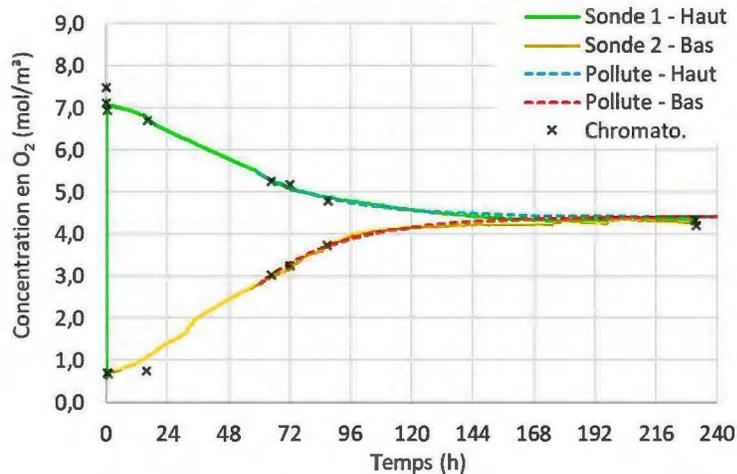
## 2. Sondes utilisées et conditions pendant l'essai

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai et de la modélisation	
Haut	Sonde 1	Rés. fermé - Zéro flux	[O <sub>2</sub> ] initiale : 5,45 mol/m <sup>3</sup>
Bas	Sonde 2	Rés. fermé - Zéro flux	[O <sub>2</sub> ] initiale : 2,82 mol/m <sup>3</sup>

Enregistrement des données à intervalle de 5 minutes



## 3. Résultats de modélisation (de 60h à 240h)



## 3.1 MODÉLISATION POLLUTE

## Air

θ <sub>eq</sub>	1
D* et D <sub>e</sub>	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	111 mm
Rés. Bas	63 mm

## Sable

S <sub>r</sub>	0%
θ <sub>eq</sub>	0,4
D*	9,0E-06 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	3,6E-06 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	47 mm
Rés. Bas	48 mm

## GCB

θ <sub>eq</sub>	0,090
D*	3,5E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	3,2E-09 m <sup>2</sup> /s

## 3.2 MODÈLE PRÉDICTIF

S <sub>r</sub>	93%
θ <sub>eq</sub>	0,064
D*	1,9E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	1,2E-09 m <sup>2</sup> /s

Figure F-5 : Essai de diffusion sur le GCB 16

## GCB 18

## 1. Calibrage

## 1.1 - Conditions atmosphériques

P<sub>atm</sub> 96,3 kPa

Température 24,2 °C

297,35 K

[O<sub>2</sub>] supposée 8,16 mol/m<sup>3</sup>

## 1.2 - Chromatographe à phase gazeuse

Valeur au chromatographe à P<sub>atm</sub> n/a

Valeur théorique n/a

Facteur de correction n/a

Facteur de conversion de % à [O<sub>2</sub>] n/a

## 1.3 - Courbe de calibrage

$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

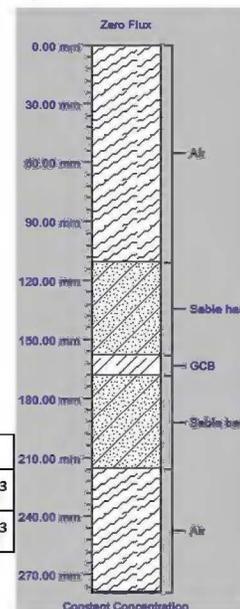
Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	P <sub>atm</sub>	Purgé	P <sub>atm</sub>	Purgé
mV	0,045	0,00126	0,039791	0,00080
% chromato*	20,95%	0,50%	20,95%	0,50%
[O <sub>2</sub> ]	8,16	0,19	8,16	0,19
CF	182,11		204,29	
Offset (b)	-0,03		0,03	

\*hypothèses, valeurs non mesurées

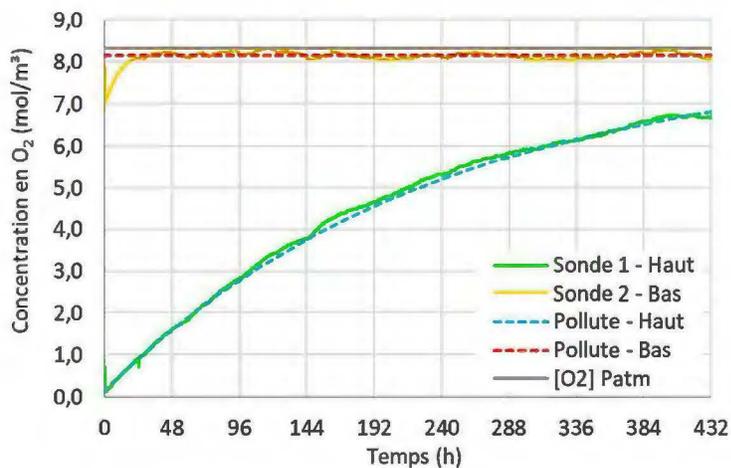
## 2. Sondes utilisées et conditions pendant l'essai

