



# BIBLIOTHÈQUE

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

## Mise en garde

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

## Warning

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

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

**Évaluation et prédiction de la conductivité hydraulique saturée des mélanges  
sol-bentonite utilisés dans la construction des structures d'entreposage des  
rejets miniers**

**YOSRA HFAIEDH**

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie minéral

Décembre 2023

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

## **Évaluation et prédiction de la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite utilisés dans la construction des structures d'entreposage des rejets miniers**

présenté par **Yosra HFAIEDH**

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

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

**Carlos OVALLE**, président

**Vincent BOULANGER-MARTEL**, membre et directeur de recherche

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

**Jean COTÉ**, membre externe

## DÉDICACE

À ma famille,

*Votre amour et votre soutien inconditionnel ont été ma force tout au long de ce parcours académique. Cette réalisation est également la vôtre.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens par la présente à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de mon mémoire de maîtrise. Ce projet représente pour moi un aboutissement personnel et professionnel, et je suis reconnaissant envers les personnes qui m'ont soutenu tout au long de cette expérience.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mon directeur de recherche, Vincent Boulanger Martel, pour son encadrement et sa guidance précieuse tout au long de ce travail, pour sa vision, son expertise et ses conseils avisés ont grandement enrichi mon expérience de recherche et ont contribué à la qualité de ce mémoire. Je remercie infiniment mon codirecteur Bruno Bussiere, son expertise et ses conseils m'aident également beaucoup.

Je souhaite également remercier tous mes professeurs et les personnels de l'URSTM et surtout Sylvette Awoh, Jean Christophe, Guillaume, Lilas, Pierre Alain et Joël pour leur précieuse contribution, leurs conseils pertinents et leurs suggestions constructives. Leurs commentaires éclairés ont été d'une grande aide pour affiner mes idées et améliorer la cohérence de mon travail.

Mes remerciements vont aussi à l'Institut de Recherche en Mines et Environnement UQAT-Polytechnique Montréal et à la Chaire de recherche industrielle CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers pour leur support financier.

Mes remerciements vont également à mes collègues et mes amis, qui m'ont soutenu et avec qui j'ai partagé des discussions stimulantes et enrichissantes. Leur soutien moral, leurs idées et leurs encouragements ont été d'une grande valeur pour moi tout au long de cette période.

Je tiens également à remercier ma famille et mes proches pour leur soutien inconditionnel, leur amour et leur compréhension pendant cette période exigeante. Leur présence et leurs encouragements constants m'ont apporté la force nécessaire pour mener à bien ce projet.

Un spécial remerciement pour Khouloud, Sabine, Youssef Hssan, Anis, Nourhène, Yassine, Assem, Tayssir, Suyanne, Mahmoud, Ons, Nada, Ghada, Weber, Ghani, Juan, Audrey et Oumaima pour leur soutien et encouragements. Je suis conscient que cette liste de remerciements ne saurait être exhaustive, car de nombreuses personnes ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Je souhaite donc exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont joué un rôle dans ce projet, et qui ont contribué à mon développement en tant que chercheur.

## RÉSUMÉ

La disponibilité limitée de matériaux fins à proximité des sites miniers pose des défis lors de la construction des structures de confinement et de stockage des rejets miniers, telles que les digues et les recouvrements miniers (recouvrement à faible conductivité hydraulique et couvertures à effet de barrière capillaire). Cela peut entraîner une complexité et des coûts accrus dans la construction. Une solution prometteuse réside dans l'utilisation de mélanges sol-bentonite en tant que matériaux à faible conductivité hydraulique.

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'évaluer le potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite dans la construction des structures de confinement et de stockage des rejets miniers. Différents essais de caractérisation hydrogéologique ont été réalisés sur trois types de mélanges gravier-, sable- et résidu-bentonite à des teneurs en bentonite allant de 5.0 à 9.0% bentonite. Des essais de perméabilité ont été entrepris pour évaluer les effets de différents facteurs, tels que le type et la teneur de bentonite et la distribution granulométrique du matériau de base sur la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des mélanges sol-bentonite testés. De plus, des essais de gel-dégel ont été effectués pour évaluer l'influence des cycles de gel-dégel sur les  $k_{sat}$  des différents mélanges.

Les résultats obtenus montrent que les  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1, CR2-B1, R-B1 et S-B1 diminuent avec l'augmentation de la teneur en bentonite. Les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1 et CR2-B1 varient de  $5.8 \times 10^{-7}$  à  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s et de  $7.7 \times 10^{-6}$  à  $3.6 \times 10^{-7}$  cm/s respectivement pour des teneurs en bentonite de 5.0% à 9.0%. Et pour S-B1 et R-B1, les valeurs de  $k_{sat}$  varient de  $9.5 \times 10^{-7}$  à  $9.0 \times 10^{-8}$  et  $2.3 \times 10^{-6}$  et  $2.1 \times 10^{-7}$  cm/s respectivement pour les mêmes teneurs en bentonite.

En plus, en comparant les valeurs  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1 et CR2-B1, ayant des matériaux de base de distribution granulométrique différente, il est observé que plus la granulométrie du matériau de base est étalée, plus la valeur de  $k_{sat}$  du mélange est faible. Il est remarqué également que le type de bentonite n'a pas d'influence significative sur la valeur de  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1, CR1-B2 et CR1-B3 dans ce cas d'étude. L'impact des cycles de gel-dégel sur les  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1, CR1-B2, R-B1 et S-B1 s'est avéré relativement limité, mais dépend du type de bentonite et de la granulométrie du matériau de base surtout pour les mélanges du gravier-bentonite.

En général, ces résultats de caractérisation indiquent que les mélanges CR1-B1, CR1-B2, R-B1 et S-B1 présentent les propriétés hydrogéologiques nécessaires pour être utilisés comme matériaux à

faible conductivité hydraulique, mais d'autres travaux devraient être réalisés surtout sur les mélanges du gravier-bentonite.

En plus de la caractérisation des propriétés hydrauliques, cette étude vise également à adopter un modèle prédictif de la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite. Deux équations ont été développées en se basant sur le modèle de KCM (Mbonimpa et al., 2002), en prenant en compte à la fois les propriétés de la bentonite, celles du matériau de base et celles du fluide en écoulement. L'équation 3.21 est recommandée pour prédire les valeurs de  $k_{sat}$  de tous les types de mélanges sol-bentonite et plus spécifiquement pour les mélanges ayant des matériaux de base de granulométrie uniforme et pour des limites de liquidités de bentonites entre 150 et 500%. Et dans le cas d'utilisation des mélanges sol-bentonite dans les structures d'entreposage, les matériaux de base utilisés sont généralement de coefficient d'uniformité supérieur à 5. Dans tel cas d'utilisation, l'équation 3.20 est préférée pour estimer avec précision les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite ayant des limites de liquidités de bentonites entre 150 et 352%. Ces équations peuvent être utilisées pour obtenir des informations préliminaires sur la perméabilité lors des phases d'analyse préliminaires, ainsi que pour évaluer la validité des résultats des essais en laboratoire.

Cette recherche contribue à une meilleure compréhension des facteurs influençant la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite, ouvrant la voie à leur utilisation potentielle en tant que matériaux à faible perméabilité dans les structures de confinement des résidus miniers. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre le comportement mécanique et la durabilité des mélanges de sol-bentonite testés. Une évaluation de la performance de ces mélanges sur le terrain est recommandée afin de vérifier l'absence d'interaction chimique entre le mélange et le fluide en écoulement. Ainsi, il est recommandé, dans le cas de leur utilisation dans la construction de couvertures à effet de barrière capillaire, de mesurer la capacité de rétention d'eau et la diffusion d'oxygène, tout en évaluant l'influence des cycles de gel-dégel sur ces deux propriétés dans des conditions nordiques. Des travaux supplémentaires pour bien fixer les limites et les hypothèses de validité des équations proposées sont également primordiaux.

## ABSTRACT

The limited availability of fine materials close to the mining sites poses challenges in the construction of mine waste confinement structures, such as dams and mining covers (low hydraulic conductivity covers and capillary barrier covers). This can lead to increase the complexity and the cost of the construction. A promising solution lies in the use of soil-bentonite mixture as low permeability materials. The main objective of this research project is to assess the potential use of soil-bentonite mixture in mine waste confinement structures.

Several hydrogeological characterization tests were conducted on three types of mixture crushed rock- sand-, and tailing-bentonite with bentonite contents ranging from 5.0% to 9.0%. Permeability tests were performed to evaluate the effects of different factors, such as the type and content of bentonite and the particle size distribution of the base material, on the saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) of the tested soil-bentonite mixtures. Additionally, freeze-thaw tests were realized to assess the influence of freeze-thaw cycles on the  $k_{sat}$  of the different mixtures.

The results obtained showed that the  $k_{sat}$  of CR1-B1, CR2-B1, R-B1, and S-B1 mixture decreased with the increase in the bentonite content. The  $k_{sat}$  of CR1-B1 and CR2-B1 mixtures varied from  $5.8 \times 10^{-7}$  to  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s and from  $7.7 \times 10^{-6}$  to  $3.6 \times 10^{-7}$  cm/s respectively for bentonite contents of 5.0% to 9.0%, for S-B1 and T-B1 mixtures,  $k_{sat}$  ranged from  $9.5 \times 10^{-7}$  to  $9.0 \times 10^{-8}$  cm/s and from  $2.3 \times 10^{-6}$  to  $2.1 \times 10^{-7}$  cm/s for the same bentonite contents. In addition, by comparing the  $k_{sat}$  values of CR1-B1 and CR2-B1 mixtures with base materials of different particle size distribution, it's observed that the more graded particle size of the base material, the lower the  $k_{sat}$  of mixture. It's also noted that the type of bentonite has no significant influence on the  $k_{sat}$  value of CR1-B1, CR1-B2 and CR1-B3. The impact of freeze-thaw cycles on the  $k_{sat}$  of CR1-B1, CR1-B2, R-B1, and S-B1 mixtures was relatively limited, but it depends on the type of bentonite and the particle size distribution of the base material, especially for mixtures with crushed rock in general, the characterization results indicate that CR1-B1, CR1-B2, R-B1, and S-B1 mixtures have the hydrogeological properties required to be used as low permeability materials but more work needs to be done, especially on crushed rock-bentonite mixtures.

In addition to the characterization of hydraulic properties, this study also aims to adopt a predictive model for the saturated hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures. Two equations were developed based on the KCM model (Mbonimpa et al., 2002), taking into account the properties of bentonite, the base material, and the flowing fluid. The equation 3.21 is recommended for



predicting the  $k_{\text{sat}}$  values of all types of soil-bentonite mixtures, and more specifically for mixtures with base materials of uniform particle size and bentonite liquid limits between 150% and 500%. In the case of use of soil-bentonite mixtures in confinement structures, the base materials typically have a coefficient of uniformity greater than 5. In such cases, equation 3.20 is preferred for accurately estimating the  $k_{\text{sat}}$  values of soil-bentonite mixes with bentonite liquid limits between 150% and 352%. This suggested model can be used to obtain preliminary information on permeability during preliminary analysis phases, as well as to assess the validity of laboratory test results.

This research contributes to a better understanding of the factors influencing the saturated hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures, paving the way for their potential use as low-permeability materials in mine waste confinement structures. However, further research is needed to better understand the mechanical behavior and durability of the tested soil-bentonite mixtures. A field performance evaluation of these mixture is recommended to verify the absence of chemical interactions between the mixture and the flowing fluid. Therefore, in the case of their use in the construction of capillary barrier covers, it is recommended to measure water retention capacity and oxygen diffusion, while assessing the influence of freeze-thaw cycles on these two properties in Nordic conditions. Additional work to properly define the limits and assumptions of validity of the proposed equations is also crucial.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES .....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVI
LISTE DES ANNEXES .....	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Gestion des rejets miniers .....	2
1.2 Drainage minier acide et restauration minière .....	3
1.2.1 Drainage minier acide .....	3
1.2.2 Restauration minière .....	5
1.3 Besoins en matériaux fins et potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite en environnement.....	7
1.4 Contexte et objectifs du projet de recherche .....	8
1.5 Structures du mémoire et les contributions scientifiques.....	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	11
2.1 Mélanges sol-bentonite .....	11
2.1.1 Bentonite .....	12
2.1.2 Structure des mélanges sol-bentonite.....	26
2.2 Conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite .....	29

2.2.1	Facteurs d'influence sur $k_{sat}$ .....	32
2.2.2	Prédiction de $k_{sat}$ .....	39
2.3	Utilisation des mélanges sol-bentonite en environnement minier .....	40
2.4	Besoin en recherche .....	44
CHAPITRE 3 ARTICLE 1: MEASUREMENTS AND PREDICTION OF SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOIL-BENTONITE MIXTURES .....		46
ABSTRACT .....		46
3.1	Introduction .....	47
3.2	Materials and Methods .....	49
3.2.1	Materials .....	49
3.2.2	Basic geotechnical properties.....	50
3.2.3	Permeability tests .....	51
3.2.4	Prediction of saturated hydraulic conductivity.....	53
3.3	Results .....	57
3.3.1	Basic characterization results .....	57
3.3.2	Permeability tests results.....	59
3.4	Development of a $k_{sat}$ predictive model for soil-bentonite mixtures.....	65
3.4.1	Proposal 1- modification based on the $k_p$ equation .....	66
3.4.2	Proposal 2 – modification based on $k_p^*$ .....	68
3.5	Discussion .....	69
3.6	Conclusion.....	74
ACKNOWLEDGEMENTS .....		76
REFERENCES.....		76
CHAPITRE 4 ASPECTS MÉTHODOLOGIQUE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES.....		84

4.1	Aspects méthodologiques.....	84
4.2	Résultats des essais gel-dégel.....	86
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE .....		90
5.1	Potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite .....	90
5.1.1	Conductivité hydraulique saturée.....	91
5.1.2	Stabilité interne .....	93
5.1.3	Courbe de rétention d'eau CRE .....	94
5.1.4	Résistance aux cycles de gel-dégel .....	95
5.1.5	Exigences et potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite testés .....	97
5.2	Prédiction de $k_{sat}$ .....	99
5.3	Les défis et les difficultés rencontrés .....	100
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		101
6.1	Conclusions .....	101
6.2	Recommandations .....	102
RÉFÉRENCES.....		104
ANNEXE .....		128

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques de deux types de bentonites.....	16
Tableau 2.2 Résumé d'un exemple des résultats des paramètres du gonflement (Gueddouda, 2013). .....	22
Tableau 2.3 Exemple des valeurs de la conductivité hydraulique pour des mélanges sol-bentonite (tiré de Boulanger Martel, 2015).....	31
Tableau 2.4 Sommaire des recouvrements miniers constitués de mélanges sol-bentonite (tiré de Boulanger Martel, 2015). .....	41
Table 3.1 Geotechnical properties of the materials and mineralogical composition of B1 and B2. .....	58
Table 3.2 Summary of permeability test results.....	61
Table 3.3 RMSE between experimental results and predictions made with equations 3.20 and 3.21 as well as selected existing $k_{sat}$ models for CR1-B1, CR2-B1, S-B1 and T-B1. ....	72
Table 3.4 Summary of the geotechnical properties of the materials from the literature.....	73
Tableau 4.1 Résultats des essais G-D.....	87

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Les étapes de la formation de DMA (D’après Kleinman et al., 1981). .....	4
Figure 1.2 Configuration type de CEBC (tiré de Aubertin et al., 2002). .....	7
Figure 2.1 Carte des minéraux (en couleurs) et de la macroporosité (en noir) de bentonite MX80 obtenue au MEB/EDS+analyse d’images (résolution 3microns/pixel) (Prêt et al., 2010)....	13
Figure 2.2 Organisation d’une smectite de l’échelle du feuillet à l’échelle de l’échantillon (d’après Aylmore and Quirk (1959), Yong and Mohamed (1992), Vasseur et al. (1995), Yong (1999b)). .....	13
Figure 2.3 Représentation schématique de la montmorillonite (Mitchell et Soga, 2005).....	15
Figure 2.4 Structure cristalline de la montmorillonite (Praetorius et Schöber, 2017). .....	15
Figure 2.5 Cas de gonflement général d’une argile (tiré de Belbachir, 2018). .....	18
Figure 2.6 Montmorillonite sodique à divers niveaux d’hydratation : a) sèche ; b) 4 couches de molécules d’eau; c) 10 couches de molécules d’eau (Pradhan et al., 2015). .....	18
Figure 2.7 Représentation de l’espace interfoliaire (distance basale) entre deux feuillets de montmorillonite (Luckham et Rossi, 1999). .....	19
Figure 2.8 Distribution granulométrique des grains de la bentonite brute obtenue par sédimentométrie et tamisage des phases grossières (Paumier, 2008). .....	20
Figure 2.9 Classification des argiles selon leur minéralogie et leurs limites d’Atterberg (Biarez et Hicher, 1994).....	25
Figure 2.10 Évolution de la limite de liquidité et de l’indice de plasticité en fonction du % de montmorillonite (Hammad, 2011).....	25
Figure 2.11 Changement du comportement du mélange sable-bentonite après l’ajout de l’eau (Komine and Ogata, 1999).....	27
Figure 2.12 Observation de la structure interne de mélange sable-bentonite (d’après Komine et Ogata, 1999).....	28
Figure 2.13 Porosité et relation volumétrique des mélanges sol-bentonite (tiré de Boulanger Martel, 2015).....	29

Figure 2.14 Relation entre la perméabilité et la bentonite ajouté (Didier et Cavalcante Rocha, 1996). .....	33
Figure 2.15 Plage de variation type de la conductivité hydraulique saturée pour plusieurs sables propres en fonction de la teneur en bentonite (Chapuis, 2002b).....	33
Figure 2.16 Évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la granulométrie du matériau : a ; gravier, b ; sable, c ; matériau fin, d; argile (Craig et al,1994). ....	35
Figure 2.17 Plage de valeur de la conductivité hydraulique de différents mélanges sable bentonite (Chapuis, 2002b). ....	35
Figure 2.18 Conductivité hydraulique en fonction de la densité sèche de la bentonite (Cho et al., 2000).....	36
Figure 2.19 Évolution de la conductivité hydraulique de la bentonite en fonction de la concentration en sels dans l'eau de mouillage et de l'indice des vides (Studds et al., 1998). ....	38
Figure 2.20 Évolution de la perméabilité en fonction des cycles de gel-dégel (Wong and Haug, 1991).....	39
Figure 3.1 Test matrix used to assess the influence of the type of base materials, bentonite content and bentonite type on $k_{sat}$ . ....	53
Figure 3.2 Granulometry curves.....	59
Figure 3.3 Example of the evolution of $k_{sat}$ with hydration time. ....	60
Figure 3.4 a) Saturated hydraulic conductivity as function of bentonite content, (b) normalized saturated hydraulic conductivity as function of bentonite content and (c) saturated hydraulic conductivity as function of the bentonite void ratio within the mixture. ....	63
Figure 3.5 Predicted saturated hydraulic conductivity as function of measured saturated hydraulic conductivity for the models of (a) Chapuis (1990), (b) Sivapullaiah et al (2000), (c) Tripathi (2013) and (d) Mbonimpa et al. (2002). ....	65
Figure 3.6 $k_{sat}$ values computed by Equation 3.20 represented as function of $e_b$ for CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) and T-B1 (d). ....	68

Figure 3.7 $k_{sat}$ values computed by equation 3.21 represented as function of $e_b$ for CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) and T-B1 (d). .....	69
Figure 3.8 Predicted $k_{sat}$ as function of measured $k_{sat}$ for CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) and T-B1 (d) using Equation 3.20 ( or Equation 20) and 3.21 (or Equation 21).....	71
Figure 3.9 Predicted $k_{sat}$ as function of measured $k_{sat}$ for (a) graded (Equation 20 or 3.20) and (b) uniform (Equation 21 or 3.23) soil-bentonite mixtures for $x=3$ .....	74
Figure 4.1 Matrice des essais de G-D réalisés. ....	84
Figure 4.2 Dispositif de l'essai.....	86
Figure 4.3 La conductivité hydraulique normalisée en fonction du nombre de G-D pour CR1-B1, CR1-B2 et CR1-B3 à une teneur en bentonite de 6.5%. ....	88
Figure 4.4 La conductivité hydraulique normalisée en fonction du nombre de G-D pour les mélanges CR1-B1 et CR2-B1. ....	89
Figure 4.5 La conductivité hydraulique normalisée en fonction du nombre de G-D pour les mélanges S-B1 et R-B1 à une teneur en bentonite de 7.0%. ....	89



## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEV	Air entry value ou pression d'entrée d'air
ASTM	American Society for Testing Materials
B	Masse de la bentonite dans le mélange
B1	Bentonite Big horn
B2	Bentonite Premium gel
B3	Bentonite Grout PDSco
CCBE	Covers with capillary barrier effects
CEBC	Couverture avec effets de barrière capillaire
CG	Constante
CR1	Gravier Raglan/ Raglan crushed rock
CR2	Gravier commercial/ commercial crushed rock
$C_U$	Coefficient d'uniformité
$C_{UG}$	Coefficient d'uniformité du matériau de base
$C_P$	Constante
D	Diamètre [L]
$D_{10}$	Diamètre des particules du 10% passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_{50}$	Diamètre des particules du 50% passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_{90}$	Diamètre des particules du 90% passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_{80}$	Diamètre des particules du 80% passants sur la courbe granulométrique [L]
$D_e$	Coefficient de diffusion effectif [ $L^2T^{-1}$ ]
DMA	Drainage minier acide
DRX	Diffraction de rayon X
e	Indice des vides [-]
$e_b$	Indice des vides de la bentonite dans le mélange
$e_f$	Indice des vides de gonflement libre [-]
$e_L$	Indice des vides a la teneur en eau correspondante a l'état de saturation [-]
$F_e$	Fonction de l'indice des vides
$F_s$	Fonction de la surface spécifique
$G_b$	Densité de la bentonite [-]
$G_s$	Densité du solide [-]

GSD	Distribution granulométrique
IP	Indice de plasticité
IRME	Institut de Recherche en Mines et Environnement
k	Coefficient de perméabilité intrinsèque [ $LT^{-1}$ ]
$k_{sat}$	Conductivité hydraulique saturée [ $LT^{-1}$ ]
LL	Limite de liquidité [%]
LP	limite de plasticité [%]
n	Porosité totale [-]
$n^*$	Porosité effective [-]
R	Résidu
RMSE	The root mean square error
S	Masse de sol dans le mélange
S	Sable/ Sand
$S_r$	Degré de saturation [-]
$S_{rf}$	Degré de saturation final [-]
S.S	Surface spécifique [ $L^2 M^{-1}$ ]
T	Tailing
$V_b$	Volume de bentonite [ $L^3$ ]
$V_s$	Volume des solides [ $L^3$ ]
W	Teneur en eau gravimétrique [-]
$W_i$	Teneur en eau initiale [-]
WEV	Water air Value
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale
X	Coefficient de tortuosité [-]
x	Ratio des masses sèches de bentonite et du matériau de base [-]
XRF	Fluorescence au rayon X
$\lambda$	Constante [ $L^2M^{-1}$ ]
$\rho$	Masse volumique [ $ML^{-3}$ ]
$\rho_d$	Masse volumique sèche [ $ML^{-3}$ ]
$\rho_{dm}$	Masse volumique sèche du mélange [ $ML^{-3}$ ]

$\rho_w$	Masse volumique de l'eau [ $ML^{-3}$ ]
$\gamma_w$	Densité de l'eau
$\mu_w$	Viscosité de l'eau [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]
$\chi$	Constante [-]
$\psi_a$	Valeur d'entrée d'air [ $ML^{-1} T^{-2}$ ]
$\psi_r$	Succion résiduelle [ $ML^{-1} T^{-2}$ ]
$\omega$	Teneur en eau massique [ $MM^{-1}$ ]

**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A Caracterisation de base.....	128
ANNEXE B Résultats de perméabilité.....	146
ANNEXE C ARTICLE 2: Hydraulic properties of crushed rock-bentonite mixtures used as low permeability materials in mine wastes confinement structures.....	158
ANNEXE D Résultats de prédiction.....	177

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'exploitation minière génère de grandes quantités des rejets miniers solides tels que les stériles et résidus miniers qui doivent être stockés à la surface dans des aires de stockage dédiées (Aubertin et al., 2002; Lottermoser, 2007). De nombreux défis environnementaux sont associés aux aires de stockage de ces rejets miniers, le principal étant la production de drainage minier acide (DMA). Lorsque les rejets contiennent des sulfures en quantité suffisante et que le potentiel de neutralisation ne permet pas de contrebalancer l'acidification, ils peuvent produire le drainage minier acide (DMA) en présence de l'oxygène et l'eau. Ce phénomène est caractérisé par un pH acide, de fortes concentrations en fer, sulfates et métaux lourds, une conductivité électrique élevée et une faible teneur en matière organique (Nordstrom et al., 2000; Frau, 2000; Moncur et al., 2003; 2005; Blowes, 2005; Ethier, 2018; Plante et al., 2021).

Le DMA est considéré comme le plus important problème environnemental auquel l'industrie minière fait face (P. ex. Nicholson et al., 1988; Blowes et Jambor, 1990; Aubertin et al., 2002; Elberling et al., 2003). Il peut générer des impacts négatifs à long terme sur les écosystèmes et la santé humaine. Il est donc important de mettre en place des mesures pour minimiser l'impact de ce phénomène et réhabiliter les sites miniers (Wolkersdorfer et Howell 2004; Moncur et al. 2005; Bussière 2009; Salvarredy-Aranguren et al. 2008; Bussière et Guittonny, 2020). Au Canada, et presque partout dans le monde, la remise en état des sites à un état satisfaisant est une obligation surtout pour les sites miniers générateurs d'acide (MERN 2017; 2022), ce qui comprend l'élimination des risques inacceptables pour la santé ou la sécurité des personnes et le contrôle de la production et de la propagation de contaminants. Ces préoccupations environnementales ne commencent pas à la fermeture du site, mais, dès les premières phases d'exploitation (Ritcey, 1989; Morin et Hutt, 1997; Aubertin et Bussière., 2001; Bussière et Guittonny, 2020). La construction des digues est recommandée afin de bien stocker les résidus miniers et éviter leur épanchement dans l'environnement. La prévention du phénomène du DMA est aussi primordiale et plusieurs techniques de contrôle de la génération de ce phénomène ont été développées au cours des dernières décennies (Bussière et Guittonny, 2020). Parmi les techniques plus utilisées et appliquées, on retrouve les recouvrements miniers qui visent

notamment à limiter le flux d'oxygène ou l'infiltration de l'eau pour contrôler la génération du DMA.

Cependant, la construction des digues de confinement des résidus et de certaines couches des recouvrements miniers nécessite des matériaux fins, ces derniers ne sont pas toujours disponibles à proximité du site et cela peut rendre la construction et la restauration plus difficiles et coûteuses. Dans un tel cas, des alternatives aux matériaux fins naturels doivent être envisagées. L'utilisation des mélanges sol-bentonite comme matériaux à faible conductivité hydraulique pourrait s'avérer une alternative intéressante. Dans les parties suivantes de ce chapitre, les méthodes de déposition des rejets miniers, la problématique du DMA ainsi que les principales options de recouvrement sont introduites. Ensuite, le potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite en restauration minière est mis en œuvre. Finalement, les objectifs de recherche, la structure du mémoire et la contribution scientifique de ce projet sont présentés.

## **1.1 Gestion des rejets miniers**

Les principaux rejets miniers solides générés par l'exploitation sont les stériles et les résidus miniers ou les rejets de concentrateur. Les stériles sont des matériaux de granulométrie hétérogène sans valeur économique qui sont issus de la phase d'extraction. Ils sont généralement stockés sous forme d'empilements appelés haldes à stériles (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002a; Bussière, 2007). Les stériles ont une granulométrie relativement grossière et étalée (un coefficient d'uniformité souvent supérieur à 20). Des particules fines se trouvent concentrées au sommet de l'halde, tandis que les particules grossières s'accumulent au pied de la pente (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002a). Cette distribution hétérogène des matériaux rend plus complexe le comportement mécanique, hydraulique et géochimique global de la structure.

Les principales préoccupations concernant le stockage des stériles sont leur stabilité physique et chimique (Aubertin et al., 2002). La stabilité physique est fortement liée aux propriétés des matériaux stockés, aux celles de la fondation et à la topographie du lieu de stockage, mais aussi, d'autres facteurs externes peuvent aussi l'affecter comme les perturbations climatiques (Aubertin et al., 2002). Si les stériles contiennent suffisamment de minéraux sulfurés, ils peuvent aussi générer le DMA.

Les résidus sont des particules des roches finement broyées issus de la phase du traitement du minerai et qui sont généralement pompées ou transportées sous forme de pulpe vers des parcs à résidu. Ces aires d'accumulation doivent souvent être ceinturées par des digues. L'objectif de la construction de digue est de contenir et d'éviter l'épanchement de résidus dans l'environnement, ce qui exige l'utilisation des matériaux à faible conductivité hydraulique (matériaux fins) qui se trouvent à proximité du site comme les argiles ou les silts (Ritcey, 1989; Bernier, 1999; Aubertin et Bussière, 2001; Bussière 2007).

La stabilité physique des digues de confinement et la stabilité chimique des rejets sont considérées comme les principaux problèmes environnementaux liés aux résidus miniers (Ritcey, 1989; Bussière, 2004). De nouvelles approches d'entreposage ont été développées et appliquées visant à améliorer la stabilité physique telle que la densification des résidus miniers (résidus épaissis, en pâte ou filtrés), la co-disposition des stériles et les rejets du concentrateur (Co-mixing ou l'inclusion de roches stériles dans les parcs à résidu) et la désulfuration environnementale (Bussière et al, 1997; Davies et Rice, 2001; Aubertin et al., 2002; Fourie, 2002; Bussière, 2004; Martin et al., 2005; Davies, 2011). Des recouvrements miniers ont été aussi développés afin de limiter le risque d'instabilité chimique (DMA). Chacun de ces types des rejets miniers doit être stocké de manière à garantir leur stabilité physique et chimique à long terme.

## **1.2 Drainage minier acide et restauration minière**

### **1.2.1 Drainage minier acide**

Le DMA est l'un des problèmes environnementaux les plus importants auquel l'industrie minière fait face. Il résulte de l'oxydation des minéraux sulfurés principalement la pyrite ou la pyrrhotite lorsqu'ils sont exposés à l'oxygène atmosphérique et à l'eau (Thomas et al. 1998, 2001; Rimstidt et al. 1994; Blowes et al., 2014). Les réactions d'oxydation chimique, bactérienne et électrochimique des sulfures responsables du DMA sont relativement bien connues et détaillées dans la littérature (e.g. Evangelou et Zhang, 1995; Rastadt et Vaughan, 2003; Abratis et al., 2004). L'équation globale de l'oxydation de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) peut s'exprimer de la façon suivante (Nicholson et Scharer, 1994; Gray et al., 1996; Plante et al. 2021) :



En plus de détails et comme montré dans la Figure 1.1 et les Équations (1.2, 1.3, 1.4 et 1.5), à pH près de la neutralité, la pyrite est oxydée par l'oxygène (Équation 1.2) en libérant 2 protons  $H^+$ , ces deux ions d'hydrogène déclenchent l'acidification du milieu, le fer ferreux libéré par l'oxydation directe de pyrite par la suite s'oxyde en fer ferrique (Équation 1.3) en libérant  $3H^+$  ce qui augmente davantage l'acidité du milieu. Si le pH demeure supérieur à 3.5 dans ce cas, le fer ferrique précipite en hydroxyde de fer  $Fe(OH)_3$  (Équation 1.4). Si le pH devient inférieur à 3.5, l'oxydation indirecte commence où le fer ferrique est l'oxydant principal de pyrite, cette réaction libère  $16 H^+$  ce qui augmente davantage l'acidité du milieu (Équation 1.5).

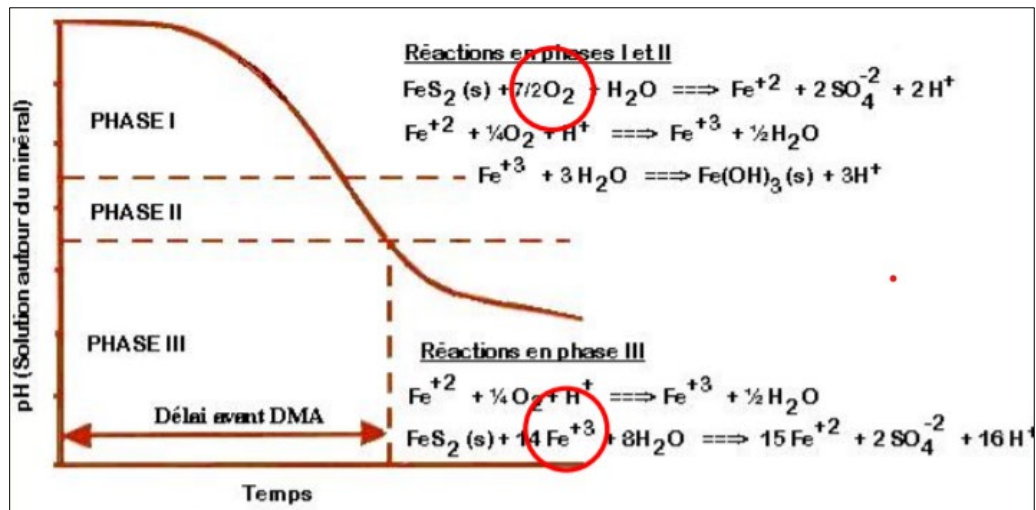
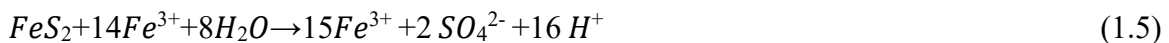


Figure 1.1 Les étapes de la formation de DMA (D'après Kleinman et al., 1981).

Ces réactions d'oxydation peuvent être catalysées par certaines bactéries telles que les *Thiobacillus ferrooxidans* en accélérant l'oxydation du fer et du soufre (Singer et Stumm 1970; Rohwerder et al. 2003). Toutefois, l'apport des bactéries à l'acidification des eaux n'est important qu'à un pH inférieur à 3.5. Dans ces conditions, une accélération du taux de réaction d'acidification par un facteur entre  $10^3$  et  $10^6$  peut être attribuée à l'action des



bactéries acidophiles (Singer et Stumm, 1970; Nordstrom, 2000). En plus de l'activité bactérienne, il existe d'autres paramètres d'influence tel que le taux de réactivité de la réaction d'oxydation, la minéralogie et la structure cristalline des minéraux sulfurés, le pH, la granulométrie, la température, le degré de saturation, la disponibilité de l'oxygène et la concentration en fer ferrique (Nicholson et al., 1988; Ritcey, 1989; Nicholson et Scharer, 1994; Aubertin et al., 2002; Belzile et al., 2004).

L'oxydation des sulfures peut être atténuée naturellement par un processus de neutralisation. Il existe des minéraux qui grâce à leur capacité neutralisante, peuvent ralentir ou limiter l'oxydation. Les minéraux les plus neutralisants sont principalement les carbonates (la calcite  $[CaCO_3]$  et la dolomite  $[(Ca Mg)CO_3]$ ), mais, aussi, il y a les oxydes, les hydroxydes et les silicates qui ont un pouvoir neutralisant plus faible et plus lent que les carbonates (Kwong, 1993). Plus de détails sur les processus de formation et de neutralisation du DMA peuvent être retrouvés dans Aubertin et al. (2002) et Bussière et Guittony (2020).

### **1.2.2 Restauration minière**

La restauration minière commence dès le début de l'exploitation du minerai et continue jusqu'à la réhabilitation totale du site. Des structures de stockage des rejets comme les digues doivent être restaurées. Des méthodes de prévention doivent être également envisagées selon la disponibilité des matériaux à proximité du site, la topographie du site, le niveau de la nappe phréatique et les conditions climatiques afin d'empêcher le DMA. Ces techniques de prévention jouent sur l'un des composants réactifs de l'oxydation, soit l'oxygène (tel que les couvertures avec effet de barrière capillaire CEBC et les recouvrements avec nappe phréatique surélevée) soit l'eau (les recouvrements à faible conductivité hydraulique) (Aubertin et al., 1955; 2016; Bussière et Guittony, 2020). L'utilisation des recouvrements miniers faits de matériaux granulaires est souvent nécessaire. La section suivante présente les principes de base de certains de ces recouvrements.

### 1.2.2.1 Les barrières à l'oxygène

Ces recouvrements sont fréquemment appliqués pour restaurer les aires d'entreposage des rejets miniers et visent à contrôler l'accessibilité de l'oxygène aux rejets miniers réactifs (Collin et Rasmuson, 1988; Nicholson et al., 1989; Elberling et Damgaard, 2001). Parmi les méthodes de restauration fréquemment utilisées qui visent à bloquer le flux d'oxygène, l'on retrouve les systèmes monocouches avec une nappe phréatique surélevée (p. ex. Aubertin et al., 1999; Ouangrawa et al., 2006, 2009; Demers, 2008; Éthier et al., 2018) et les couvertures avec effet de barrière capillaire CEBC (Aubertin et al., 1998; 1999; Bussière, 2007; Demers et al., 2021). Le système monocouche avec nappe phréatique surélevée est habituellement constitué d'une couche du matériau granulaire ayant une bonne capacité à contrôler l'évaporation et à favoriser l'infiltration, ce qui encourage la remontée du niveau phréatique. Le niveau phréatique peut aussi être contrôlé en limitant l'écoulement latéral de l'eau souterraine. Un maintien du niveau phréatique près (ou au-dessus) de l'interface recouvrement-résidu permet de réduire significativement l'oxygène disponible à l'oxydation des minéraux sulfureux (Bussière, 2007; Demers, 2008; Éthier et al., 2018; Bussière et Guittony, 2020).

Les CEBC sont formées de 3 à 5 couches dont les plus importantes sont la couche de rétention d'humidité (CRH) et les deux couches de bris capillaire supérieur et inférieur (Figure 1.1; Aubertin et al. 1999). Les CEBC sont généralement utilisées lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas et visent à maintenir le degré de saturation ( $S_r$ ) de la couche de rétention d'humidité supérieur à 85% (grâce à l'effet de barrière capillaire) afin d'empêcher la migration de l'oxygène vers les résidus (p. ex. Nicholson et al., 1989; Aubertin et al., 1997; Aubertin et al., 1999; Bussière et al., 2003, 2004, 2006, 2007). Les effets de barrière capillaire sont créés lorsqu'une couche de matériaux fins, la CRH (de forte capacité de rétention d'eau et des conductivités hydrauliques saturées ( $k_{sat}$ ) faible) est installée au-dessus d'une couche de bris capillaire (des matériaux grossiers; de faible capacité de rétention d'eau et de  $k_{sat}$  élevée). Plusieurs études montrent que les CEBC constituent une approche efficace pour la restauration des parcs à résidus miniers générateurs de DMA (Bussière et al., 2003, 2006, 2007; Dagenais, 2005) en climat tempéré.

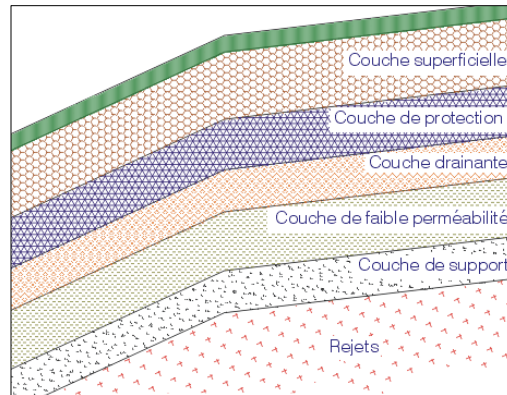


Figure 1.2 Configuration type de CEBC (tiré de Aubertin et al., 2002).

### 1.2.2.2 Les barrières à l'eau

Les barrières à l'eau sont des recouvrements à faible conductivité hydraulique qui visent à limiter l'infiltration de l'eau vers le résidu afin de bloquer le processus d'oxydation. Ils sont constitués d'une couche de matériaux soit naturels à granulométrie fine comme des couches d'argile compactée ou de géomembranes, de géocomposites bentonitiques ou de mélanges sol-bentonite, ces matériaux jouent le rôle des barrières imperméables à l'eau (Aubertin et al. 1995; 2016). La valeur de la conductivité hydraulique saturée est typiquement inférieure à  $10^{-7}$  cm/s (Aubertin et al. 2016).

## 1.3 Besoins en matériaux fins et potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite en environnement

Les informations présentées dans les sections précédentes indiquent que plusieurs types de recouvrements et également les digues de stockage des résidus miniers nécessitent l'utilisation de matériaux fins. Ces derniers ne sont pas toujours disponibles à proximité du site minier et, dans tel cas, l'utilisation de mélanges sol-bentonite comme matériaux alternatifs aux matériaux fins d'origine naturelle pourrait s'avérer une alternative intéressante. Plusieurs études ont montré que les mélanges sol-bentonite ont des propriétés hydriques (conductivité hydraulique saturée et courbe de rétention d'eau) favorables pour être utilisés dans la conception des tapis d'étanchéité et dans les projets de stockage sécuritaire des déchets radioactifs et dangereux ainsi que dans la construction des digues et recouvrements miniers (p. ex. Alther, 1987; Kenney, 1992; Chapuis et al., 1992; Alston et

al., 1997; Tay et al., 2001; Kouloughli, 2007; Tripathi, 2013; Renken, 2006; Boulanger Martel, 2015). Bien que peu utilisés jusqu'à présent, les mélanges sol-bentonite présentent une alternative très intéressante notamment comme matériaux de construction pour les noyaux de digues étanches, les recouvrements à faible  $k_{sat}$  et la couche de rétention d'humidité (CRH) des CEBC, lorsque des matériaux fins ne sont pas disponibles à proximité du site (Aubertin et al., 1997; O'Kane et al., 2001; Boulanger Martel et al., 2016). La conductivité hydraulique saturée est l'une des principales propriétés hydrauliques requises pour la conception des digues et des recouvrements miniers. Bien que des mesures de  $k_{sat}$  soient souhaitées, il est fréquent de faire appel à des modèles d'estimation pour obtenir des valeurs de  $k_{sat}$ , surtout pendant les phases préliminaires de conception. Ces modèles permettent d'obtenir rapidement des valeurs de  $k_{sat}$ , mais peu de modèles prédictifs ont été développés pour les mélanges sol-bentonite jusqu'à présent. Les modèles disponibles, ont été développés spécifiquement pour des mélanges formés de sable ou de silt et de la bentonite (Chapuis 1990; Sivapullai 2000; Tripathi, 2013), des matériaux parfois peu disponibles dans un contexte minier.

#### **1.4 Contexte et objectifs du projet de recherche**

La restauration des aires de stockage des rejets miniers représente un défi environnemental important pour l'industrie minière, surtout pour les sites miniers générateurs de drainage minier acide. La construction des recouvrements miniers visant à limiter le DMA ou des digues de stockage nécessite l'utilisation de quantité importante de matériaux fins. Ces derniers ne sont pas toujours disponibles à proximité du site et rendre la restauration plus difficile et onéreuse. Dans un tel cas, l'utilisation de mélanges sol-bentonite comme matériaux de construction à faible conductivité hydraulique ou à forte capacité de rétention d'eau s'avère une solution intéressante.

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'évaluer via des mesures directes au laboratoire et le développement d'outils d'estimation de la conductivité hydraulique saturée, le potentiel d'utilisation de divers mélanges sol-bentonite pour la construction des structures de confinement et systèmes de recouvrements miniers. La présente étude se décline en quatre objectifs spécifiques (OS):

- OS1 : Caractériser les propriétés physiques, géotechniques et hydrogéologiques de mélanges gravier-bentonite, sable-bentonite et résidus-bentonite ainsi que leurs constituants.
- OS2 : Adapter un modèle de prédiction de la conductivité hydraulique saturée aux mélanges sol-bentonites utilisables en restauration minière.
- OS3 : Évaluer l'influence des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite testés.
- OS4 : Statuer sur le potentiel d'application des mélanges sol-bentonite en environnement minier.

## **1.5 Structures du mémoire et les contributions scientifiques**

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres, qui sont les suivants :

- Le chapitre 1 représente l'introduction et décrit aussi le contexte de la recherche, la problématique et les objectifs du projet.
- Le chapitre 2 est une revue de littérature détaillée sur la structure des mélanges sol-bentonite, la conductivité hydraulique saturée et les facteurs d'influence. Puis, on met en valeur quelques exemples d'application de ces mélanges en environnement minier. Finalement, les besoins de recherche sont présentés.
- Le chapitre 3 est un article de revue qui rend compte des OS 1 et 2. Les résultats des essais de caractérisation de base et de perméabilité réalisés au laboratoire sur les différents mélanges sont présentés et discutés. Le développement d'un modèle prédictif de la conductivité hydraulique saturée pour les mélanges sol-bentonite testés y est également développé et présenté.
- Le chapitre 4 répond à l'OS3, où les résultats d'essais visant à évaluer l'effet des cycles de gel-dégel sur  $k_{sat}$  sont présentés
- Le chapitre 5 est une discussion générale qui met en perspective les résultats obtenus et qui discute le potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite en environnement minier (OS4).
- Finalement, le chapitre 6 vise à présenter les principales conclusions et recommandations de ce mémoire.

Les principales contributions scientifiques de ce mémoire sont un article de conférence accepté et présenté à la Conférence canadienne de géotechnique à Saskatoon et un article de revue soumis à *Geotechnical and Geological engineering journal*.

Les références complètes des articles publiés et soumis sont présentées ci-dessous.

Hfaiedh, Y., Boulanger-Martel, V. et Bussière, B., (2023) *Hydraulic properties of crushed rock-bentonite mixtures used as low permeability materials in mine waste confinement structures*. 76<sup>e</sup> Conférence Canadienne de Géotechnique, Saskatchewan, Canada. 1-4 octobre.

Hfaiedh, Y., Boulanger-Martel, V. et Bussière, B., (2023). *Measurements and prediction of saturated hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures used as low permeability materials in mine waste confinement structures*, soumis au *Geotechnical and Geological Engineering Journal* (Novembre 2023).

## CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre constitue la revue de littérature du mémoire, au cours duquel on met en lumière les principaux concepts essentiels à la compréhension de ce projet de recherche. Tout d'abord, une vue d'ensemble des mélanges sol-bentonite est présentée. Cette partie focalise sur les principales propriétés et caractéristiques de la bentonite ainsi que la structure des mélanges sol-bentonite. Ensuite les propriétés hydrogéologiques des mélanges sol-bentonite, telle que la conductivité hydraulique saturée ( $k_{\text{sat}}$ ) et les facteurs d'influence sont mis en évidence. Des exemples d'application des mélanges sol-bentonite en environnement minier sont présentés et la performance des systèmes en place est discutée. Finalement, les besoins en recherche associés à l'utilisation des mélanges sol-bentonite comme matériaux de construction à faible conductivité hydraulique (ou de forte capacité de rétention d'eau) dans un contexte minier seront cités.