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai et de la modélisation	
Haut	Sonde 1	Rés. fermé - Zéro flux	[O <sub>2</sub> ] initiale : 0,15 mol/m <sup>3</sup>
Bas	Sonde 2	Rés. ouvert - [O <sub>2</sub> ] cst	[O <sub>2</sub> ] initiale : 8,15 mol/m <sup>3</sup>

Enregistrement des données à intervalle de 10 minutes



## 3. Résultats de modélisation



## 3.1 MODÉLISATION POLLUTE

## Air

θ <sub>eq</sub>	1
D* et D <sub>e</sub>	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	111 mm
Rés. Bas	63 mm

## Sable

θ <sub>eq</sub>	0,4
D*	9,0E-06 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	3,6E-06 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	47 mm
Rés. Bas	47 mm

## GCB

θ <sub>eq</sub>	0,078
D*	2,1E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	1,6E-09 m <sup>2</sup> /s

## 3.2 MODÈLE PRÉDICTIF

S <sub>r</sub>	92%
θ <sub>eq</sub>	0,083
D*	2,8E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	2,3E-09 m <sup>2</sup> /s

Figure F-6 : Essai de diffusion sur le GCB 18

**GCB 20**

**1. Calibrage**

**1.1 - Conditions atmosphériques**

$P_{atm}$	??	kPa
Température	??	°C
	??	K
$[O_2]$ supposée	8,30	mol/m <sup>3</sup>

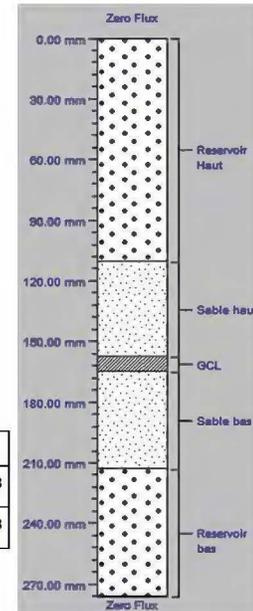
**1.2 - Chromatographe à phase gazeuse**

Valeur au chromatographe à $P_{atm}$	21,86%
Valeur théorique	20,95%
Facteur de correction	0,958
Facteur de conversion de % à $[O_2]$	37,97

**1.3 - Courbe de calibrage**

$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	$P_{atm}$	Purgé	$P_{atm}$	Purgé
mV	0,046	0,00031	0,039	0,00134
% chromato	21,86%	1,72%	21,86%	1,52%
$[O_2]$	8,30	0,65	8,30	0,58
CF	167,37		205,07	
Offset (b)	0,60		0,30	

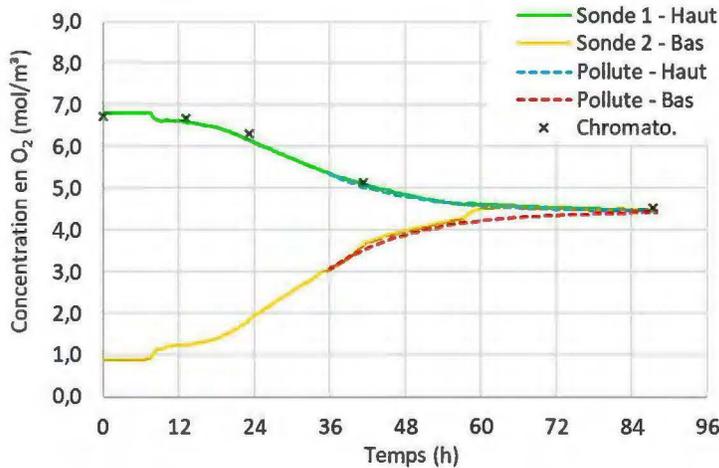


**2. Sondes utilisées et modélisation**

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai et de la modélisation	
Haut	Sonde 1	Rés. fermé - Zéro flux	$[O_2]$ initiale : 5,36 mol/m <sup>3</sup>
Bas	Sonde 2	Rés. fermé - Zéro flux	$[O_2]$ initiale : 3,08 mol/m <sup>3</sup>