### 2.1 Mélanges sol-bentonite

Les mélanges sol-bentonite sont couramment utilisés dans la conception des revêtements d'étanchéité et dans les projets de gestion sécurisée des déchets (Chapuis et al., 1992; Alston et al., 1997; Tay et al., 2001; Tripathi, 2006). Bien que leur utilisation ait été limitée jusqu'à présent, les mélanges sol-bentonite offrent une alternative particulièrement attrayante comme matériaux de construction pour les couvertures à faible perméabilité lorsque des matériaux fins ne sont pas disponibles à proximité du site (Boulangier Martel, 2015). Diverses études démontrent que la combinaison d'un matériau granulaire (souvent du sable, éventuellement du gravier) avec une argile telle que la bentonite produit un mélange ayant les propriétés hydrogéologiques appropriées pour la construction de structures de stockage pour divers types de déchets dangereux ou à fort potentiel de contamination (p. eg, Chapuis, 1990a, 1990b; Kenney et al., 1992; Guo et al., 2010).

La présente section vise à présenter, tout d'abord, les propriétés physico-chimiques de la bentonite et ensuite la structure des mélanges sol-bentonite. Ces notions de base des matériaux sont importantes afin de bien comprendre les mécanismes qui gouvernent le comportement hydrique des mélanges sol-bentonite.

### **2.1.1 Bentonite**

Le terme bentonite est un terme industriel qui, d'un point de vue technique, désigne une poudre minérale constituée essentiellement d'argiles gonflantes de la famille des smectites (souvent de la montmorillonite). La bentonite en poudre peut être de couleur blanche, grise ou légèrement jaunâtre. Les bentonites ont des capacités d'adsorption, d'échange cationique et de gonflement élevées et cela explique bien leurs nombreuses applications dans différents domaines (Ferhat, 2012). Dans les différentes parties de cette section, une vue d'ensemble sur la minéralogie, la cristallographie, la microstructure, le phénomène d'hydratation et de gonflement, ainsi que quelques propriétés physiques et géotechniques de base de la bentonite seule est présentée.

#### **2.1.1.1 Minéralogie, cristallographie et microstructure**

La bentonite industrielle est habituellement formée à plus de 80% de montmorillonite, mais peut aussi contenir du quartz, de la pyrite, de la calcite, des plagioclases, du feldspath et de plusieurs minéraux accessoires (Figure 2.1; Prêt et al., 2010; Kiviranta, 2011; Batana, 2019). La Figure 2.1 montre que la principale phase minérale d'une bentonite industrielle (MX80) est la montmorillonite et qu'elle se présente sous la forme de particules fines de forme irrégulière ou hexagonale (Prêt et al., 2010). La montmorillonite fait partie de la famille phyllosilicates, et plus précisément de la famille des smectites. La montmorillonite est un aluminosilicate hydraté lié à des ions métalliques en structure en feuillets d'épaisseur généralement de l'ordre de 10Å et est de formule générale  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{H}_2\text{O}$ . Les montmorillonites ont une structure multi échelle qui est caractérisée par trois niveaux: le feuillet, la particule primaire et l'agrégat (Figure 2.2).



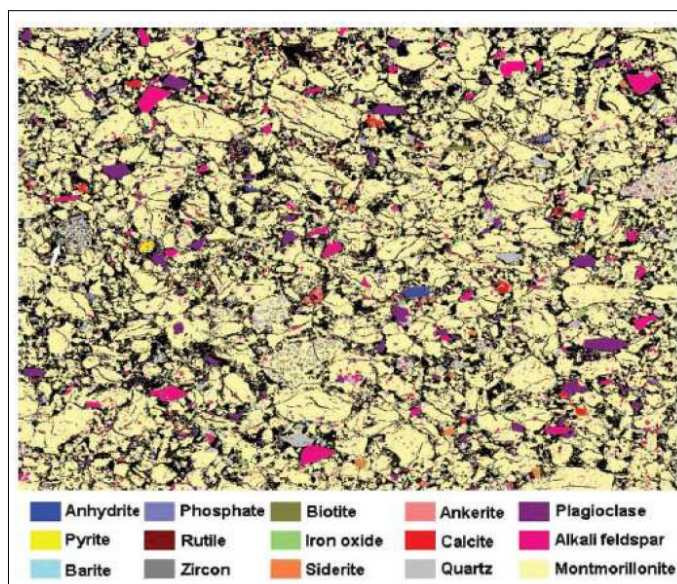


Figure 2.1 Carte des minéraux (couleurs) et de la macroporosité (noir) de bentonite MX80 obtenue au MEB/EDS+analyse d'images (résolution 3microns/pixel) (Prêt et al., 2010).

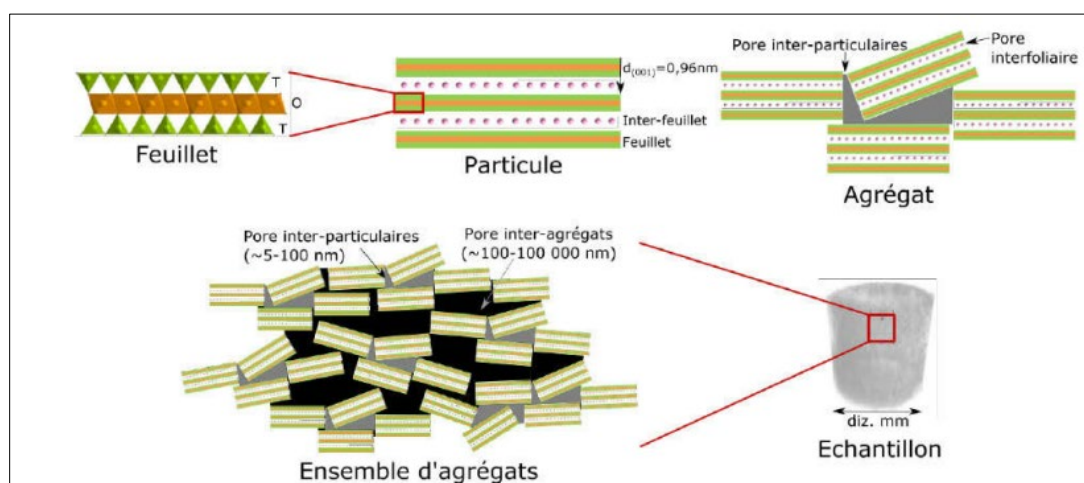


Figure 2.2 Organisation d'une smectite de l'échelle du feuillet à l'échelle de l'échantillon (d'après Aylmore and Quirk (1959), Yong and Mohamed (1992), Vasseur et al. (1995), Yong (1999b)).

Les feuillets sont les unités structurales de base qui décrivent la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile et le comportement macroscopique. C'est à leur échelle que les argiles sont polarisées, avec des charges négatives à leur surface, qui leur accèdent à se

lier avec des cations échangeables. Et grâce à leurs charges négatives en surface, les smectites ont de grandes capacités d'adsorption et d'échange cationique (Guillaume, 2002). Comme montré aux Figures 2.3 et 2.4, la montmorillonite a une structure en feuillet de type TOT où deux feuillets tétraédriques (T) sont séparés par un feuillet octaédrique (O). Son système cristallin est monoclinique et possède environ 0.3 à 0.4 électron par maille (Le Pluart, 2002). Une seule feuille de cristal de montmorillonite est formée d'environ 15 à 20 couches élémentaires (Jasmund et La-galy, 1993). La structure feuilletée de la montmorillonite lui confère une surface spécifique importante qui est habituellement située entre 50 et 120 m<sup>2</sup>/g. La surface spécifique interne peut toutefois aller jusqu'à 840 m<sup>2</sup>/g (Mitchell et Soga, 2005).

Les particules primaires sont formées d'un empilement de 5 à 10 feuillets identiques et en parallèle. Leur structure peut se présenter suivant trois grands types d'empilements des feuillets, un empilement ordonné, un empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel) ou un empilement désordonné (ou désordre turbostatique). Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet : leur intensité dépend des cations échangeables et des molécules d'eau présentes entre les feuillets élémentaires qui lui-même dépend également de la nature de l'argile considérée (Boutarfa, 2012). L'ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions forme les agrégats. Ces derniers ont une taille qui varie de 0.1 à 10 microns (Figure 2.4). L'arrangement et l'organisation dépendent du type des forces qui résultent des interactions entre particules et du degré de compaction (Boutarfa, 2012).

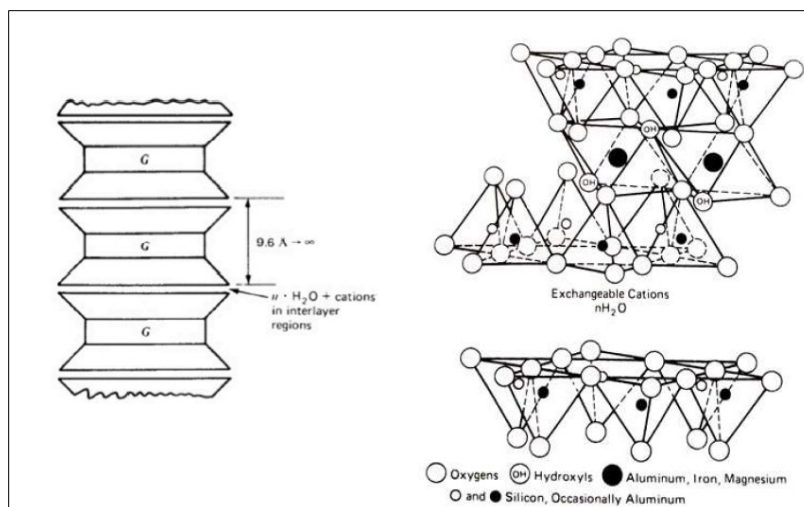


Figure 2.3 Représentation schématique de la montmorillonite (Mitchell et Soga, 2005).

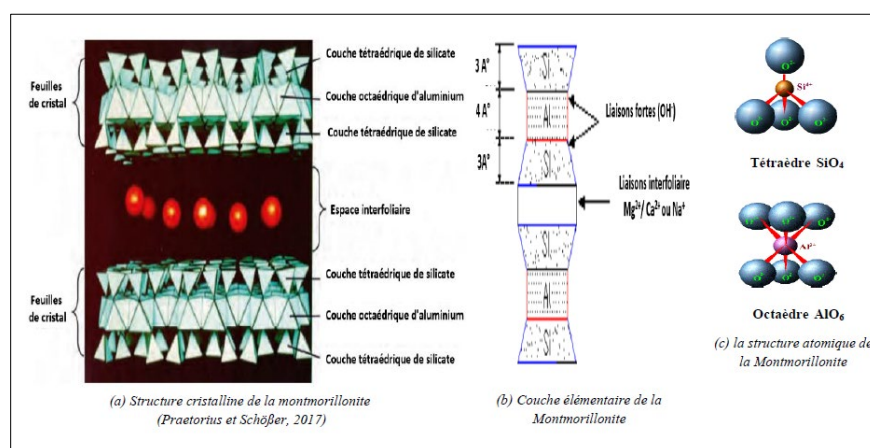


Figure 2.4 Structure cristalline de la montmorillonite (Praetorius et Schöber, 2017).

### 2.1.1.2 Type de bentonite

Du point de vue chimique, il existe deux grandes classes de bentonite soit : la bentonite à base de sodium (montmorillonite sodique) et la bentonite à base de calcium (montmorillonite calcique). C'est la nature et la proportion des cations compensateurs présents qui permettent de classer les bentonites, dans le cas où les cations sont majoritairement du  $\text{Na}^+$ , la bentonite est nommée sodique, cependant, dans le cas où les ions  $\text{Ca}^{2+}$  sont en majorité, la bentonite est qualifiée de calcique. Les principales caractéristiques de ces deux types de bentonite sont résumées dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Caractéristiques de deux types de bentonites.

Type bentonite	Caractéristiques
Bentonite sodique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le sodium est le cation échangeable majoritaire</li> <li>- Formée des cendres déposées dans l'eau de mer</li> <li>- Fort pouvoir de gonflement et d'adsorption</li> <li>- Potentiel de gonflement important (entre 600 et 700%)</li> <li>- Surface spécifique importante</li> <li>- Capacité d'échange cationique importante (80 – 150 meq/100g)</li> <li>- Utilisée beaucoup dans la construction d'ouvrages de rétention des déchets, dans les puits de forages de pétrole et de l'eau et dans la recherche géothermique</li> <li>- Indice de plasticité et limite de liquidité importants</li> <li>- De trois ordres de grandeur moins perméable qu'une bentonite calcique</li> <li>- Subit uniquement un procédé de séchage à 80-90 °C et broyage avant leur commercialisation.</li> <li>- Non toxique</li> </ul>
Bentonite calcique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le calcium est le cation échangeable majoritaire</li> <li>- Formée des cendres déposées dans l'eau douce</li> <li>- Faible pouvoir de gonflement et d'adsorption</li> <li>- Faible potentiel de gonflement (200-300%)</li> <li>- A des applications pharmaceutiques</li> <li>- Subir uniquement des procédés séchage à 80-90 °C et broyage avant leur commercialisation.</li> <li>- Non toxique</li> </ul>
Références	Mitchell, (1993); Metreveli et Frimmel (2007); Olson et Daniel (1981); Praetorius et Schöber (2017).

Généralement, la bentonite sodique permet de réduire considérablement la conductivité hydraulique saturée mieux que la bentonite calcique (Olson et Daniel, 1981). Également, elle a une grande capacité de d'échange cationique (80 – 150 meq/100g) et surface spécifique ce qui permet d'atténuer la propagation des contaminants dans l'environnement (Metreveli et Frimmel, 2007).

La bentonite peut aussi retrouver sous forme activée au carbonate de sodium. Cette forme est généralement celle utilisée dans les géocomposites bentonitiques (Touze-Foltz, 2006; 2008). Dans le but d'améliorer les propriétés d'adsorption de la bentonite calcique, la bentonite calcique est souvent traitée au carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) pour permettre une substitution des cations  $\text{Ca}^{2+}$  par le  $\text{Na}^+$ . Ceci a pour effet d'augmenter la teneur en sodium et améliorer les propriétés des bentonites calciques.

### **2.1.1.3 Hydratation et gonflement de la bentonite**

La bentonite est caractérisée par un fort potentiel de gonflement, ce gonflement se crée une fois la bentonite se trouve en contact avec un solvant ou une atmosphère ayant une haute pression du vapeur (Arifin, 2008). Elle peut gonfler au moins cinq fois l'équivalent de son volume au contact de l'eau (allant jusqu'à 10 à 15 fois; Laird, 2006; Arifin, 2008). En fait, les montmorillonites représentent le caractère de gonflement le plus intéressant de tous les minéraux de la famille de phyllosilicates. Ces minéraux possèdent le critère de la formation facile des complexes lamellaires par l'insertion de molécules d'eau dans l'espace interfoliaire. Ce gonflement entraîne une augmentation de l'espace interfoliaire et dépend de la charge du feuillet, de la localisation de celle-ci et de la nature des cations de compensation. Par exemple, la montmorillonite sodique a un gonflement beaucoup plus important que la montmorillonite calcique (Farmer, 1974; Caillère et al., 1982b; Duchaufour, 1988; Morel, 1989). Plus d'information sur le gonflement de la bentonite est disponible dans la littérature (Norrish 1954; Swartzen-Allen et Matijevic 1974; Van Olphen 1977; Luckham et Rossi 1999).

Les Figures 2.5 et 2.6 représentent schématiquement l'hydratation de la montmorillonite sodique et son gonflement. La bentonite se gonfle et augmente de volume lorsque l'eau incorpore les feuillets T-O-T en association avec les cations entre feuillets  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . Lorsque les cations sont sodiques, la capacité d'accepter des molécules d'eau en surface

est maximale, et les feuillets ont la capacité maximale à s'éloigner ou à se rapprocher les uns des autres selon la quantité d'eau insérée. Tandis que, dans le cas où les cations sont  $\text{Ca}^{2+}$ , la bentonite gonfle également, mais dans des proportions moins importantes (Norrish 1954). La bentonite atteint son volume de gonflement maximal une fois elle est totalement hydratée. De manière générale, le gonflement libre de la bentonite dépend du potentiel d'échange ionique du sodium, de la fraction argileuse ( $< 2 \mu\text{m}$ ) et de la surface spécifique (Mishra et al., 2011).

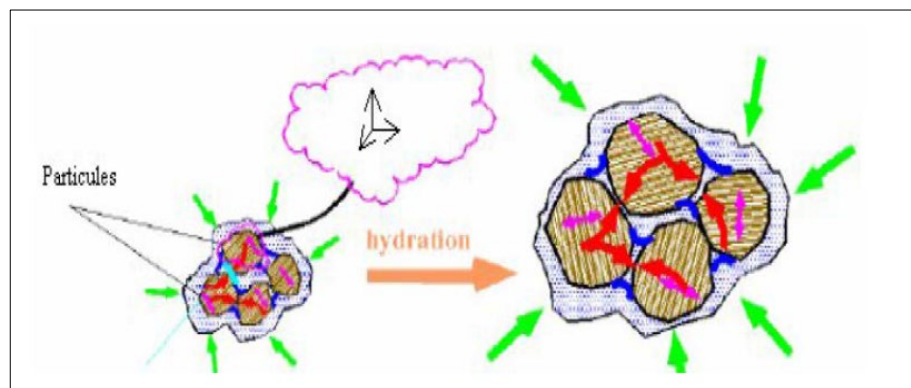


Figure 2.5 Cas de gonflement général d'une argile (tiré de Belbachir, 2018).

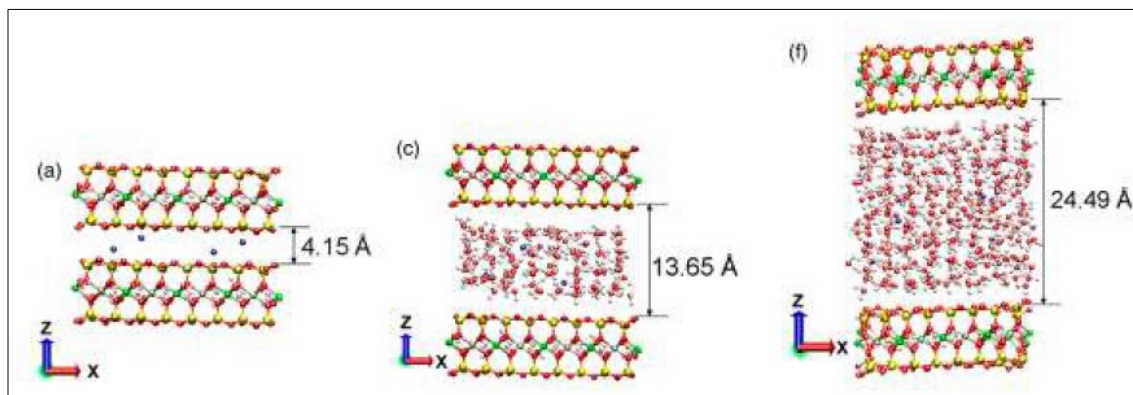


Figure 2.6 Montmorillonite sodique à divers niveaux d'hydratation : a) sèche ; b) 4 couches de molécules d'eau; c) 10 couches de molécules d'eau (Pradhan et al., 2015).

On distingue deux types de gonflement caractéristiques de la montmorillonite. Le premier est le gonflement interfoliaire qui intervient à l'échelle de feuillet (gonflement microstructure). Ce gonflement entraîne une augmentation de la distance interfoliaire de 0.96 à 2 nm et il dépend du nombre de couches de molécules d'eau adsorbées entre deux

feuillet voisins (Figure 2.7). Le deuxième type est le gonflement interparticulaire appelé aussi gonflement osmotique ou macroscopique, l'ampleur de ce type est limitée par rapport au gonflement interfoliaire. Il a lieu lorsque l'énergie d'hydratation est suffisante pour monter la barrière du potentiel due aux forces électrostatiques attractives entre les feuillets (Luckham et Rossi, 1999; Sivapullaiah et al., 1996 ; Laird, 2006).

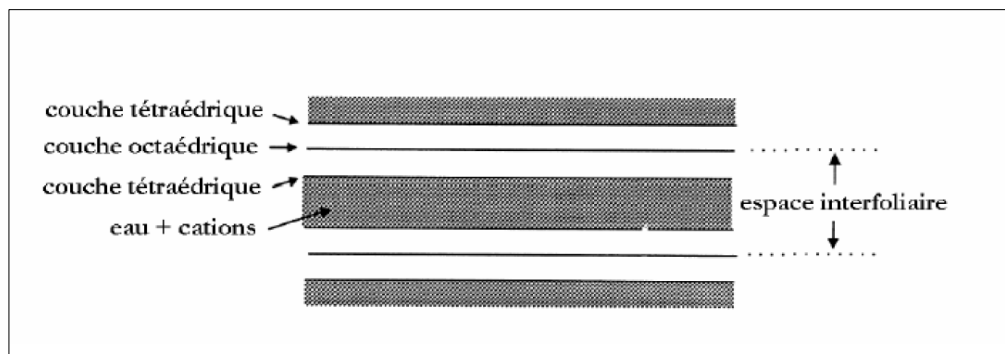


Figure 2.7 Représentation de l'espace interfoliaire (distance basale) entre deux feuillets de montmorillonite (Luckham et Rossi, 1999).

La littérature montre que les critères de gonflement et d'hydratation de la bentonite ont été étudiés en détail à l'échelle macroscopique et microscopique. Des méthodes mécaniques ont été appliquées pour définir les propriétés de gonflement et hydratation de la bentonite à l'échelle macroscopique comme l'œdomètre (Al- Mukhtar et al., 1999 ; Parcevaux, 1980), les mesures d'imbibition (e.g., Touret, 1988 ; Kamel, 1981 ; Hu et al., 2001 ; Akin et al. 2000; Wild et al., 1997; Turki, 1987) et des courbes d'adsorption (Lassin, 1998 ; Mirosław, 2001). D'autres techniques telles que la diffraction des rayons X aux petits angles (Touret, 1988 ; Pons, 1980 ; Liyama, 2000), la spectroscopie infrarouge (Muster et al., 2001 ; Poinignon, 1997), la microscopie électronique (Tessier, 1984), les systèmes microélectromécaniques (Patton et al., 2001), la spectroscopie photoélectrique (Kundakovic et al., 2000) et la SFM (non-contact scanning force microscopy) (Luna et Colchero, 2000 ; Gil et Colchero, 2001) ont été utilisés à l'échelle microscopique.



#### 2.1.1.4 Propriétés types des bentonites

La bentonite possède diverses propriétés spécifiques qui lui confèrent un grand intérêt industriel tel que le grand pouvoir de gonflement, la capacité importante d'adsorption d'eau et d'échange cationique et une faible perméabilité. Ces propriétés sont abordées dans ce qui suit.

##### - Granulométrie

La notion d'argile minéralogique diffère de celle de l'argile géotechnique; l'argile minéralogique se réfère aux minéraux spécifiques qui composent l'argile. Ces minéraux peuvent inclure la smectite, la kaolinite, l'illite, etc. L'argile géotechnique est caractérisée essentiellement en fonction de la granulométrie, mais aussi, de sa plasticité, de sa compressibilité, de sa cohésion, etc.

Les bentonites, en terme géotechnique, sont typiquement classées comme des sols fins. Un exemple d'analyse granulométrique tiré de l'étude de Paumier (2008) montre que les bentonites peuvent avoir une distribution granulométrique composée à 20% de sable (obtenu par tamisage), 34 % de silts (obtenu par analyse sédimentométrique) et 46 % de particules fines (analyse sédimentométrique) (Figure 2.8; Paumier, 2008). Des résultats similaires sont obtenus par les travaux de Demdoun (2019) où le pourcentage des particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$  est d'environ 60% et le pourcentage des particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$  est de l'ordre de 85% (Demdoun, 2019).

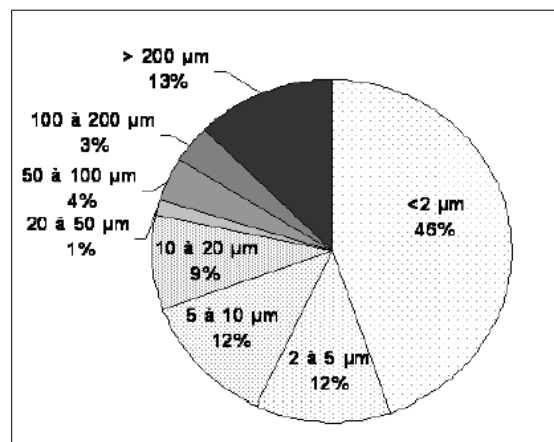


Figure 2.8 Distribution granulométrique des grains de la bentonite brute obtenue par sédimentométrie et tamisage des phases grossières (Paumier, 2008).



- Pression de gonflement  $P_G$

La pression de gonflement de la bentonite est une caractéristique importante pour de nombreuses applications industrielles qui nécessitent une barrière étanche à l'eau. Elle exprime la pression produite lors de l'hydratation d'un l'échantillon dans des conditions confinées (test à volume constant  $\Delta v=0$ ). La pression de gonflement peut aussi être représentée par la pression nécessaire pour qu'un échantillon retourne à son volume initial avant l'absorption d'eau (Arifin, 2008; ASTM, 2008c). Il existe différentes méthodes appliquées pour mesurer la pression du gonflement, soit la méthode de gonflement libre et l'essai à volume constant (Gueddouda, (2013); Chen, (1988); Serratrice et Soyez, (1996)). La méthode du volume constant est effectuée selon la norme ASTM D 4546-90, un essai réalisé à l'aide de l'œdomètre. Cet essai a pour but de neutraliser le gonflement de l'échantillon par l'application d'une charge croissante une fois que le déplacement du comparateur arrive à 1/100 mm. La valeur de la charge trouvée lorsque l'échantillon est stabilisé correspond à la pression de gonflement. La méthode de gonflement libre veut qu'après la phase de gonflement libre, l'échantillon semi-saturé continue le chemin de chargement jusqu'à ce que son volume revienne à sa valeur initiale. La pression de gonflement dans tel cas correspond à la contrainte avec laquelle l'échantillon revient à son volume initial.

La bentonite a des pressions de gonflement importantes d'ordre de 400MPa (Plinninger et al., 2005). La pression de gonflement de la bentonite dépend de la densité sèche initiale, de la teneur en eau initiale et de la teneur en montmorillonite : elle augmente lorsque la densité sèche initiale est augmentée et elle diminue une fois la teneur en eau initiale est augmentée (Sridharan et al., 1986; Komine et Ogata, 1994; Villar et Lloret, 2004; Villar et Lloret, 2008). Certaines études ont montré que la pression de gonflement de la bentonite est entre 1 et 20 MPa pour des teneurs en montmorillonite de 80-90 % montmorillonite pour et des masses volumiques sèches entre 1.5 et 2.0 g/cm<sup>3</sup> (Gray et al., 1984; Pusch et al., 1990; Villar et Lloret, 2008). Les résultats des essais de gonflement faits par Gueddouda (2013) sont résumés dans le tableau ci-dessous à titre d'exemple.

Tableau 2.2 Résumé d'un exemple des résultats des paramètres du gonflement (Gueddouda, 2013).

	Taux de gonflement libre	de Pression du gonflement par la méthode de volume constante	Pression du gonflement par la méthode de gonflement libre
Bentonite	70%	840 KPa	960KPa

- Indice de gonflement libre  $e_f$

L'indice de gonflement libre ( $e_f$ ) de la bentonite est une mesure de la capacité de la bentonite à gonfler en volume lorsqu'elle est en contact avec de l'eau. Cet indice peut être déterminé par la mesure du volume de suspension de bentonite à la suite de l'agitation de la solution dans de l'eau pendant une période donnée en suivant la norme D5890 (ASTM, 2019). Plus l'indice de gonflement est élevé, plus la bentonite est capable d'absorber de l'eau et de se dilater. En général, les bentonites naturelles ont un potentiel de gonflement plus élevé que les bentonites modifiées synthétiquement et plus la bentonite est sodique, plus son indice et son potentiel de gonflement sont importants (Olson et Daniel, 1981). Boulanger Martel et al. (2016) ont mesuré  $e_f$  de la bentonite Grout PDSCo par la méthode décrite par Kenney et al. (1992) et Tripathi (2013). Ils ont trouvé que  $e_f$  est de l'ordre de 11.32 dans l'eau distillée et dans l'eau de robinet. D'autres études ont montré que les ratios de gonflement libre de la bentonite sont entre 17.2 et 25.0 mesurés dans l'eau distillée et entre 5.4 et 9.0 dans l'eau salée (Kenney et al., 1992; Studds et al., 1998 ; Sivapullaiah et al., 2000; Komine, 2010; Tripathi, 2013). La connaissance de ce paramètre est importante dans de nombreuses applications industrielles telles que la géotechnique, l'industrie minière, la construction de tunnels, la construction de barrages, etc., et dans le choix de bentonite la plus appropriée pour une application donnée et pour garantir que les performances souhaitées sont atteintes dans cette application.

- La capacité d'adsorption

La bentonite est caractérisée par une grande capacité d'absorber l'eau, elle peut entraîner une augmentation de son volume pouvant atteindre 12 à 15 fois sa masse sèche (Adamis et al., 2005). Une fois que la bentonite est en contact avec de l'eau, les molécules d'eau sont

attirées vers la surface de la bentonite par des forces électrostatiques et par des liaisons hydrogène. Ces molécules d'eau sont alors piégées dans les espaces interstitiels entre les feuillets, où elles sont maintenues par des forces capillaires. Dali-Youcef a trouvé que la capacité d'adsorption de la bentonite est de l'ordre de 32mg/g de bentonite. Cette caractéristique dépend essentiellement des dimensions des particules et des liaisons rompues, elle est inversement proportionnelle à la grandeur des particules et grâce à elle que la bentonite est largement utilisée dans de nombreux domaines tels que l'industrie pétrolière, la purification de l'eau, la construction et comme matériau de scellement pour empêcher la migration de contaminants dans le sol ou pour prévenir les fuites dans les barrages et les réservoirs.

- La capacité d'échange cationique CEC

CEC est l'une des propriétés les plus importantes de la bentonite, elle permet de définir la quantité des cations monovalents et bivalents pouvant être échangée ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ ) par des cations compensateurs pour la charge négative de 100 mg de bentonite. Ce paramètre est exprimé en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles. La CEC peut être déterminée par la méthode de bleu au méthylène ou par la méthode d'échange au chlorure de cobaltihexamine (Orsini et Rémy, 1976). La CEC de la bentonite est élevée en raison de la présence de sites d'échange cationique sur la surface de ses particules. Ces sites ont une charge négative et peuvent donc attirer et retenir des cations positivement chargés dans l'environnement. La capacité d'échange cationique de la montmorillonite est de 80-150 meq/100g. Elle augmente avec la diminution de la grandeur des particules. La capacité d'échange cationique de la bentonite peut être utilisée dans une variété d'applications environnementales et industrielles, telles que la décontamination des sols, le traitement des eaux usées, la production de béton et de céramique, et la stabilisation des sols pour la construction.

- La densité de charge spécifique

C'est le rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique d'une bentonite et elle est exprimée en ( $\text{meq/m}^2$ ). La densité de charge spécifique donne une idée sur la capacité de gonflement des minéraux argileux ou le pouvoir de la particule à

repousser les autres, plus la densité de charge spécifique augmente, le gonflement ou la pression de gonflement des argiles diminue (Boutarfa, 2012). La densité de charge spécifique de la bentonite a une grande importance dans de nombreuses applications industrielles et environnementales. Par exemple, dans la décontamination des sols, une densité de charge spécifique élevée permet à la bentonite d'adsorber efficacement les contaminants tels que les métaux lourds et les hydrocarbures.

#### - La surface spécifique

La surface spécifique de la bentonite peut être déterminée par la méthode de bleu de Méthylène ou par la méthode de BET (Brunauer, Emmett et Teller) dite aussi la méthode d'adsorption d'azote (Jozja (2003); Paumier (2007); Boutarfa,2012; Massat (2016); Kafi (2019); Demdoum (2020)). La surface spécifique totale de la montmorillonite est entre 700 et 800 m<sup>2</sup>/g dont la surface spécifique interne est entre 600 et 700 m<sup>2</sup>/g et la surface spécifique externe est de l'ordre de 80 m<sup>2</sup>/g. Il existe une relation entre de la surface spécifique et l'indice ou le pouvoir de gonflement de la bentonite : plus la surface spécifique est importante, plus le pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé (Boutarfa, 2012).

#### - Limites d'Atterberg

La plasticité ou l'indice de plasticité  $I_p$  de la bentonite est déterminé à partir de la limite de liquidité  $LL$  (ou  $W_L$ ) et la limite de plasticité  $LP$  (ou  $W_p$ ) où la limite de liquidité de la bentonite peut être mesurée par un pénétromètre à cône selon la méthode A de norme ASTM D4318 (ASTM, 2017) ou par l'appareil de Cassagnarde (Robitaille, 1997). La Figure 2.9 représente une classification des argiles, il est observé que la montmorillonite est plus plastique que les autres minéraux argileux (illite et kaolinite). Il est observé également, d'après la Figure 2.10, que  $LL$  et  $LP$  augmentent considérablement en fonction de pourcentage de la montmorillonite (Hammad,2011).

La bentonite est caractérisée par de grands indices de plasticité et de liquidité ce qui permet de rendre les mélanges sol-bentonite flexibles (Mitchell, 1993).

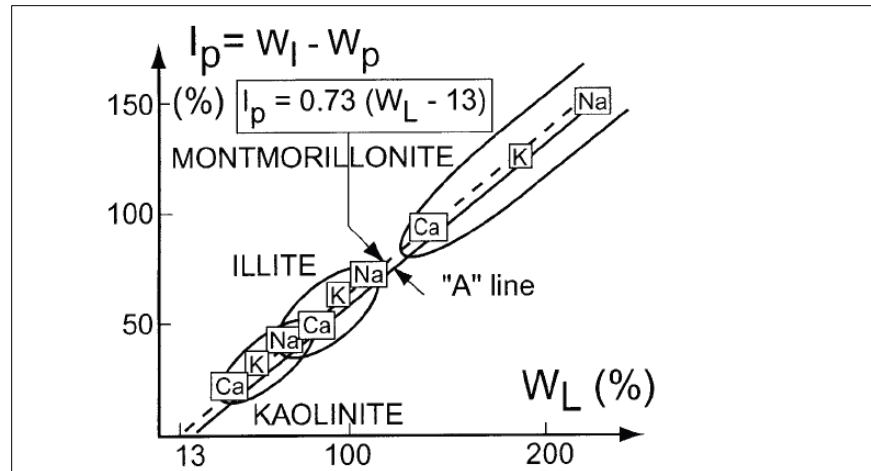


Figure 2.9 Classification des argiles selon leur minéralogie et leurs limites d'Atterberg (Biarez et Hicher, 1994).

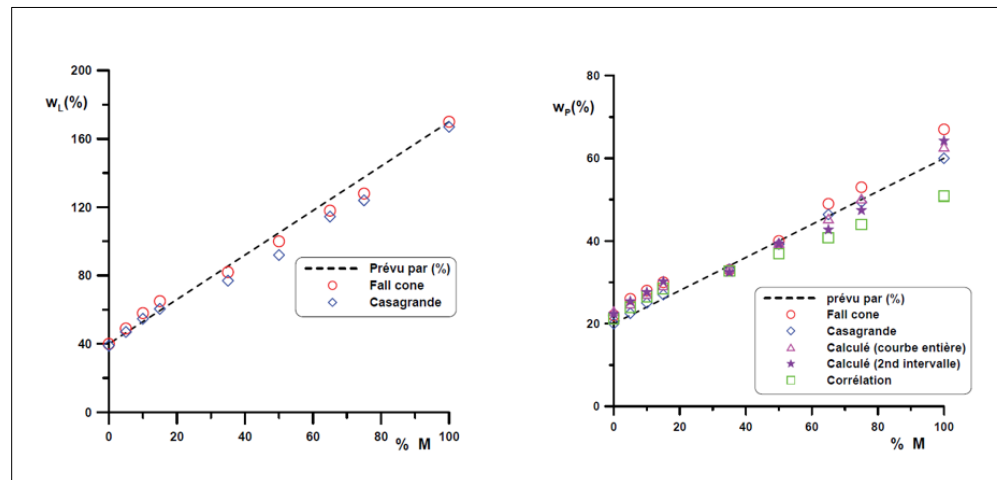


Figure 2.10 Évolution de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité en fonction du % de montmorillonite (Hammad, 2011).

#### - Conductivité hydraulique saturée

Les bentonites ont de faibles perméabilités, l'étude de Cho et al (2000) a montré que le  $k_{sat}$  de la bentonite pure est de l'ordre de  $2 \times 10^{-12}$  cm/s. Dixon et al (1996) ont montré aussi que la conductivité hydraulique saturée de la bentonite varie entre  $10^{-9}$  cm/s et  $10^{-12}$  cm/s pour des densités sèches entre 0.5 et 2.2 g/cm<sup>3</sup>. Cela explique bien leur utilisation dans la construction des barrières hydrauliques imperméables, des tapis d'étanchéité et dans le stockage des déchets radioactifs. Les valeurs de  $k_{sat}$  des bentonites dépendent

essentiellement de la quantité de l'eau absorbée et du type de la bentonite ou de la nature du cation compensateur ( $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+$ ). Olson et Daniel (1981) ont montré que la bentonite sodique permet de réduire considérablement la conductivité hydraulique mieux que la bentonite calcique (Olson et Daniel, 1981). L'utilisation de la bentonite toute seule comme matériaux à faible perméabilité pose des problèmes de résistance aux phénomènes du gel-dégel et aussi du coût. Plusieurs études ont montré que les argiles sont très sensibles aux cycles gel-dégel et cela peut avoir une influence considérablement sur la perméabilité (Chamberlain, 1997; Haug and Wong, 1993; Eigenbird, 2003; Maqsoud et al., 2021). L'utilisation de mélanges sol-bentonite peut constituer une alternative intéressante à ces matériaux (Chapuis, 1990; Konrad and Samson 2000; Chapuis, 2002; Eigenbrod 2003). La structure et les caractéristiques des mélanges sol-bentonite sont présentées en détail dans la partie suivante.

### **2.1.2 Structure des mélanges sol-bentonite**

La bentonite est généralement mélangée avec des matériaux granulaires (du sable ou parfois du gravier) afin d'améliorer les propriétés hydrogéologiques et mécaniques nécessaires pour une bonne performance et fonctionnement des ouvrages de stockage. Chacune de ces composantes a des propriétés et caractéristiques différentes, il est nécessaire de comprendre la structure de ces mélanges.

La Figure 2.11 montre qu'une fois que la bentonite est mélangée avec le matériau de base, certains vides sont remplis par celle-ci. Avec l'ajout de l'eau, le volume des pores rempli par la bentonite augmente dû à la capacité d'absorption d'eau et au potentiel de gonflement de la bentonite. Cela change considérablement la porosité et la conductivité hydraulique saturée du mélange. Par conséquent, il s'avère important de bien définir les relations volumétriques et surtout la notion de porosité des mélanges sol-bentonite pour comprendre leur comportement hydrique. Les relations volumétriques et massiques du mélange sol-bentonite dépendent de degré de saturation du sol et de la quantité de la bentonite disponible et leur capacité de retenir l'eau.

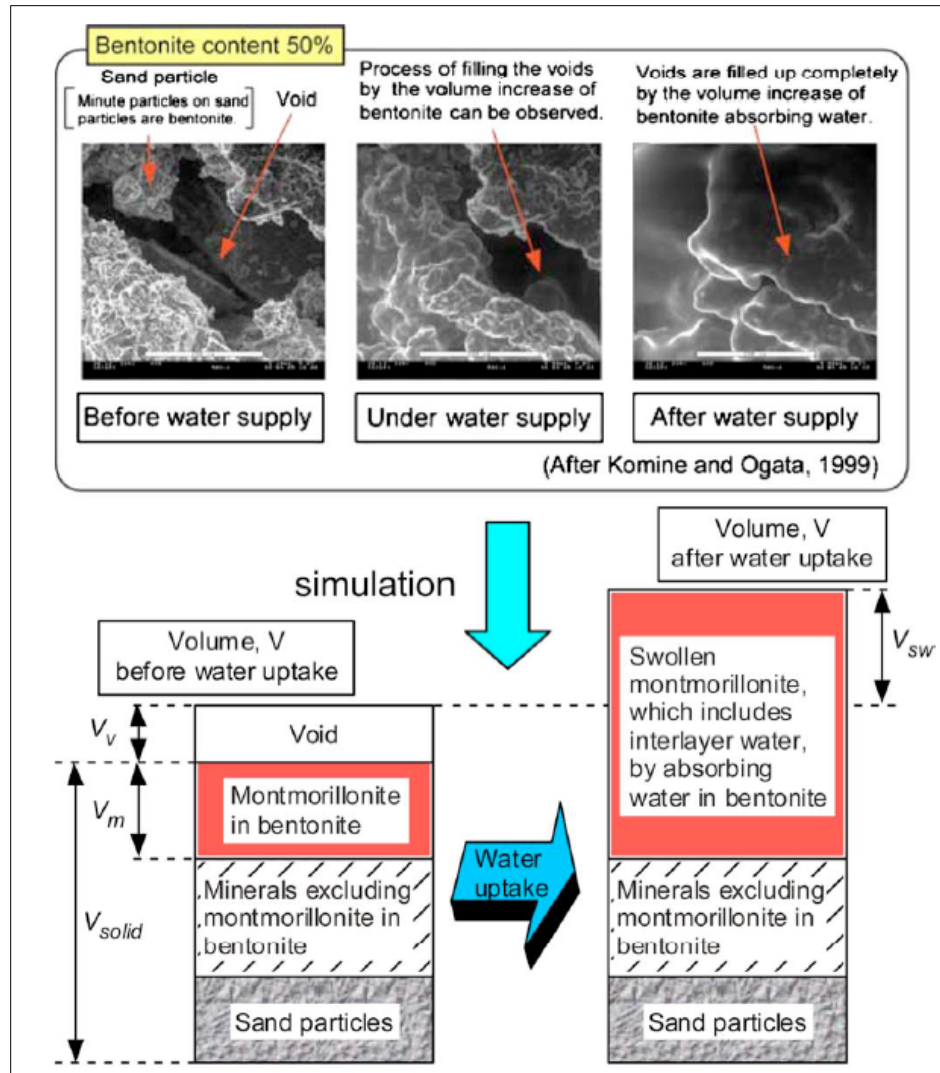


Figure 2.11 Changement du comportement du mélange sable-bentonite après l'ajout de l'eau (Komine and Ogata, 1999).

Des études faites par Komine et Ogata (1999) sur le comportement de gonflement de mélanges sable-bentonite à l'aide de microscope électronique à balayage montrent que l'ajout de 5% à 10% de bentonite dans un sol initialement sec entraîne une augmentation de volume liée à l'adsorption de l'eau (Figure 2.11). Toutefois, à ces teneurs en bentonite, l'augmentation de volume n'entraîne pas un remplissage total des vides du matériau de base même après un ajout de l'eau. Ensuite, l'ajout de 20% ou plus de bentonite entraîne une augmentation de volume ainsi qu'un remplissage total des pores est marqué.

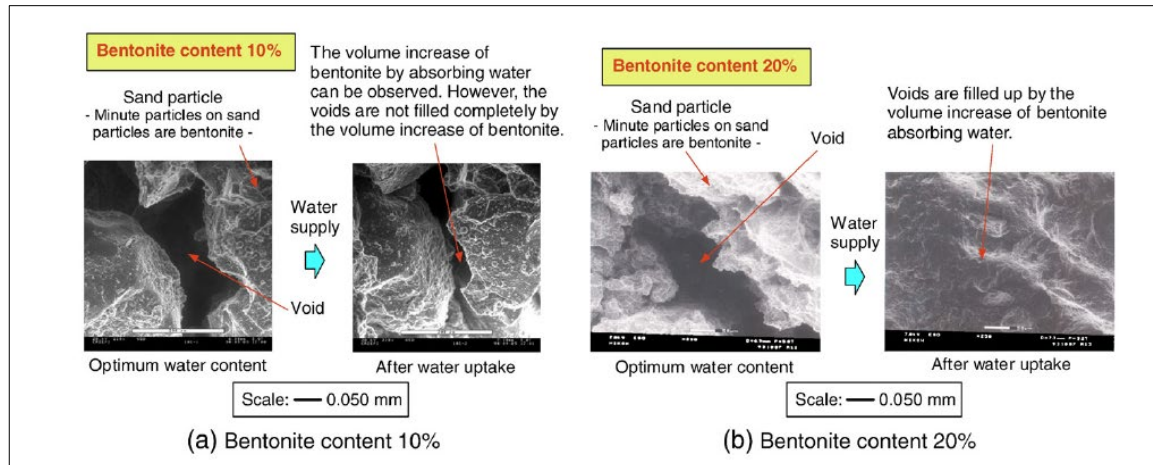


Figure 2.12 Observation de la structure interne de mélange sable-bentonite (d'après Komine et Ogata, 1999).

Komine et Ogata (2008) ont investigué les changements de  $k_{sat}$  avant et après gonflement et ils ont remarqué que la conductivité hydraulique saturée du mélange diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite (Komine et Ogata, 2008). Cependant, si les mélanges ne contiennent pas suffisamment de bentonite pour remplir tous les vides ou bien les bentonites dans les mélanges sont mal réparties, la conductivité hydraulique saturée du mélange augmente par les pores remplis d'eau dans la matrice de la bentonite (Kenny, 1992; Komine, 2008). Des conclusions similaires ont été obtenues par Chapuis (1990). La Figure 2.14 permet d'expliquer davantage la notion de porosité et les relations volumétriques pour différents cas a : cas d'un sol sec, b : un sol saturé, mais avec une teneur faible en bentonite et c : sol saturé avec une teneur optimale de la bentonite. Selon la teneur en bentonite dans le sol, on parle de l'eau libre et d'eau contrôlée (Figure 2.14). L'eau qui est absorbée par la bentonite ne sera plus disponible à l'écoulement lié à la porosité du sol. Dans ce cas, la mobilité des molécules d'eau est contrôlée par les propriétés de la bentonite d'où la notion de l'eau contrôlée (correspond au volume de gonflement). La conductivité hydraulique saturée du mélange est contrôlée par les propriétés de la bentonite. Cependant, dans certains cas, le pourcentage de la bentonite est insuffisant pour combler tous les pores et un certain nombre des vides reste disponible pour l'écoulement libre de l'eau. Dans ce cas, la conductivité hydraulique saturée du mélange est dictée par la capacité de l'eau libre à s'écouler (Chapuis, 1999b).