Enregistrement des données à intervalle de 15 minutes

**3. Résultats de modélisation (de 36h à**



**3.1 MODÉLISATION POLLUTE**

Air

$\theta_{eq}$	1
$D^*$ et $D_e$	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	108 mm
Rés. Bas	63 mm

Sable

$S_r$	0%
$\theta_{eq}$	0,4
$D^*$	9,0E-06 m <sup>2</sup> /s
$D_e$	3,6E-06 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	49 mm
Rés. Bas	49 mm

GCB

$\theta_{eq}$	0,070
$D^*$	1,2E-07 m <sup>2</sup> /s
$D_e$	8,4E-09 m <sup>2</sup> /s

**3.2 MODÈLE PRÉDICTIF**

$S_r$	92%
$\theta_{eq}$	0,072
$D^*$	2,8E-08 m <sup>2</sup> /s
$D_e$	2,0E-09 m <sup>2</sup> /s

Figure F-7 : Essai de diffusion sur le GCB 20

## GCB 22

## 1. Calibrage

## 1.1 - Conditions atmosphériques

$P_{atm}$  ?? kPa

Température ?? °C

?? K

[O<sub>2</sub>] supposée 8,30 mol/m<sup>3</sup>

## 1.2 - Chromatographe à phase gazeuse

Valeur au chromatographe à  $P_{atm}$  21,86%

Valeur théorique 20,95%

Facteur de correction 0,958

Facteur de conversion de % à [O<sub>2</sub>] 37,97

## 1.3 - Courbe de calibrage

$$O_2 = CF \cdot mV_M - \text{Offset}$$

Paramètre	Sonde 1		Sonde 2	
	$P_{atm}$	Purgé	$P_{atm}$	Purgé
mV	0,0442	0,00202	0,04044	0,00248
% chromato	21,86%	1,53%	21,86%	1,48%
[O <sub>2</sub> ]	8,30	0,58	8,30	0,56
CF	183,00		203,85	
Offset (b)	0,21		0,06	

## 2. Sondes utilisées et modélisation

Réservoir	Sonde	Conditions de l'essai
Haut	1	Rés. fermé - Zéro flux
Bas	2	Rés. fermé - Zéro flux

Enregistrement des données à intervalle de 1 minute

## 3. Résultats

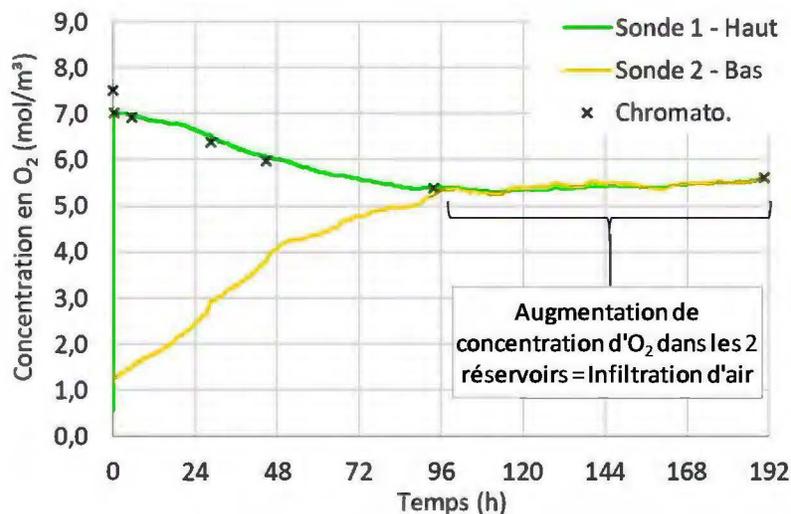
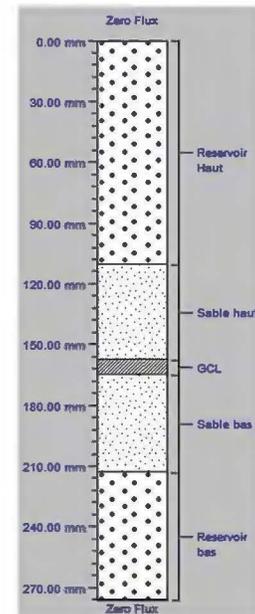
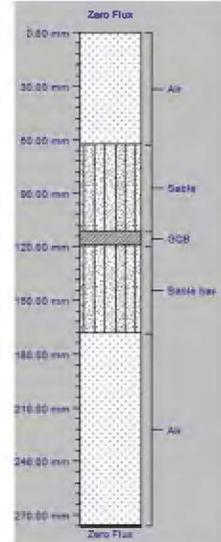
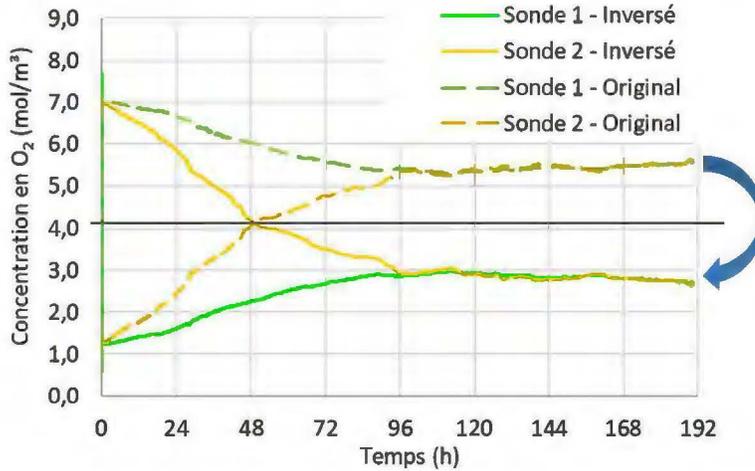