Chapuis (1990b) a défini également la notion de la porosité effective ( $n^*$ ) qui correspond au volume des vides disponible à l'écoulement libre de l'eau. La porosité totale des mélanges sol-bentonite comprend la porosité occupée par l'eau dans l'arrangement des particules de bentonite et la porosité interparticulaire (eau libre et/ou air). Cette porosité dépend du degré de saturation ( $S_r$ ), de la porosité totale ( $n$ ) et des volumes de bentonite et de solide ( $V_b$  et  $V_s$ ) (Chapuis, 1990b).

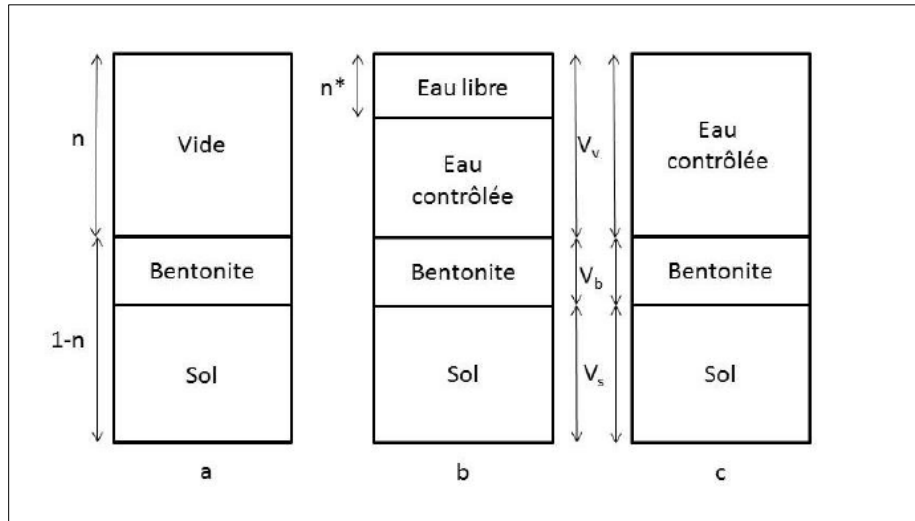


Figure 2.13 Porosité et relation volumétrique des mélanges sol-bentonite (tiré de Boulanger-Martel, 2015).

## 2.2 Conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite

La conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) et la courbe de rétention d'eau (CRE) sont les paramètres clés dans la conception des recouvrements miniers, surtout ceux qui visent à bloquer la diffusion d'oxygène et l'infiltration de l'eau ou même pour la conception des structures d'étanchéité. Cependant, cette étude de recherche se base davantage sur  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite utilisés comme matériaux à faible conductivité dans les structures d'entreposage et de confinement des rejets miniers.

Cette propriété hydrique décrit la capacité d'un sol saturé à laisser passer l'eau, elle dépend de plusieurs facteurs comme la granulométrie et la forme des grains, l'indice des vides, la tortuosité (Holtz et Kovacs, 1991) et aussi les propriétés du fluide (viscosité et densité) passant dans le milieu poreux (Aubertin et al. 1996). Il existe une relation entre  $k_{sat}$  et la perméabilité intrinsèque  $k$  (Fetter et Fetter Jr, 1999) qui est donnée comme suit :

$$k_{sat} = K \times \frac{\rho_w \times g}{\mu_w} \quad (2.1)$$

Où  $k_{sat}$  est la conductivité hydraulique saturée (m/s),  $k$  est la perméabilité intrinsèque du sol ( $m^2$ ),  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ ),  $\rho_w$  est la masse volumique de l'eau ( $kg/m^3$ ) et  $\mu_w$  est la viscosité dynamique de l'eau (en  $Kg/m \cdot s$  ou en  $Pa \cdot s$ ).

La valeur de  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite peut être mesurée au laboratoire par des perméamètres à paroi rigide (Chapuis, 1990; Chalermyanont et Arrykul, 2005; Renken, 2006; Tripathi et Viswanadham, 2012) ou à paroi flexible (Fernuik and Haug, 1990; Yanful et al., 1990; Wong and Haug, 1991; Sällfors and Öberg-Högsta, 2002) ou également par l'essai de la cellule œdométrique (e.g., Kenney et al., 1992; Sivapullaiah et al., 2000; Gueddoudda et al, 2010; Tripathi and Viswanadham, 2012; Demdoum et al., 2017). Dans la plupart des cas, ces essais sont réalisés à charge variable, mais peuvent aussi réaliser à charge constante. La durée de ces essais dépend essentiellement de la méthode utilisée: de 3 à 5 jours en utilisant la cellule triaxiale, de 10 à 15 jours en utilisant le perméamètre à paroi flexible (Chapuis, 1990) et de 10 à 20 jours en perméamètre à paroi rigide et en cellule œdométrique (Tripathi et Viswanadham, 2012). Le Tableau 2.3 représente quelques exemples des valeurs de la conductivité hydraulique saturée pour différents mélanges sol-bentonite telles que mesurées par différents équipements.

Tableau 2.3 Exemple des valeurs de la conductivité hydraulique pour des mélanges sol-bentonite (tiré de Boulanger Martel, 2015).

$k_{sat}$ en cm/s	USCS	% de bentonite	Type de perméamètre	Références
$4.8 \times 10^{-8}$ à $5.0 \times 10^{-7}$	GW	5.0-8.0	PF	Boulanger Martel et al (2016)
$4.0 \times 10^{-8}$ à $5.0 \times 10^{-9}$	GW	2.0-5.0	n. d	Vu et al (2014)
$9.0 \times 10^{-8}$ à $1.0 \times 10^{-9}$	MH-CH	20.0	Cellule œdométrique	Mishra et al. (2008)
$6.6 \times 10^{-8}$ à $1.2 \times 10^{-8}$	GW-SW	5.0	PF	Renken (2006)
$5.0 \times 10^{-9}$	SW	8.0	PF	Adu-Wusu et Yanful (2006)
$2.0 \times 10^{-8}$ à $1.0 \times 10^{-10}$	SP	5.0- 50.0	Cellule œdométrique	Komine (2004)
$4.5 \times 10^{-11}$ à $2.0 \times 10^{-10}$	GW	30.0	OR	Mata et Ledesma (2003)
$8.0 \times 10^{-4}$ à $7.0 \times 10^{-9}$	SM	2.0-10.0	PF/PR	Chapuis (2002)
$2.7 \times 10^{-6}$ à $5.2 \times 10^{-9}$	GW	10.0-30.0	PR/OR	Johannesson et al (1999)
$5.0 \times 10^{-7}$ à $1 \times 10^{-10}$	ML	10.0-80.0	Cellule œdométrique	Sivapullaiah et al. (2000)
$4.5 \times 10^{-8}$ à $7.5 \times 10^{-11}$	GW	10.0-30.0	PR/OR	Johannesson et al (1999)
$6.5 \times 10^{-9}$ à $1.4 \times 10^{-9}$	SP	8.0	PF	Haug et Wong (1992)
$9.0 \times 10^{-7}$ à $10^{-8}$	SP	5.0- 25.0	Paroi rigide	Tripathi et Viswanadham (2012)
$3.0 \times 10^{-8}$ à $8.6 \times 10^{-10}$	SP	4.5 à 25.0	PF/PR	Wong et Haug (1991)
$6.0 \times 10^{-6}$ à $3.0 \times 10^{-10}$	ML	20.0	n. d	Sivapullaiah et al (2000)
$5.0 \times 10^{-9}$	SW	8.0	PF	Adu-Wusu et Yanful (2006)
$1.0 \times 10^{-5}$ à $1.0 \times 10^{-8}$	ML	8.0	PF	Aubertin et al. (1999); Bussière (1999)
$10^{-5}$ à $10^{-7}$	SW	1.0-4.0	n. d	D'Appolonia (1980)

\* : Paroi flexible (PF), paroi rigide (PR), œdomètre Rowe (OR), Donnée non disponible (n.d).

## 2.2.1 Facteurs d'influence sur $k_{sat}$

La conductivité hydraulique saturée du mélange sol-bentonite est influencée par plusieurs paramètres. Dans la partie suivante, on développe les principaux facteurs d'influence sur  $k_{sat}$ .

### 2.2.1.1 Composition du mélange

La composition du mélange peut influencer  $k_{sat}$ . Jo et al. (2001) et Kolstad et al. (2004) ont montré que  $k_{sat}$  diminue en fonction de l'indice de gonflement de la bentonite qui lui-même dépend du pourcentage et du type de la bentonite (plus la teneur de bentonite est importante et du type sodique, plus le potentiel de gonflement est important). La Figure 2.14 montre également que l'augmentation du pourcentage de la bentonite permet d'améliorer l'étanchéité jusqu'à une valeur seuil à partir de laquelle la perméabilité ne diminue plus (Cavalcante Rocha, 1994 ; Didier et Cavalcante Rocha, 1996). Les mêmes conclusions sont obtenues par Chapuis (2002b) pour des mélanges sol-bentonite à des teneurs en bentonite entre 0-20.0 % faits de sable propre (- de 10% fines). D'après la Figure 2.15, on constate que pour des teneurs en bentonite inférieures à 5.0 %, la conductivité hydraulique reste constante entre  $10^{-2}$  cm/s et  $10^{-3}$  cm/s. Pour l'intervalle de 5.0% à 15.0% bentonite, la conductivité hydraulique diminue linéairement jusqu'à la conductivité hydraulique saturée minimale de l'ordre de  $10^{-9}$  cm/s et elle demeure constante à cette valeur quel que soit la teneur de bentonite, dans tel cas, la perméabilité du milieu est principalement contrôlée par la bentonite (Chapuis, 2002b). Boulanger-Martel et al (2016) ont travaillé également sur des mélanges du gravier-bentonite à des teneurs en bentonite différentes (5.0%,6.5% et 8.0%) où ils ont montré que plus la teneur en bentonite dans le mélange est élevée, plus la valeur de  $k_{sat}$  de mélange est faible. Sällfors and Öberg-Högsta (2002) mentionne, aussi, que c'est la proportion de bentonite dans les vides du matériau de base qui détermine sa conductivité hydraulique de la totalité du mélange.

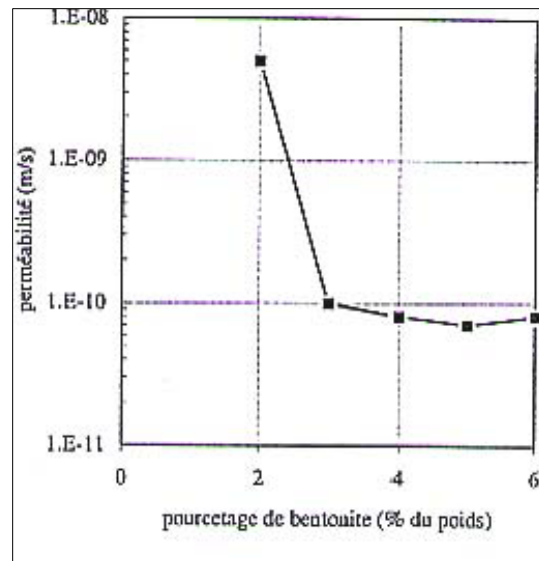


Figure 2.14 Relation entre la perméabilité et la bentonite ajoutée (Didier et Cavalcante Rocha, 1996).

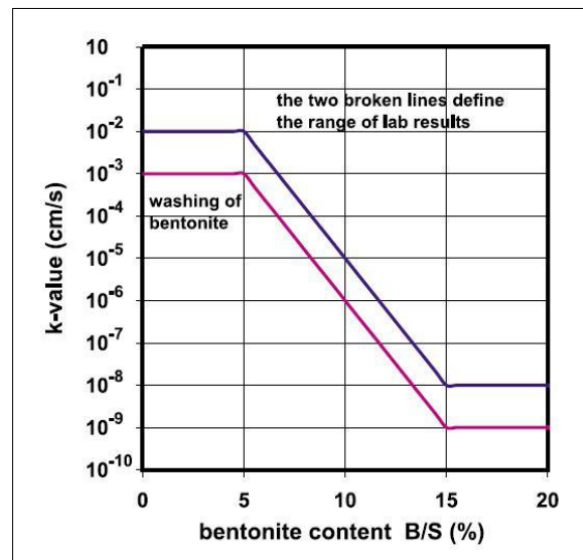


Figure 2.15 Plage de variation type de la conductivité hydraulique saturée pour plusieurs sables propres en fonction de la teneur en bentonite (Chapuis, 2002b).

### 2.2.1.2 Type de bentonite

Le type de la bentonite a aussi une grande influence sur  $k_{sat}$  du mélange sol-bentonite, la bentonite sodique diminue la valeur  $k_{sat}$  du mélange beaucoup mieux que la bentonite calcique. Olson and Daniel (1981) précisent que pour un même indice des vides, la

bentonite sodique est 1000 fois moins perméable qu'une bentonite calcique. Les bentonites calciques ont un potentiel de gonflement plus faible et nécessitent des pourcentages de bentonite plus élevés pour atteindre les mêmes objectifs des conductivités hydrauliques que les bentonites sodiques. Cela explique l'utilisation fréquente de la montmorillonite sodique dans les tapis d'étanchéité (e.g., Alston et al., 1997; Chalermyanont and Arrykul, 2005; Chapuis, 1990; Chapuis, 2002; Chapuis et al., 1992), dans les recouvrements miniers (Martel Boulanger, 2015) et dans l'encapsulation des déchets radioactifs (Jönsson et al., 2009; Push et al., 1990).

### **2.2.1.3 La granulométrie de matériau de base**

Plusieurs études montrent que, plus la granulométrie du matériau est grossière, plus la conductivité hydraulique saturée est élevée (Figure 2.16; Craig et al., 1994). Koerner and Daniel (1997) ont montré qu'un matériau de base avec une granulométrie plus étalée requiert une plus faible proportion de bentonite que les matériaux uniformes pour atteindre une même conductivité hydraulique saturée. La Figure 2.17 montre des valeurs de  $k_{sat}$  obtenues pour des mélanges avec des sables propres, des sables silteux et avec des silts sableux. Pour les sables propres, on remarque une diminution linéaire de la conductivité hydraulique du mélange avec l'augmentation de la teneur de bentonite et pour les matériaux plus fins, une diminution plus marquée de la conductivité hydraulique saturée du mélange. La valeur de  $k_{sat}$  se stabilise à  $10^{-8}$  cm/s pour les matériaux sableux et à  $5 \times 10^{-9}$  cm/s pour les matériaux plus fins (Chapuis, 2002b). Autrement dit, plus le sol a des particules fines, plus la conductivité hydraulique du mélange sera faible. Des résultats similaires ont aussi été obtenus tels que montrés par les travaux de Sivapullaiah et al. (2000) et Wong and Haug (1991).

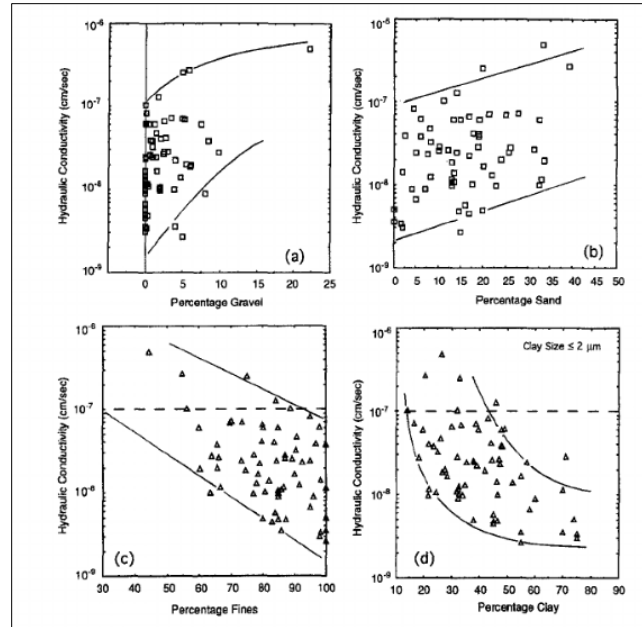


Figure 2.16 Évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la granulométrie du matériau : a ; gravier, b ; sable, c ; matériau fin, d; argile (Craig et al,1994).

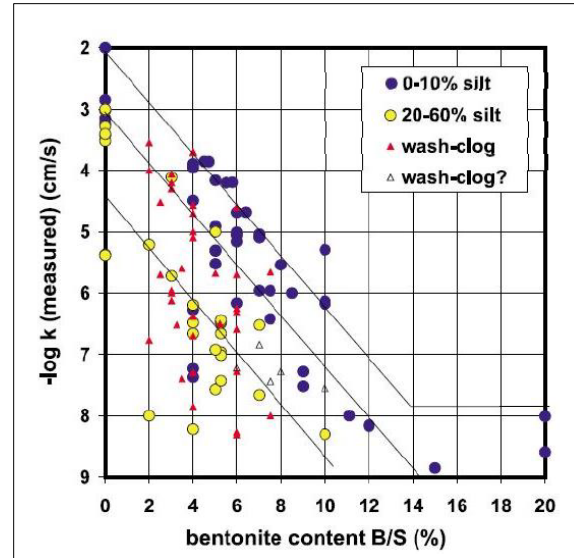


Figure 2.17 Plage de valeur de la conductivité hydraulique de différents mélanges sable bentonite (Chapuis, 2002b).

### 2.2.1.4 L'indice de vides de bentonite dans le mélange

L'indice des vides de la bentonite dans un mélange sol-bentonite est un des facteurs les plus importants contrôlant la conductivité hydraulique saturée du mélange. Il est montré que plus l'indice de vide de la bentonite dans le mélange est faible, plus la valeur de  $k_{sat}$  du mélange est faible. (Haug et Wong, 1992; Kenney et al., 1992). Également, Boulanger Martel et al.(2016) ont mentionné d'après les résultats obtenus que les valeurs de  $k_{sat}$  du mélange gravier-bentonite sont fortement liées aux indices de vides de la bentonite dans les mélanges.

### 2.2.1.5 Densité sèche

La  $k_{sat}$  du mélange sol-bentonite dépend aussi de la densité sèche du mélange global, mais surtout de celle de la bentonite. Dans la Figure 2.18 il est observé que  $k_{sat}$  du mélange sable-bentonite chute de deux ordres de grandeur lorsque la densité sèche augmente de  $1.4 \text{ Mg/m}^3$  à  $1.8 \text{ Mg/m}^3$ . La diminution de la conductivité hydraulique est attribuée à l'influence du gonflement, qui induit une réduction de la surface disponible pour l'écoulement (Cho et al., 2000).

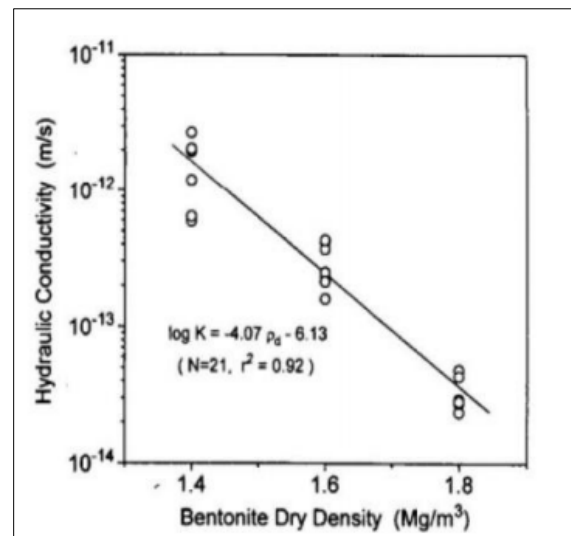


Figure 2.18 Conductivité hydraulique en fonction de la densité sèche de la bentonite (Cho et al., 2000).



### 2.2.1.6 Temps d'hydratation

La conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite dépend du temps d'hydratation de la bentonite.  $k_{sat}$  diminue considérablement en fonction du temps d'hydratation jusqu'à un certain seuil où  $k_{sat}$  se stabilise (Chapuis, 1990). Plusieurs études (e.g. Wong et Haug, 1991; Haug et Wong, 1992; Gleason et al., 1997; Tripathi et Viswanadham, 2012) ont montré que la durée de stabilisation de la conductivité hydraulique saturée en perméamètre à paroi flexible est de l'ordre 10 à 15 jours (Chapuis, 1990; Haug et Wong, 1992) et entre 10 à 20 jours en perméamètre à paroi rigide et en cellule œdométrique (Tripathi et Viswanadham, 2012). Chapuis (1990b) a estimé un temps d'hydratation de 3 à 7 jours pour les essais réalisés en cellule triaxiale et de 2 à 4 semaines pour l'hydratation de la bentonite du mélange dans le cas d'un perméamètre à paroi rigide (Chapuis, 1990b). Des études montrent qu'avec l'augmentation de la teneur en bentonite, le temps d'hydratation augmente ce qui diminue la conductivité globale du mélange (Chapuis, 1990).

### 2.2.1.7 Composition chimique du fluide

La conductivité hydraulique saturée de la bentonite peut augmenter jusqu'à trois ordres de grandeur dans l'eau salée que dans l'eau fraîche (Kenney et al., 1992). La Figure 2.19 montre l'évolution de la conductivité hydraulique de la bentonite en fonction de la concentration en sels dans l'eau de mouillage et de l'indice des vides, on conclure que pour un même indice de vide, la conductivité hydraulique augmente avec la concentration des sels en solution. Ainsi, une augmentation de  $k_{sat}$  dans le cas où le DMA est considéré comme le fluide. Kashir et Yanful (2001) ont mesuré  $k_{sat}$  à l'eau fraîche et au DMA, ils ont trouvé que la conductivité hydraulique saturée à l'eau fraîche de la bentonite seule est de l'ordre de  $2.0 \times 10^{-9}$  cm/s tandis qu'avec le DMA,  $k_{sat}$  est de l'ordre de  $1.5 \times 10^{-7}$  cm/s pour un échantillon non confiné après la circulation d'approximativement 23 fois le volume des pores. En se basant également sur les résultats des travaux de chevé et al (2018) sur des géocomposites bentonitiques GCB, on constate que, sous des faibles pressions de confinement, la conductivité hydraulique saturée des échantillons de GCB hydratés au drainage minier acide synthétique (DMAS) était d'environ  $10^{-8}$  cm/s, soit un ordre de grandeur de moins que celle d'échantillons hydratés à l'eau désionisée.

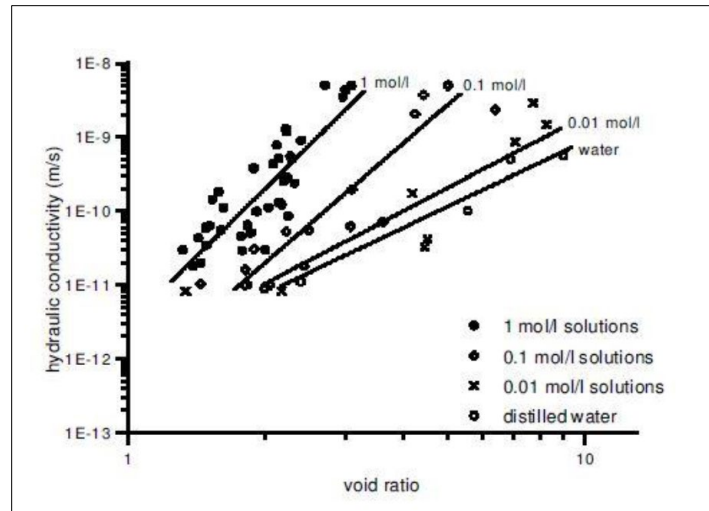


Figure 2.19 Évolution de la conductivité hydraulique de la bentonite en fonction de la concentration en sels dans l'eau de mouillage et de l'indice des vides (Studds et al., 1998).

### 2.2.1.8 Influence des cycles gel-dégel

Dans certaines conditions climatiques comme celles des régions froides, les cycles de gel-dégel peuvent venir influencer énormément les propriétés des sols fins, notamment en modifiant leurs textures et structures. Par conséquent, certaines propriétés hydrauliques du sol telles que la conductivité hydraulique saturée et la capacité de rétention d'eau de ces matériaux peuvent être affectées avec le temps. Boulanger Martel et al. (2016) ont contrôlé l'évolution de la conductivité hydraulique saturée de mélanges gravier-bentonite en fonction de cycles de gel-dégel. Cette étude a montré que  $k_{sat}$  d'un mélange à 6.5% de bentonite augmente d'un ordre de grandeur après un seul cycle de gel-dégel et significativement après 3 à 5 cycles pour une valeur de 735 fois de sa valeur initiale (Boulanger Martel et al., 2016). Cependant, Wong et Haug (1991) ont montré une diminution de la conductivité hydraulique saturée d'un mélange fait du sable d'Ottawa et de 4.5 à 25.0 % et de Na-bentonite après cinq cycles de gel-dégel et une diminution aussi avec l'augmentation de temps d'essai (Figure 2.20). Ces auteurs ont suggéré que le comportement d'un mélange sable-bentonite après plusieurs cycles de gel-dégel est semblable à celui d'un échantillon intact sans cycles de gel-dégel et à long terme puisque les échantillons soumis au gel et au dégel semblent rejoindre le comportement de la

conductivité hydraulique saturée versus temps du mélange avant son gel (Wong et Haug, 1991). D'autres études ont montré que le mélange sol bentonite n'est pas influencé par les cycles de gel-dégel (Kraus et al,1997 ; Aubertin et al, 1999 ; Bussière, 1999). La variation de la composition et de la granulométrie de la bentonite et du matériau de base influence la texture et la structure du mélange sol-bentonite sous l'action du cycle gel-dégel, ce qui explique les différentes valeurs de  $k_{sat}$  obtenues pour les différents mélanges sol-bentonite testés. Également, peu d'études ont été réalisées sur les mélanges gravier-bentonite, le comportement et la réponse de ces mélanges face aux phénomènes du gel-dégel jusqu'à maintenant n'ont pas clairs.

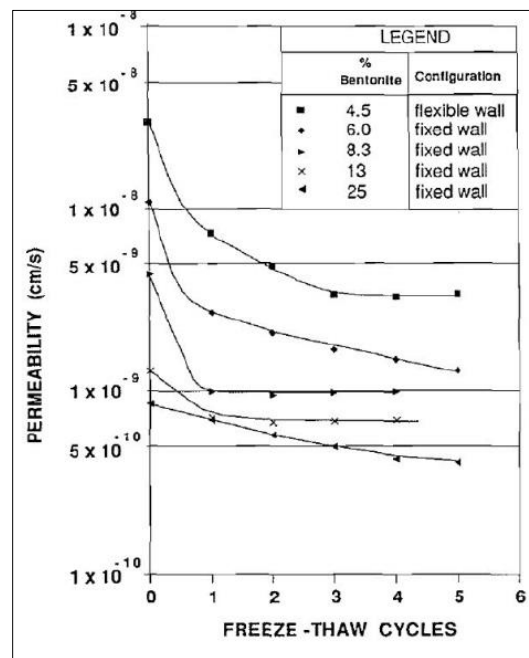


Figure 2.20 Évolution de la perméabilité en fonction des cycles de gel-dégel (Wong and Haug, 1991).

### 2.2.2 Prédiction de $k_{sat}$

Pendant les phases préliminaires de conception, il est fréquent de faire appel à des modèles d'estimation pour obtenir des valeurs de  $k_{sat}$ . Ces modèles permettent d'obtenir rapidement des valeurs de  $k_{sat}$ . Bien qu'il existe plusieurs modèles de prédiction de  $k_{sat}$  (Hazen, 1911; Kozeny, 1927; Carman, 1937;1956), un nombre limité d'études ont été développées pour estimer les  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite. Chapuis (1990) a développé des équations

empiriques pour prédire le  $k_{sat}$  de mélanges sable-bentonite en utilisant des paramètres simples tels que la teneur en bentonite, la porosité et le degré de saturation de sable. Sivapullai et al. (2000) ont proposé quatre équations différentes pour estimer les  $k_{sat}$  des mélanges sable-bentonite et silt-bentonite. Tripathi (2013) a développé un autre modèle pour prédire le  $k_{sat}$  des mélanges sable-bentonite saturés inspiré des travaux de Kenney et al. (1992), ce modèle tient compte du rapport des vides de gonflement libre de la bentonite et du rapport des vides de la bentonite dans le mélange. Ces modèles prédictifs ont été spécifiquement développés et appliqués pour les mélanges sable-bentonite (Chapuis 1990; Tripathi 2013; Sivapullaiah, 2000) et pour les mélanges du silt-bentonite (Sivapullaiah, 2000). Cependant, aucun modèle prédictif n'a été développé pour les mélanges gravier-bentonite.

### **2.3 Utilisation des mélanges sol-bentonite en environnement minier**

Le potentiel d'utilisation des mélange sol-bentonite à titre de matériaux de construction des digues et recouvrement miniers a été avancé en introduction. Cette section vise à présenter quelques exemples d'utilisation des mélanges sol-bentonite en restauration minière. Le Tableau 2.4 présente un résumé de certains recouvrements miniers construits avec des mélanges sol-bentonite.

Tableau 2.4 Sommaire des recouvrements miniers constitués de mélanges sol-bentonite (tiré de Boulanger Martel, 2015).

Site	Type	Matériaux	Rejets	Détails	Références
ITEC Mineral, Québec, Canada	Couverture avec effet de barrière capillaire	Résidu +bentonite	Résidu	Cellule expérimentale du terrain + essai de laboratoire	Aubertin et al., (1997)
Whistle mine, Ontario, Canada	Recouvrement imperméable (barrière à l'eau)	Sable+ 8.0% bentonite	Stérile	Cellule expérimentale du terrain + essai de laboratoire et modélisation numérique	Adu-Wusu, (2005); Adu-Wusu et Yanful, (2006), (2007); Song et Yanful, (2008)
Raglan Québec, Canada	Couverture isolante avec effet de barrière capillaire CIEBC	Gravier+ 6.5% bentonite	Résidu	Cellule expérimentale du terrain + essais de laboratoire	Boulanger-Martel (2015); Boulanger-Martel et al. (2016)
Myra Falls Operations, Colombie-Britannique, Canada	Barrière à l'eau et à l'oxygéné	Sable + 8.0% bentonite	Stérile	Cellule expérimentale de terrain en pente (5:1)	(Adu-Wusu, 2005; Adu-Wusu et Yanful, 2006, 2007; Song et Yanful, 2008)

### ITEC Minerals

Des travaux de laboratoires et du terrain ont été réalisés pour évaluer le comportement des couvertures avec effet de barrière capillaire. Parmi les configurations testées, on retrouve une CEBC composée d'une CRH des résidus miniers amendés de bentonite (Aubertin et al., 1995, 1997, 1999). L'essai en colonnes, étalé sur vingt mois et instrumenté, a permis de confirmer l'efficacité du système (Aubertin et al., 1997, 1999). Il est que la couche de résidu amendé présentait un degré de saturation élevé, tandis que la couche sous-jacente de résidu non amendé ne l'était pas. Ces deux couches ont créé deux niveaux d'effets

capillaires, mais cette structure s'est avérée peu bénéfique pour la performance en colonne de la couverture (Aubertin et al., 1999). Le suivi de la teneur en eau, de la succion et de la chimie au niveau des cellules expérimentales testées sur terrain a montré que seule la cellule constituée de matériaux miniers amendés de bentonite a eu la moins bonne efficacité (Aubertin et al., 1999). L'analyse géochimique a montré également que l'eau de percolation a atteint des valeurs de pH inférieures à 5 après 4 ans de suivi, par rapport à des valeurs proches de la neutralité pour les autres configurations de couverture testées (Aubertin et al., 1999).

### Mine Raglan

Quatre cellules expérimentales ont été construites sur le site Raglan avec différents scénarios de restauration (Laroche et al. 2021). Dans cet exemple, on traite le cas d'une cellule expérimentale qui représente une couverture isolante avec effet de barrière capillaire dont la CRH est formée par un mélange gravier-bentonite à 6.5% de bentonite (Boulanger-Martel et al., 2016). Le recouvrement a épaisseur totale de 1.9 m et est configuré du bas vers le haut d'une couche de support de 0.4 m faite de matériau concassé (0-20 mm) qui est directement placée sur le résidu, d'une couche de rétention d'humidité de 0.6 m d'épaisseur faite de gravier concassé de type 0-20 mm amendé de bentonite et une couche de protection de 1m faite de matériaux concassés de granulométrie inférieure à 600 mm. Plus des détails sur la configuration et l'instrumentation de la cellule expérimentale sont présentés dans Boulanger-Martel (2015). Inspiré de la cellule expérimentale de Raglan, Boulanger-Martel et al. (2014) ont caractérisé les propriétés thermohydrauliques de mélanges gravier bentonite à 5.0, 6.5 et 8.0% bentonite. Ces caractérisations montrent que les mélanges gravier-bentonite testés présentent les propriétés hydrogéologiques requises pour être utilisées comme CRH d'une CEBC. Des conductivités hydrauliques entre  $3.5 \times 10^{-7}$  cm/s et  $4.8 \times 10^{-8}$  cm/s et des valeurs d'entrée d'air entre 8 kPa et 20 kPa ont été obtenues pour ces mélanges. Cependant, l'évaluation de l'influence du cycle de gel-dégel montre une augmentation significative de la conductivité hydraulique, une diminution de la capacité de rétention d'eau et une augmentation du coefficient de diffusion de l'oxygène effectif, ce qui diminue l'efficacité de CEBC (Boulanger-Martel et al. 2016). Boulanger-Martel et al. (2016) ont suggéré une

optimisation du mélange en termes du type et de teneur en bentonite ainsi qu'en termes de granulométrie du gravier afin d'améliorer l'efficacité de la couche de rétention d'humidité.

### Whistle Min

Trois recouvrements de faible conductivité hydraulique ont été testés à l'aide de cellules expérimentales sur le site Whistle Mine près de Capreol, Ontario. Chaque cellule était composée d'une couche de protection (sable graveleux non compacté) de 0.9 m qui recouvre une couche de faible conductivité hydraulique. Une des configurations testées est composée d'un mélange sable-bentonite à 8.0 % de bentonite et d'une épaisseur de 0.46 m. La deuxième est construite par des silt sableux avec 5.0 % d'argiles et la dernière représente un géocomposite bentonitique d'une épaisseur de 0.008 m (Adu-Wusu, 2005; Adu-Wusu et Yanful, 2006, 2007; Song et Yanful, 2008). Après un suivi de 4 ans, le recouvrement fait par le mélange sable-bentonite montre une infiltration de l'ordre de 20% des précipitations totales (Adu-Wusu et Yanful, 2007), la géocomposite présente une infiltration à travers le recouvrement de 7.0% et le silt sableux montre une infiltration de 60.0%. La couverture faite de mélange sable-bentonite a montré une bonne qualité d'eau de percolation avec un pH supérieur à 7 et des concentrations en ions métalliques réduits (Adu-Wusu, 2005) et une bonne capacité à limiter la diffusion de l'oxygène aux stériles sous-jacents (Adu-Wusu et Yanful, 2006). La modélisation numérique a montré que le flux d'oxygène est faible si la zone était bien saturée. Cependant, le suivi de la cellule du terrain durant 3 ans a montré que la couche de sable-bentonite montre des degrés de saturation inférieurs à 90.0% (de l'ordre de 65.0%), ce qui ne limite pas adéquatement la diffusion de l'oxygène. Aussi, la courbe de rétention de ce mélange obtenue lors de travaux de laboratoire n'est pas représentative des conditions du terrain (Adu-Wusu et Yanful, 2006). Adu-Wusu et Yanful (2007) expliquent cette perte de performance après 3 ans de suivi par la ségrégation de la bentonite.

### Myra fall

Quatre cellules expérimentales ont été construites une surface inclinée de stériles sur le site de Myra Falls de Boliden Westmin (Canada) afin d'évaluer la performance hydraulique de divers systèmes de recouvrement. Ces recouvrements testés ont été conçus pour contrôler l'oxygène et l'infiltration de l'eau dans les stériles (O'Kane et al., 2001; Ayres et al., 2003).

La première cellule était composée d'une surface de stérile nue (cellule témoin) et la deuxième est composée de till compacté indigène placé directement sur les stériles, recouverte de till non compacté. Une cellule est formée par une couche de till avec des cendres volantes et la dernière est composée du till avec 8.0% de la bentonite afin d'améliorer la rétention d'humidité et réduire la perméabilité. Un système de suivi et contrôle a été installé dans chaque cellule afin d'évaluer la percolation nette et l'entrée d'oxygène dans les stériles.

Après un suivi de 4 ans, les résultats montrent que le système de couverture de till compacté/bentonite a permis de réduire l'infiltration des eaux météoriques (la percolation de l'eau météorique entre 2.3 et 4.0 % des précipitations totales) et la diffusion de l'oxygène dans le rejet minier.

## **2.4 Besoin en recherche**

Les matériaux fins sont beaucoup utilisés dans la construction des structures d'entreposage et de confinements des rejets miniers, cependant, ces matériaux ne sont pas toujours disponibles à proximité du site minier et cela peut imposer une contrainte à la construction et la rendre plus difficile et plus coûteuse. L'utilisation des mélanges sol bentonite comme matériaux de construction à faible conductivité hydraulique s'avère une solution intéressante surtout lorsque les matériaux fins ne sont pas disponibles. La revue de littérature met en évidence que les mélanges sol-bentonite ont des propriétés hydriques intéressantes pour être utilisés dans différentes voies en environnement minier (ex : la construction des digues de confinement du résidu et des recouvrements miniers). La revue de littérature a aussi montré que certaines propriétés hydrogéologiques telles que la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite peuvent être influencées par le gel-dégel, ce qui diminue la performance des ouvrages miniers.

D'un autre côté, il est mentionné, dans les parties précédentes, que les essais de perméabilité au laboratoire sur des mélanges sol-bentonite prennent du temps de 3 à 5 jours en utilisant la cellule triaxiale et 10 à 15 jours en utilisant le perméamètre à paroi flexible. Également, il n'est pas facile de contrôler certains paramètres, tels que la durée d'hydratation, le degré de saturation et le gonflement sous une faible pression de confinement durant l'essai. Dans ce cadre, deux besoins de recherche concernant



l'utilisation du mélange sol-bentonite en restauration minière sont cités. Le premier est d'améliorer certaines propriétés hydrogéologiques des mélanges du sol-bentonite en termes du comportement du mélange (type et teneur en bentonite et granulométrie du sol) et en termes d'influence du cycle gel-dégel et de statuer sur le potentiel d'utilisation de ces mélanges en restauration minière. Le deuxième besoin est de développer un modèle prédictif de la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite. Ce projet vise à combler partiellement ces besoins en recherche.

## CHAPITRE 3    ARTICLE 1: MEASUREMENTS AND PREDICTION OF SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOIL- BENTONITE MIXTURES

Yosra Hfaiedh, Vincent Boulanger-Martel and Bruno Bussière

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Research Institute on Mines and the Environment, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

The article was submitted on 22 November 2023 in Geotechnical and Geological journal

L'objectif de ce chapitre est de répondre aux deux objectifs spécifiques 1 et 2 du mémoire. Ces objectifs sont les suivants, premièrement, caractériser les propriétés physiques, géotechniques et hydrogéologiques des mélanges gravier-, sable- et résidus-bentonite, ainsi que de leurs constituants et deuxièmement, adapter un modèle de prédiction de la conductivité hydraulique saturée aux mélanges sol-bentonites, en vue de leur utilisation dans la restauration minière.

### ABSTRACT

One of the key hydraulic properties required for the design of waste confinement structures is the saturated hydraulic conductivity ( $k_{\text{sat}}$ ). Soil-bentonite mixtures are an interesting alternative to natural fine-grained soils for the construction of waste confinement structures. The  $k_{\text{sat}}$  of those mixtures depends primarily on the properties of the bentonite as well as those of the base material. During the early design stages, it is advisable to estimate the  $k_{\text{sat}}$  using predictive models. These models can serve as valuable tools to assist designers in optimizing the hydraulic properties of such materials efficiently, rapidly, and cost effectively. In this study, several permeability tests were performed to assess the effects of bentonite type, bentonite content and grain-size distribution on the  $k_{\text{sat}}$  of crushed rock-, sand- and tailings-bentonite mixtures. Experimental results have shown that the tested soil-bentonite mixtures with higher bentonite contents and higher uniformity coefficients generally resulted in lower measured  $k_{\text{sat}}$ . Then, the ability of several existing predictive models to compute the  $k_{\text{sat}}$  of the tested mixtures has been tested. The tested

models have been found to underestimate  $k_{\text{sat}}$  by one to five orders of magnitude. To overcome these inadequacies, this study proposes modifications to the Kozeny-Carman Modified model to better account for the properties of the solid matrix and the flow-controlling pore space occupied by bentonite. The developed models now provide a useful tool for optimizing the hydraulic properties of soil-bentonite mixtures, ranging from silty to gravelly materials.

**KEY WORDS:** Saturated Hydraulic Conductivity, Soil Bentonite Mixture, Engineered Soil Covers, Hydraulic Barrier.

### **3.1 Introduction**

Soil-bentonite mixtures have been used widely as impervious construction materials for water retention infrastructures and confinement structures for the safe storage of municipal wastes and other hazardous materials. These mixtures represent a practical alternative to fine-grained soils in the design and construction of structures such as liners and covers for municipal landfills (e.g. Chapuis et al. 1992; Weeks et al. 1992; Alston et al. 1997; Tripathy 2006), buffer material for underground storage of radioactive wastes (e.g. Mata et al. 2005; Alonso et al. 2008; Pusch 2008) as well as tailings dams and engineered covers for mine wastes (e.g., Aubertin et al. 1997; 1999; Ayres et al. 2003; Adu-Wusu and Yanful 2006; Renken 2006). A combination of sand (e.g., Chapuis 1990; 2002; Kenney et al., 1992; Guo et al. 2010), crushed rock (e.g., Börgesson et al., 2003; Mata et al., 2005; Villar, 2006; Boulanger-Martel et al. 2016), natural silts (e.g., Sivapullaiah et al. 2000; Mishra et al. 2008; Heineck et al. 2010) or mine tailings (e.g., Aubertin et al. 1997; 1999; Yanful et al. 2009) can be mixed with bentonite to enhance the hydraulic characteristics of the resulting mixture.

The  $k_{\text{sat}}$  of soil-bentonite mixtures depends on various factors such as the grain-size distribution of the base material, the shape and angularity of the particles, the void ratio of the bentonite within the mixture, the free swell index of the bentonite, the tortuosity of the resulting porous media (e.g., Chapuis 1990; 2002; Kenney 1992; Tripathi, 2013) as well as the properties of the permeate (i.e., viscosity, density and chemistry) passing through the porous medium (Child et al 1950; Bear 1987; Mitchell, 1993; Aubertin et al. 1996).

The process of designing and optimizing soil-bentonite mixtures for use in confinement structures begins with a comprehensive analysis of the specific requirements and environmental conditions of the site. The  $k_{\text{sat}}$  permeability of mixture is the most important factor that must be considered. Engineers and geotechnical experts then determine the ideal ratio of bentonite to soil, striving to strike a balance between achieving low permeability to prevent fluid migration, maintaining sufficient structural stability and achieving a reasonable construction cost. Laboratory testing is a crucial step in this process for the selection of mixtures. However, performing extended laboratory permeability tests on such mixtures is time-consuming and can be challenging to achieve. Permeability tests can typically take up to 10 to 15 days using the flexible wall permeameter (Chapuis, 1990). In addition, several test parameters, such as the hydration, degree of saturation, and swelling of the bentonite are complex to control, especially under low confining pressure (Chapuis, 1990). In this regard, predictive  $k_{\text{sat}}$  models can be useful tools to help designers to optimize the hydraulic properties of such materials, especially in early design stages. While several prediction models for  $k_{\text{sat}}$  exist (e.g., Hazen, 1911; Kozeny, 1927; Carman, 1956, 1937), only a limited number of studies focussed on the  $k_{\text{sat}}$  of soil-bentonite mixtures. For example, Chapuis (1990), Sivapullaih et al. (2000), and Tripathi (2013) developed empirical equations to predict the  $k_{\text{sat}}$  of sand-bentonite mixtures. The models differ by the parameters used in the equations (bentonite content, porosity, degree of saturation of the sand, liquid limit of the mixture, free swell void ratio of the bentonite and the void ratio of bentonite). These predictive models were specifically developed and applied for sand-bentonite (Chapuis 1990; Tripathi 2013; Sivapullaiah, 2000) and silt-bentonite mixtures (Sivapullaih, 2000).

For remote construction sites, the availability of fine-grained construction materials is often a limiting factor. This is commonly the case of arctic mining operations, which usually require fine-grained materials to construct their mine waste confinement structures and reclamation cover systems (e.g., Boulanger-Martel et al. 2016, 2021; Bussière and Guittonny 2020). Although soil-bentonite mixtures haven't been used widely for mine waste confinement applications, they offer an interesting alternative to natural fine-grained materials (Boulanger-Martel et al. 2016). Crushed rock-bentonite mixtures represent another interesting option to natural fine-grained soils especially in regions where even

sand is not available in large quantity. Some mining operations also generate non-reactive / non-metal leaching mine tailings that could be valorized as construction materials in tailings-bentonite mixtures (Aubertin et al, 1999).

In that perspective, the main objective of this study is to measure the saturated hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures and to use these results to modify a predictive model. This article first presents the laboratory permeability tests results performed on tailings-, sand- and crushed rock-bentonite mixtures. Then, the performance of selected existing  $k_{\text{sat}}$  prediction models to represent laboratory results is evaluated. Finally, modifications to the Modified Kozeny-Carman (Mbonimpa et al. 2002)  $k_{\text{sat}}$  model are proposed and discussed to predict the  $k_{\text{sat}}$  of several potential soil-bentonite mixtures, from crushed rocks to mine tailings (silty materials). Because previous studies mainly focussed on predicting the  $k_{\text{sat}}$  of sand-bentonite (and marginally silt-bentonite) mixtures, their application can be limited. Therefore, one significant contribution of this article is to provide a more general  $k_{\text{sat}}$  predictive model that can be used for a wider range of soil than the existing ones.