Figure F-8 : Essai de diffusion sur le GCB 22

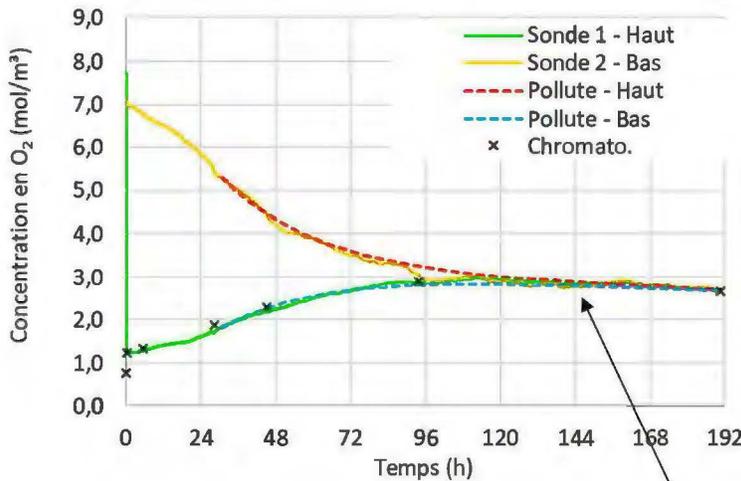
GCB 22 - SUITE

3. Résultats (suite)

L'infiltration d'air a été considérée comme un K<sub>v</sub> négatif, qui ajoute de l'O<sub>2</sub> dans le système au lieu d'en consommer. Toutefois, POLLUTEV7 ne permet pas de réaliser des modélisations avec ajout d'un contaminant. Une inversion du système donc été réalisée, en posant un axe de symétrie à une concentration de 4.14 mol/m<sup>3</sup> (figure suivante). Le gain d'oxygène a ainsi été transformé en perte d'oxygène pouvant être modélisée



La modélisation dans Pollute a été réalisée sur le système inversé et a mené aux résultats ci-bas



3.1 MODÉLISATION

Sur la période de 30h et plus

Concentrations initiales

Réservoir du haut	1,84 mol/m <sup>3</sup>
Réservoir du bas	5,28 mol/m <sup>3</sup>

Air

θ <sub>eq</sub>	1
D* et D <sub>e</sub>	1,8E-05 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	63 mm
Rés. Bas	108 mm

Sable

S <sub>r</sub>	0%
θ <sub>eq</sub>	0,4
D*	9,0E-06 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	3,6E-06 m <sup>2</sup> /s
Rés. Haut	49 mm
Rés. Bas	49 mm

GCB

θ <sub>eq</sub>	0,080
D*	4,3E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	3,4E-09 m <sup>2</sup> /s

Radiative/Biological decay

Demi-vie	650 h
Appliquée de 0 à 276 mm	

3.2 MODÈLE PRÉDICTIF

S <sub>r</sub>	88%
θ <sub>eq</sub>	0,094
D*	7,8E-08 m <sup>2</sup> /s
D <sub>e</sub>	7,4E-09 m <sup>2</sup> /s

Figure F-8 (suite) : Essai de diffusion sur le GCB 22