## **3.2 Materials and Methods**

### **3.2.1 Materials**

Three types of soils were tested in this study: crushed rock-, sand-, and tailing-bentonite mixtures. Crushed rock-bentonite mixtures were made from two different crushed rocks. The first crushed rock, referred as CR1 herein, originated from an active mine site and is currently used as construction and maintenance material for the mine's transport infrastructures and reclamation cover system. Materials were manually homogenized, oven dried and re-separated into 15 subsamples. A commercially available crushed rock, referred as CR2 herein, had also been used as a constituent of some of the tested mixtures. The Big Horn® 200 (referred as B1 herein) and Premium gel (referred as B2 herein) commercially available powdered Wyoming sodium bentonites, from Wyo-Ben and the American Colloid Company, respectively, were used as constituents of the crushed rock-bentonite mixtures. The tailing-bentonite mixtures were composed of mine tailings from a hard rock mine in the Abitibi Region (Quebec, Canada) and Big Horn® 200 bentonite. The tailings,

referred as T herein, were also oven dried and manually homogenized prior to testing. Sand-bentonite mixtures were composed of Ottawa sand 20-30 (referred as S herein) and Big Horn® 200 bentonite. The tested soil-bentonite mixtures were prepared at bentonite contents varying from 5.0 to 9.0% by weight. Such bentonite contents fall within the practical range for waste containment structures (Chapuis 2002). The selected bentonite contents are sufficiently high to prevent flow-induced washing of the bentonite while remaining within the optimal range for controlling water seepage (Chapuis 2002; Hfaiedh et al. 2023). Each soil-bentonite sample was prepared by mixing the dry base material with the right amount of dry bentonite. Then, water was added to the mix to reach a gravimetric water content corresponding to a degree of saturation of at least 90% after compaction. The mixtures were then manually homogenized. A curing time of at least 48 hours was allowed for bentonite hydration before a given permeability test was initiated (Chapuis, 1990). The liquid used for wetting, hydration, saturation, and permeation of the samples was tap water from the city of Rouyn-Noranda (Quebec, Canada).

### **3.2.2 Basic geotechnical properties**

Before starting permeability tests, several techniques have been used to characterize the basic physical and geotechnical properties of the materials. The grain size distributions (GSDs) of the bentonites and the tested tailings were determined using laser diffraction techniques (with a Mastersizer S analyzer from Malvern Instruments) in air (Merkus 2009). GSDs of sand and crushed rocks were obtained by mechanical sieving for the particle sizes larger than 80  $\mu\text{m}$  (ASTM D422; ASTM 2007). Laser diffraction was used for the particles smaller than 80  $\mu\text{m}$ . The specific gravity ( $G_s$ ) of all materials was measured using ASTM standard D5550-14 (ASTM 2014). The free swell void ratio of the bentonites was determined by using the method described in standard ASTM D5890-19 (ASTM 2019). Plastic index (PI) of the bentonites were obtained by determining the liquid limit (LL) and plasticity limit (PL) as described by ASTM D4318 (ASTM 2017). The liquid limit was assessed with a cone penetrometer using standard method A of ASTM D4318 (ASTM 2017). The mineralogical composition of bentonites B1 and B2 was determined by powder X-ray diffraction (PXRD) analyses. PXRD patterns were acquired at the Canadian Light Source (CLS) using the Canadian Macromolecular Crystallography Facility Bend Magnet

Beamline (CMCF-BM or 08B1-1), as described by Fodje et al. (2014). PXRD data were collected, calibrated and integrated using the method of Reid (2023). Semi-quantitative phase analyses were performed with the reference-intensity ratio (RIR) method (Hubbard and Snyder 1998).

### 3.2.3 Permeability tests

Most  $k_{\text{sat}}$  tests were performed in flexible wall permeameters following test method B of ASTM D5084 (ASTM 2010) for CR1-B1, CR1-B2, CR2-B1, S-B1 and T-B1 mixtures as well as the tailings alone. Additional constant head permeability tests were also performed using ASTM D2434-22 (ASTM 2022) to determine the  $k_{\text{sat}}$  of the crushed rock and sand alone. All soil-bentonite test specimens were prepared from cured mixtures. Compaction was achieved with a Proctor hammer with the energy required to reach a targeted porosity of 0.25, 0.3 and 0.35 for the crushed-rock-, sand- and tailings-bentonite mixtures based on the results of the Proctor optimum, respectively. Saturation of the specimens was performed by circulating deaired water from bottom to top using a low hydraulic gradient. Permeation was conducted for 240 to 360 hours at a back pressure of 25 kPa. Permeability tests were performed every 24 to 48 hours to track changes in  $k_{\text{sat}}$  associated with saturation and hydration processes. Saturation and hydration were considered achieved when three successive  $k_{\text{sat}}$  values were stabilized within 1% of each other.  $k_{\text{sat}}$  was then determined by performing three permeability tests at hydraulic gradients of about 20, 30 and 40. Several permeability tests were performed on crushed rock CR1-, crushed rock CR2-, sand- and tailings-bentonite mixtures at bentonite content of 5.0, 7.0 and 9.0% to assess the influence of the base material and bentonite content on  $k_{\text{sat}}$  (Figure 3.1). Additional permeability tests were performed at 6.5 and 8.0% as a part of initial laboratory characterizations of the CR1-B1 mixture (based on the work of Boulanger-Martel et al. 2016) and were included as a part of this study. Tests were also performed on a CR1-B2 mixture at 6.5% bentonite. The effect of bentonite type was assessed based on the  $k_{\text{sat}}$  values obtained for mixtures made of CR1-B1 and CR1-B2 at 6.5% bentonite as well as those obtained by Boulanger Martel et al. (2016) for a bentonite (referred as CR1-B3 herein) mixture at 6.5% bentonite (Figure 3.1). The bentonite used by Boulanger-Martel et al. (2016) was a sodium powdered bentonite from PDSCo Grout. Additional permeability tests were performed on CR2-B1

mixtures at 5.0, 7.0 and 9.0% bentonite. Results obtained for CR1-B1 and CR2-B1 at the same bentonite contents were analyzed to highlight the impact of the crushed rock's GSD on  $k_{sat}$  (Figure 3.1). Ottawa sand-bentonite mixtures were also selected to assess the capacity of uniform base materials to be used in soil-bentonite mixtures and evaluate the capacity of prediction models to compute the  $k_{sat}$  of such materials.

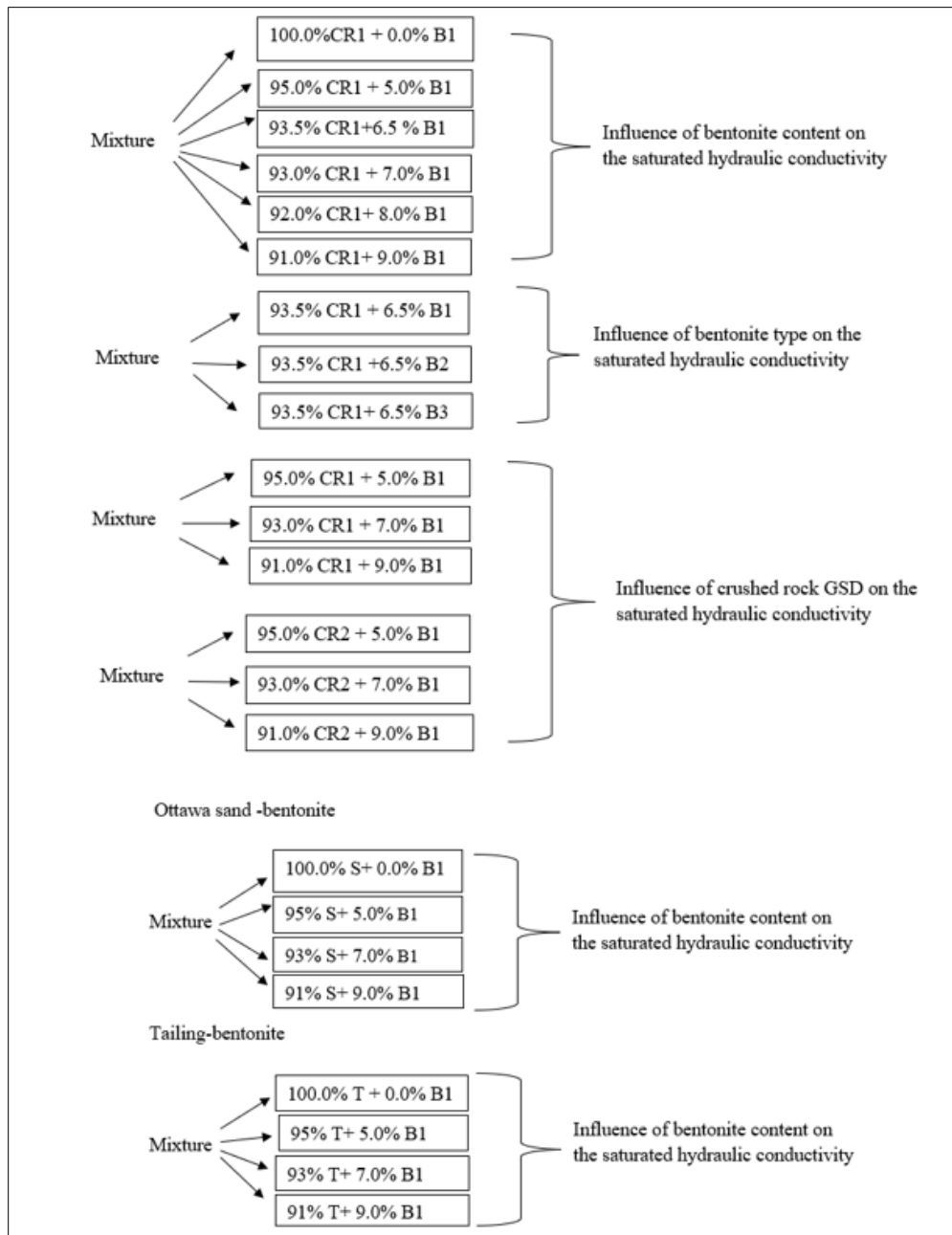




Figure 3.1: Test matrix used to assess the influence of the type of base materials, bentonite content and bentonite type on  $k_{sat}$ .

### 3.2.4 Prediction of saturated hydraulic conductivity

The ability of three existing models specifically designed to compute the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures has been assessed. The basic physical and geotechnical properties of the soil-bentonite mixtures have been used as inputs of the Chapuis (1990), Sivapullaiah (2000) and Tripathi (2013) models. The suitability of the Mbonimpa et al. (2002) model for plastic soil to compute the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures has also been investigated. The following section provides details on the tested  $k_{sat}$  models.

#### 3.2.4.1 Chapuis (1990) model

Chapuis (1990) developed two empirical equations for estimating the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures based on mass and volume considerations. The two proposed equations consider factors such as partial porosity available for water seepage  $n^*$  and degree of saturation ( $S_r$ ). The Chapuis (1990) models are based on the principle that there is an efficient porosity ( $n^*$ ) describing the total pore space available for fast-moving water (i.e. the volume of voids available for water flow). For saturated sand-bentonite mixtures,  $k_{sat}$  can be computed with Equation 1 in which  $n^*$  is estimated using the total porosity of the sand alone ( $n_{sand}$ ) at the modified Proctor optimum and a volumetric ratio describing the contribution of the volume of bentonite ( $V_b$ ) and the volume of the soil ( $V_s$ ; Equation 3.2).

$$\log k = 20 \times (n^* - 0,45) \quad (3.1)$$

$$n^* = n_{sand}(S_r = 100\%) - \frac{2V_b}{V_s} \quad (3.2)$$

The second formulation of Chapuis (1990) model (equation 3.3) is also based on the concept of the effective porosity but also, accounts for the behaviour of mixture in field. Chapuis (1990) indicated that the  $nS_r$  value of a mixture in the field is higher than the  $nS_r$  value reached by the soil alone when tested in a permeameter and it's important to take it into account in the calculation of  $n^*$ . Chapuis (1990) suggested that the  $nS_r$  value can be

roughly estimated based on the B/S value for mixtures initially compacted at a dry density exceeding 95% of the optimum.

$$\log k_{pred} = 20 \times (n_{pred}^* - 0.52) \quad (3.3)$$

$$n^* = n_{sand} S_r + \frac{B}{S} - \frac{2V_b}{V_s} \quad (3.4)$$

where B is the mass of dry bentonite and S is the mass of dry soil.

In general, the difference between the two equations is the way they calculate  $n^*$ . The equation 3.1 calculates  $n^*$  based on the ratio of the volume of solid bentonite to the volume of solid soil particles, while equation 3.3 calculates  $n^*$  based on  $S_r$  and a proportionality coefficient. Chapuis (1990) showed that, from an engineering viewpoint, the two equations can be used to predict  $k_{sat}$  values of sand-bentonite mixtures within one order of magnitude, for saturated mixtures.

#### 3.2.4.2 Sivapullaiah et al (2000) model

Sivapullaiah et al. (2000) proposed several methods of predicting the  $k_{sat}$  of sand- and silt-bentonite mixtures based on simple geotechnical parameters such as the liquid limit of the bentonite ( $LL_b$ ) and the void ratio ( $e$ ) of the mixture. Sivapullaih et al. (2000) observed that there are strong relationships between the log of  $k_{sat}$ ,  $e$  and empirical scaling factors associated to the liquid limit. Among the proposed methods, Equation 3.5 is the formulation that has the higher correlation coefficient for soil-bentonite mixtures having a liquid limit greater than 50%. In this study, the application of this equation is used to predict the  $k_{sat}$  of tested soil-bentonite mixtures.

$$\text{Log}_{10} k = \frac{e - 0.0535 \times LL_b - 5.286}{0.0063 \times LL_b + 0.2516} \quad (3.5)$$

#### 3.2.4.3 Tripathi model (2013)

The Tripathi (2013) model was developed to compute the  $k_{sat}$  of ideal sand-bentonite mixtures for which bentonite is completely hydrated and fills uniformly all the pore space. The empirical equation for this model was inspired by the work of Kenney et al. (1992)

which expresses  $k_{sat}$  as a function of the  $k_{sat}$  of bentonite ( $k_b$ ) at a void ratio equal to the void ratio of bentonite within the mixture ( $e_b$ ). The relationships developed by Tripathy (2013) are based on the principle that when  $e_b$  is less than or equal to the free swell void ratio of the bentonite ( $e_f$ ), hydrated bentonite fills all the pore spaces. In its general form, the Tripathy (2013) model is expressed as Equation 3.6, which in turn, can be rearranged to compute  $k_b$  if weather  $e_b$  is between  $e_f$  and  $e_f/6$  (Equation 3.7) or smaller than  $e_f/6$  (Equation 3.8).

$$k_{sat} = k_b \left[ 1 - \frac{(1-x)\gamma_d}{G_s \gamma_w} \right] \quad (3.6)$$

For  $e_f \geq e_b \geq e_f/6$ :

$$k_b = 1.30 \times 10^{-8} \left( \frac{e_b}{e_f} \right)^4 \quad (3.7)$$

For  $e_b \leq e_f/6$ :

$$k_b = 3.6 \times 10^{-10} \left( \frac{e_b}{e_f} \right)^2 \quad (3.8)$$

where  $G_s$  is the specific gravity of the base soil,  $\gamma_w$  is the unit weight of water ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\gamma_d$  is the unit weight of the mixture ( $\text{kN/m}^3$ ), and  $x$  is the bentonite to soil ratio of the mixture. In the above equations,  $e_b$  is calculated as described by Kenney et al. (1992):

$$e_b = G_b \left[ \left( 1 + \frac{1}{x} \right) \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dm}} \right) - \frac{1}{x G_s} - 1 \right] \quad (3.9)$$

where  $G_b$  is the specific gravity of the bentonite,  $\rho_w$  is the density of water ( $\text{kN/m}^3$ ) and  $\rho_d$  is the dry density of the mixture ( $\text{kN/m}^3$ ). Tripathi (2013) showed that, for most of the tested cases, the  $k_{sat}$  of ideal sand-bentonite mixtures can be estimated within 5 or 1/5 times the measured value. These cases include sand-bentonite mixtures made with different types of bentonites (sodium bentonite and calcium bentonite), sand gradings, bentonite contents (3–80 %) and permeants (distilled water to saline water).

#### 3.2.4.4 Mbonimpa et al (2002) model

The Mbonimpa et al. (2002) model has been developed for estimating the  $k_{sat}$  value of granular and plastic/cohesive soils derived from the well-known Kozeny–Carman equation

(e.g., Lambe and Whitman, 1979; Chapuis and Montour, 1992). It can be used to predict the  $k_{sat}$  from basic geotechnical properties (Mbonimpa et al., 2002). In its general form, the Mbonimpa et al., (2002) model expresses  $k_{sat}$  based on the contribution of functions associated with the fluid properties ( $f_f$ ), the void space ( $f_v$ ) and the characteristics of the solid grain surface ( $f_s$ ):

$$k_{sat} = f_f f_v f_s \quad (3.10)$$

For water, the fluid function is expressed as (Mbonimpa et al. (2002):

$$f_f = f_w = \frac{\gamma_w}{\mu_w} \quad (3.11)$$

The equation of  $f_v$  as a function of the void ratio ( $f_e$ ) can be written as follow (Mbonimpa et al. 2002):

$$f_v = f_e = C_e \frac{e^{3+x}}{1+e} \quad (3.12)$$

where  $C_e$  and  $x$  are material parameters (unitless) developed to account for tortuosity. For granular materials, the value of  $x$  is often fixed to 2 whereas for plastic soils, the value of the exponent  $e^{3+x}$  rather tends to vary with the liquid limit (Mbonimpa et al. 2002).

The formulation of the  $f_s$  differs weather granular or plastic/cohesive soils and geomaterials are considered. In the following, due to the plasticity coming from the bentonite, only the plastic/cohesive equation is presented. The  $k_{sat}$  of plastic/cohesive materials ( $k_P$ ) can be computed using the following (Mbonimpa et al. 2002):

$$k_P = C_p \frac{\gamma_w}{\mu_w} \times \left( \frac{e^{3+x}}{1+e} \right) \frac{1}{\rho_s^2 \times LL^{2\chi}} \quad (3.16)$$

where  $C_p$  is a constant (i.e.,  $C_p = C_e/\lambda^2$ ) that that is often set to  $5.6\text{g}^2/\text{m}^4$ .  $\gamma_w$  is expressed in  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,  $\mu_w$  in  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\rho_s$  in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\chi$  is a unitless parameter that takes into account the specific surface and LL in %.

This last equation has been validated for plastic/cohesive soils, including silt- and sand-bentonite mixtures with  $k_{sat}$  values between  $2.5 \times 10^{-11}$  cm/s and  $3.8 \times 10^{-6}$  cm/s as well as  $e$  and LL values ranging from 0.29 to 5.96 and 20% to 495%, respectively. The  $k_P$  equation can be rewritten to account for the void ratio at the LL ( $e_L$ ) under saturated state (Mbonimpa et al., 2002):

$$k_p^* = C_p^* \times \frac{G_s^{2\chi-2}}{\gamma_w \times \mu_w} \times \frac{e^{3+\chi}}{(1+e) \times e_L^{2\chi}} \quad (3.17)$$

where  $C_p^*$  is a constant ( $C_p^* = 5.4 \times 10^{-10} \text{g}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-4}$ ).

### 3.3 Results

#### 3.3.1 Basic characterization results

Table 3.1 summarizes the characterization results obtained for the tested bentonites, crushed rocks, sand, and tailings. The GSD parameters indicates that B1 and B2 are similar, but generally finer than B3. The liquid limit of B1 and B2 are greater than that of B3. B1 and B2 are mainly composed of smectite and have secondary mineral phases of quartz, anorthite-Na, sanidine, albite, heulandite-Ca, gypsum, cristobalite, muscovite and calcite. Table 3.1 also indicates that the free swell void ratios of B1 and B2 are greater than that of B3. Boulanger-Martel (2015) reported that the low swelling properties of B3 could be attributed to the occurrence of beidellite as the main swelling mineral, as opposed to montmorillonite like most industrial bentonites (B1 and B2). Table 3.1 and Figure 3.2 also show that the GSD of CR2 is more uniform ( $C_U = 6.5$ ) than that of CR1 ( $C_U = 22.8$ ), that the tested sand is uniform GSD ( $C_U = 1.3$ ), and that the tailings present a graded GSD ( $C_U = 16.6$ ). Such difference in GSD for the base materials will contribute to assessing the influence of the GSD, and especially  $C_U$  on measured and predicted  $k_{\text{sat}}$  values. More detailed characterization results are presented in Appendix A.

Table 3.1 Geotechnical properties of the materials and mineralogical composition of B1 and B2.

	B1	B2	B3 <sup>1</sup>	CR	CR2	S	T
				1			
G <sub>s</sub> (-)	2.42	2.67	2.52	2.96	2.78	2.65	2.69
D <sub>10</sub> (μm)	5.2	5.1	54	368	175	699	5.6
				0			
D <sub>30</sub> (μm)	16.1	15.8	-	238	740	790	32.4
				0	0		
D <sub>60</sub> (μm)	46.8	43.1	-	857	113	899	92.5
				0	00		
Cu (-)	9.05	8.39	6.02	22.8	6.5	1.3	16.6
LL (%)	352	239	149	-	-	-	-
IP	323	255	-	-	-	-	-
e <sub>f</sub> (-)	30.5	32.3	11.3	-	-	-	-
Mineral content (%)							
Smectite	73.2	59.5					
	2						
Quartz	9.72	17.2					
Anorthite-Na	6.99	-					
Albite	-	7.1					
Heulandite-Ca	4.15	4.5					
Sanidine	-	4.6					
Gypsum	0.67	1.4					
Cristobalite	1.70	1.2					
Muscovite-2M1	3.09	2.5					
Calcite	0.47	2.1					

<sup>1</sup>: data from Boulanger-Martel et al. (2016).

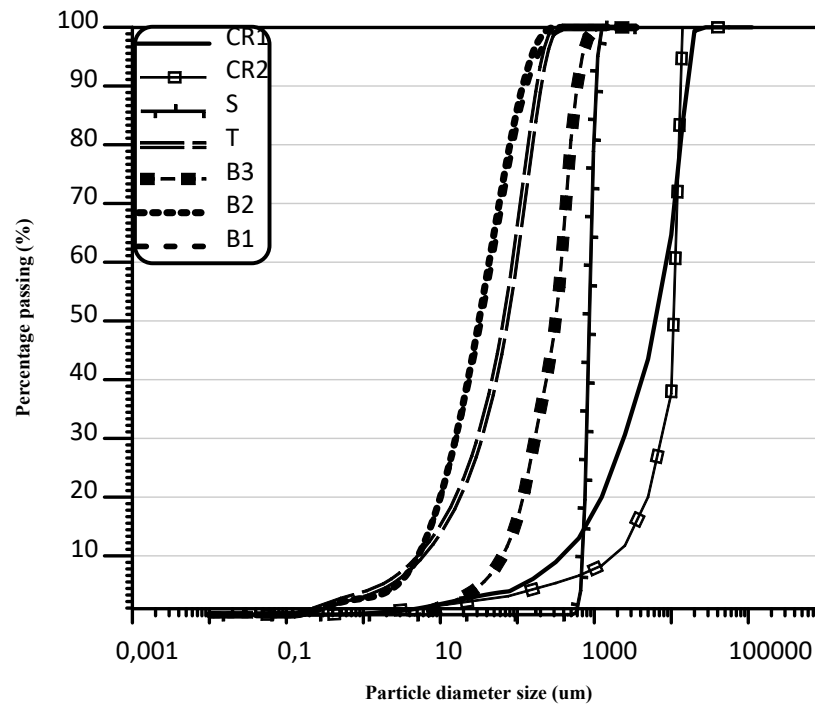


Figure 3.2 Grain size distribution of the tested materials.

### 3.3.2 Permeability tests results

#### 3.3.2.1 Saturation and hydration of soil-bentonite mixtures

Figure 3.3 shows the evolution of the hydraulic conductivity  $k_{sat}$  with hydration time of a selected example. These results represent well the behaviour observed for all tested soil-bentonite mixtures, for which a marked decrease in the value of  $k_{sat}$  was observed within the first 100 permeation hours. Then the decrease in the value of  $k_{sat}$  was more gradual until it reached the stabilization criterion of 1% difference between three successive  $k_{sat}$  tests (Appendix B). In that specific case, stability was achieved after about 360h. Such behavior was expected and is attributed to saturation and hydration processes of the bentonite. The gradual swelling of bentonite within the granular matrix gradually reduces the pore space available to water flow which results in an overall decrease in  $k$ . This behavior has been witnessed by several authors who showed that the time required for the hydration of bentonite in the mixture varies from 240 to 360 hours using the flexible wall permeameter

(e.g., Chapuis 1990; 2002). The degree of saturation of all test samples was verified post-testing and was of at least 91.0% (Appendix B).

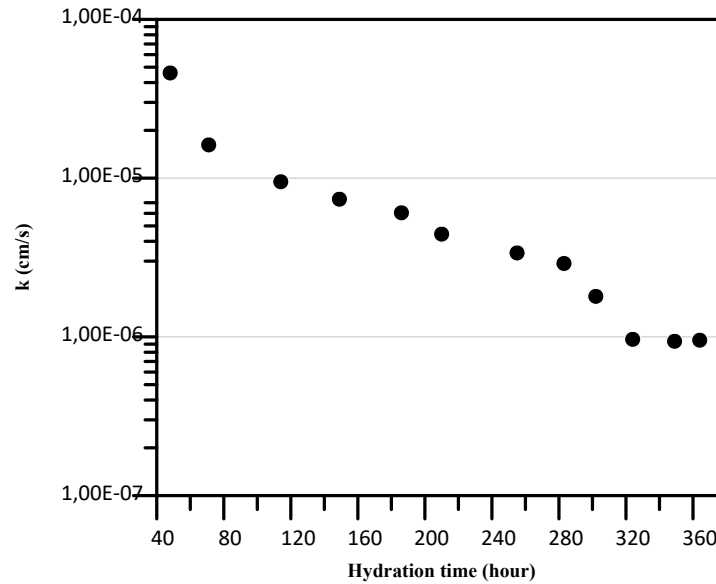


Figure 3.3 Example of the evolution of  $k_{sat}$  with hydration time.

### 3.3.2.2 $k_{sat}$ and factors of influence

A summary of all the permeability tests that were performed in this study is provided in Table 2. Generally, the experimental results indicate that the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures is greatly influenced by the bentonite content, the type of bentonite and the properties of the base material (type and GSD). This section aims at highlighting the main factors controlling the  $k_{sat}$  of the tested soil-bentonite mixtures.



Table 3.2 Summary of permeability test results.

Mixture	Bentonite content (%)	n (-)	e <sub>b</sub> (-)	S <sub>r</sub> (%)	k <sub>sat</sub> (cm/s)
CR1-B1	0.0	-	-	-	5.0×10 <sup>-2</sup>
	5.0	0.25	5.50	91.8	5.8×10 <sup>-7</sup>
	6.5	0.25	4.30	91.3	2.9×10 <sup>-7</sup>
	6.5	0.25	4.30	90.5	3.5×10 <sup>-7</sup>
	7.0	0.25	4.00	92.0	9.5×10 <sup>-8</sup>
	8.0	0.25	3.50	90.6	6.6×10 <sup>-8</sup>
	9.0	0.25	3.10	96.35	3.5×10 <sup>-8</sup>
CR1-B2	6.5	0.25	4.65	91.8	4.0×10 <sup>-7</sup>
CR1-B3 <sup>1</sup>	6.5	0.24	4.18	-	2.6×10 <sup>-7</sup>
CR2-B1	0.0	-	-	-	8.8×10 <sup>-1</sup>
	5.0	0.25	5.90	92.9	7.7×10 <sup>-6</sup>
	7.0	0.25	4.20	97.7	6.9×10 <sup>-7</sup>
	9.0	0.25	3.30	95.4	3.6×10 <sup>-7</sup>
S-B1	0.0	0.30	-	-	5.5×10 <sup>-3</sup>
	5.0	0.30	7.86	97.4	9.5×10 <sup>-7</sup>
	7.0	0.29	5.63	96.2	4.7×10 <sup>-7</sup>
	9.0	0.30	4.38	95.7	9.0×10 <sup>-8</sup>
T-B1	0.0	-	-	-	2.1×10 <sup>-5</sup>
	5.0	0.34	7.76	-	2.3×10 <sup>-6</sup>
	7.0	0.35	5.56	94.8	5.9×10 <sup>-7</sup>
	9.0	0.37	4.33	-	2.1×10 <sup>-7</sup>

<sup>1</sup>: data from Boulanger-Martel (2016).

Table 3.2 shows that the k<sub>sat</sub> of CR1, CR2, sand and tailings are of 5.0×10<sup>-2</sup>, 8.8×10<sup>-1</sup>, 5.5×10<sup>-3</sup> and 2.1×10<sup>-5</sup> cm/s, respectively. Then, Figure 3.4a (and Table 3.2) show that the k<sub>sat</sub> of soil-bentonite mixtures tends to decrease with increasing bentonite content. However, Figure 3.4a does not show a clear trend on the influence of the base material on k<sub>sat</sub>. Therefore, k<sub>sat</sub> results obtained on soil-bentonite mixtures were normalized to the k<sub>sat</sub> value obtained for the base material (Figure 3.4b). This is intended to highlight the importance of adding bentonite to the overall reduction of k<sub>sat</sub>. Figure 3.4b indicates that the addition of bentonite to the tested crushed rocks decreased k<sub>sat</sub> by 5 to 6 orders of magnitude. For the CR1-B1 mixture, the k<sub>sat</sub> decreased from 5.0×10<sup>-2</sup> for the crushed rock alone to 5.8×10<sup>-7</sup> cm/s at 5.0% bentonite to 3.5×10<sup>-8</sup> cm/s at 9.0% bentonite (Figure 3.4a).

A similar behaviour was observed for the CR2-B1 mixture, which observed  $k_{sat}$  values of  $8.8 \times 10^{-1}$ ,  $7.7 \times 10^{-6}$  and  $3.6 \times 10^{-7}$  cm/s at bentonite content of, 0.0, 5.0 and 9.0%, respectively. Such  $k_{sat}$  values also highlight that there is generally one order of magnitude difference between the  $k_{sat}$  of CR1-B1 and CR2-B1, but the magnitude of the decrease in  $k_{sat}$  is similar at any of the tested bentonite contents. Such difference in  $k_{sat}$  can mostly be explained by the difference in the  $C_U$  of the two tested crushed rocks used in the mixtures (Table 3.1). CR2 is more uniform ( $C_{UG} = 6.5$ ) than CR1 ( $C_{UG} = 22.8$ ), which has a negative impact on  $k_{sat}$ . These results show that the more uniform the GSD of the crushed rock is, the higher the  $k_{sat}$  of the crushed rock-bentonite mixture is. The addition of bentonite to the tested Ottawa sand (S-B1 mixture) decreased the  $k_{sat}$  by about 3.5 to 5 orders of magnitude (Figure 3.4b).  $k_{sat}$  decreased from  $5.5 \times 10^{-3}$  cm/s for the sand only to  $9.5 \times 10^{-7}$  for the S-B1 mixture at 5.0% bentonite. The effect of adding bentonite to the tailings was less marked than for the sand and crushed rock base materials. The  $k_{sat}$  of the tailings alone was of  $2.1 \times 10^{-5}$  cm/s (Table 3.2) and the addition of bentonite decreased  $k_{sat}$  by up to 2 orders of magnitude at 9.0% bentonite (Figure 3.4b). Such results indicate that the impact of adding bentonite to a base material on  $k_{sat}$  seems to increase with the coarseness of the base material.

Several studies have indicated that it is rather the void ratio of bentonite within the mixtures ( $e_b$ ) that controls the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures (e.g., Chapuis, 1990b; Kenney et al., 1992; Studds et al., 1998; Tripathi, 2013). Thus,  $e_b$  was calculated (Table 3.3) to assess the relationship that exists between  $e_b$  and  $k_{sat}$  for each of the tested samples (Figure 3.4c). Values of  $e_b$  was calculated using the method of Kenney et al. (1992; Equation 3.9) based on the parameters provided in Table 1. These results show a strong correlation between  $k_{sat}$  and  $e_b$ . CR1-B1, S-B1 and T-B1 exhibit a similar behaviour whereas CR2-B1 has generally higher  $k_{sat}$  values for similar  $e_b$ . Figure 3.4c highlights that the lower the  $e_b$  is, the lower  $k_{sat}$  is. These findings suggest that the seepage in such mixtures is primarily governed by the properties of the bentonite, particularly its void ratio. Table 3.2 also shows that, despite the different properties of the tested bentonites (Table 3.1), there is no marked influence of the type of bentonites on the  $k_{sat}$  of the tested mixtures (CR1-B1, CR1-B2 et CR1-B3 at a bentonite content of 6.5%). This can be attributed to the fact that all samples yielded similar

$e_b$ , which suggests that the tested bentonites swelled similarly and enough to occupy the pore space and control water flow.

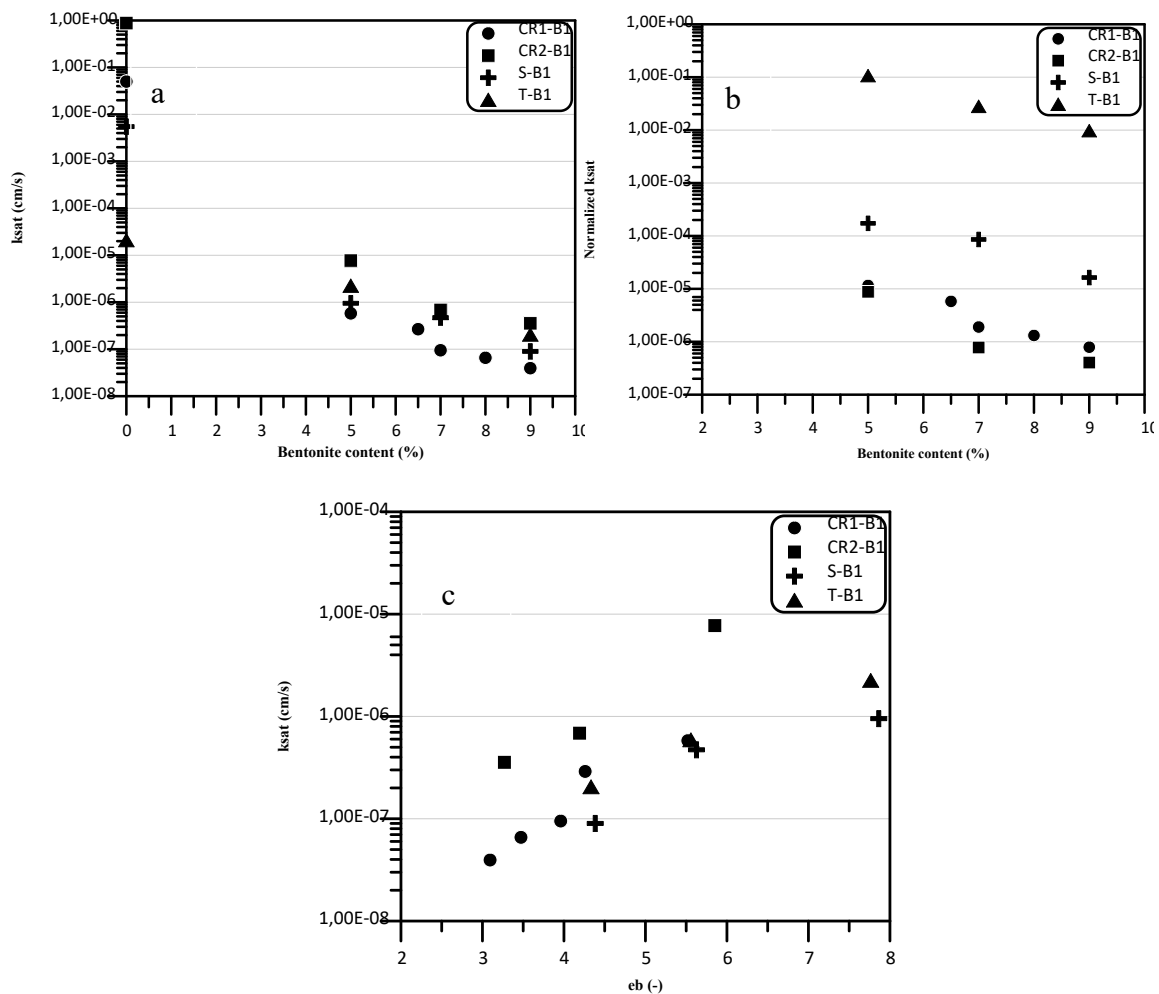


Figure 3.4 a) Saturated hydraulic conductivity as function of bentonite content, (b) normalized saturated hydraulic conductivity as function of bentonite content and (c) saturated hydraulic conductivity as function of the bentonite void ratio within the mixture.

### 3.3.2.3 Prediction capacity of existing $k_{sat}$ models

The obtained laboratory results were used to test the ability of selected models to predict  $k_{sat}$ . Because it is not practical to measure the liquid limit on crushed rock-bentonite samples, and for the interest of comparison, the liquid limit of the tested mixtures was not measured. Therefore, the liquid limit of the bentonite was used instead of that of the mixture

in the models of Mbonimpa et al. (2002) and Sivapullaiah (2000). This has undoubtedly led to estimation errors that will duly be considered during the interpretation. Computed  $k_{\text{sat}}$  are compared to experimental values in Figure 3.5 for the tested models. Detailed model application results are provided in Appendix A of the article (Table A.1). Figure 3.5 suggests that, globally, the applied  $k_{\text{sat}}$  models underestimate the  $k_{\text{sat}}$  of the tested soil-bentonite mixtures. Figure 3.5a shows that the Chapuis (1990) model provides estimations within half an order of magnitude for most of the tested materials. However, the estimations for the T-B1 mixture are less accurate and can underestimate  $k_{\text{sat}}$  by nearly 2 orders of magnitude for this material. The Sivapullaiha (2000) model provides estimates of similar quality for most materials and underestimates  $k_{\text{sat}}$  that fall within a range of an order of magnitude for CR1-B1 and within half to one order of magnitude for S-B1 (Figure 3.5b). For CR2-B1 and T-B1, the predictions are between one and two orders of magnitude. The Tripathi et al. (2013) model offers estimations that underestimate  $k_{\text{sat}}$  by about two orders of magnitude for CR1-B1, S-B1, and T-B1. The value of  $k_{\text{sat}}$  is underestimated by up to 4 orders of magnitude for CR2-B1. The Mbonimpa et al. (2002) model was designed to compute the  $k_{\text{sat}}$  of plastic soil and underestimates the  $k_{\text{sat}}$  of the tested crushed rock-bentonite mixtures by about five orders of magnitude. Such high difference was expected, mostly because of the error induced by the liquid limit value considered in the estimations. In all cases, measuring the liquid limit on soil-bentonite mixtures represents a limitation in applying a predictive model.

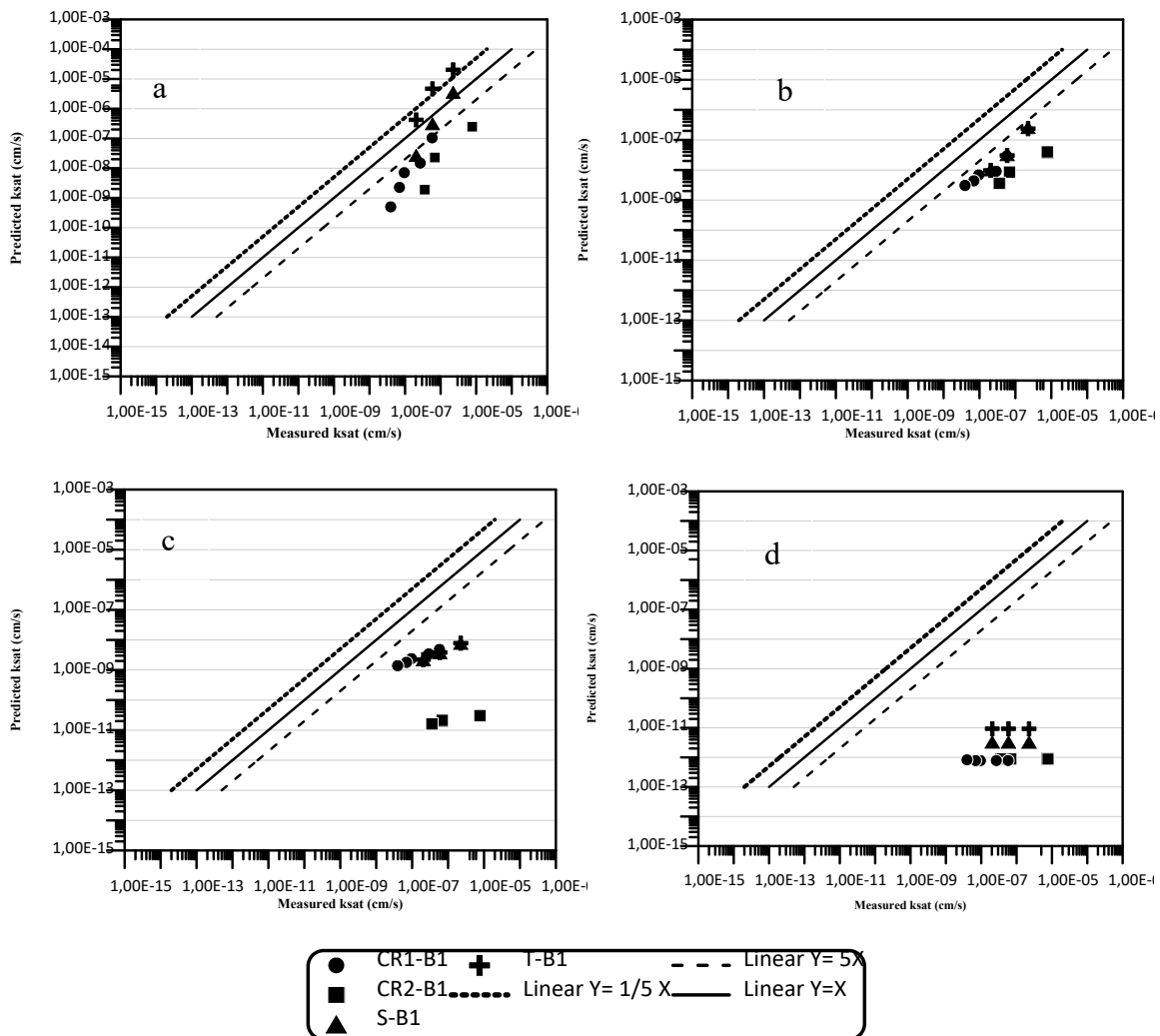


Figure 3.5 Predicted saturated hydraulic conductivity as function of measured saturated hydraulic conductivity for the models of (a) Chapuis (1990), (b) Sivapullaiah et al (2000), (c) Tripathi (2013) and (d) Mbonimpa et al. (2002).

### 3.4 Development of a $k_{sat}$ predictive model for soil-bentonite mixtures

Considering the limitations of existing models to predict the  $k_{sat}$  of several types of soil-bentonite mixtures, this study further investigated the ability of the Mbonimpa et al. (2002) model to predict the  $k_{sat}$  of such materials. The Mbonimpa et al. (2002) equations combine three functions, each developed to account for the properties of the fluid, the void ratio, and the surface characteristics of the material. While the properties of the fluid do not change, the void ratio and surface characteristics functions were modified to better represent the intrinsic properties of soil-bentonite mixtures. Modifications of those two

functions are proposed to further develop the Mbonimpa et al. (2002) model for applications specific to soil-bentonite mixtures. The following sections aim at presenting two alternatives to the Mbonimpa et al. (2002) model for soil-bentonite mixture applications.

### 3.4.1 Proposal 1- modification based on the $k_p$ equation

The swelling of bentonite within the pore space reduces the available space for water flow, resulting in a more tortuous flow path (e.g., Olson and Daniel 1981, Benkhelifa and Daoud 1998, Callot 1983, Holtz and Kovacs 1991, Chapuis 1990, and Komine et al.,2008). The literature as well as the results showed that  $e_b$  strongly controls the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures (e.g., Chapuis, 1990b; Kenney et al., 1992; Studds et al., 1998; Tripathi, 2013). Therefore, the void ratio function ( $f_{eb}$ ) for  $k_p$  was modified to Equation 18 to account for  $e_b$ :

$$f_{eb} = C_e \frac{e_b^{3+x}}{1+e_b} \quad (3.18)$$

where the value of the constant  $C_e$  has been modified and is equal to 1 (Hfaeidh 2023).

The surface characteristic function is related to the specific surface and depends on soil type, GSD, and plasticity (Chapuis and Montour, 1992; Chapuis and Aubertin, 2001). Because soil-bentonite mixtures are composed of a granular matrix filled with plastic materials (bentonite), the surface characteristic function must account for the contribution of both, the base material and bentonite. Therefore, it is crucial to adjust the specific surface function by considering the GSD of the base material (represented by the coefficient of uniformity of the base material  $C_{UG}$ ) and the liquid limit of the bentonite ( $LL_b$ ). The proposed specific surface function ( $f_{s-sbm}$ ) becomes:

$$f_{s-sbm} = \frac{1}{\rho_{sbm}^2 \lambda^2 LL_b^{2X} C_{UG}^2} \quad (3.19)$$

$\lambda$  An empirical parameter that takes into account the specific surface ( $m^2/g$ ).

The value of  $\lambda$  also has been modified in this equation and becomes equal to  $0.032 m^2/g$  (Hfaeidh 2023).

The first resulting modification to the Mbonimpa et al. (2002) model for soil-bentonite mixtures ( $k_{P-sbm}$ ) is as followed:

$$k_{P-sbm} = C_{P-sbm} \frac{\gamma_w e_b^{3+x}}{\mu_w (1+e_b)} \frac{1}{\rho_s^2 L L_b^{2x} C_{UG}^2} \quad (3.20)$$

where the value of the constant  $C_{P-sbm}$  has been modified (as opposed to  $C_P$  in Equation 16) to further to account for tortuosity ( $C_{P-sbm} = C_e/\lambda^2 = 1/(0.032)^2$ ; Hfaiedh, 2023). Then, the application of equation 20 requires assessing the impact of the tortuosity parameter  $x$  on the computed  $k_{sat}$ . Figure 3.6 shows a comparison of the computed  $k_{sat}$  values as a function of  $e_b$  at different  $x$  values for CR1-B1 (Figure 3.6a), CR2-B1 (Figure 3.6b), S-B1 (Figure 3.6c) and T-B1 (Figure 3.6d). Detailed calculation results are provided at Appendix B of the article (Table B.1). Results indicate that the model predicts reasonably well the measured values for the crushed rocks and tailings samples when  $x$  is fixed at a value of 3. However, the predicted  $k_{sat}$  values for the tested sand-bentonite mixture are two to three orders of magnitude greater than measured values for all tested tortuosity coefficients.

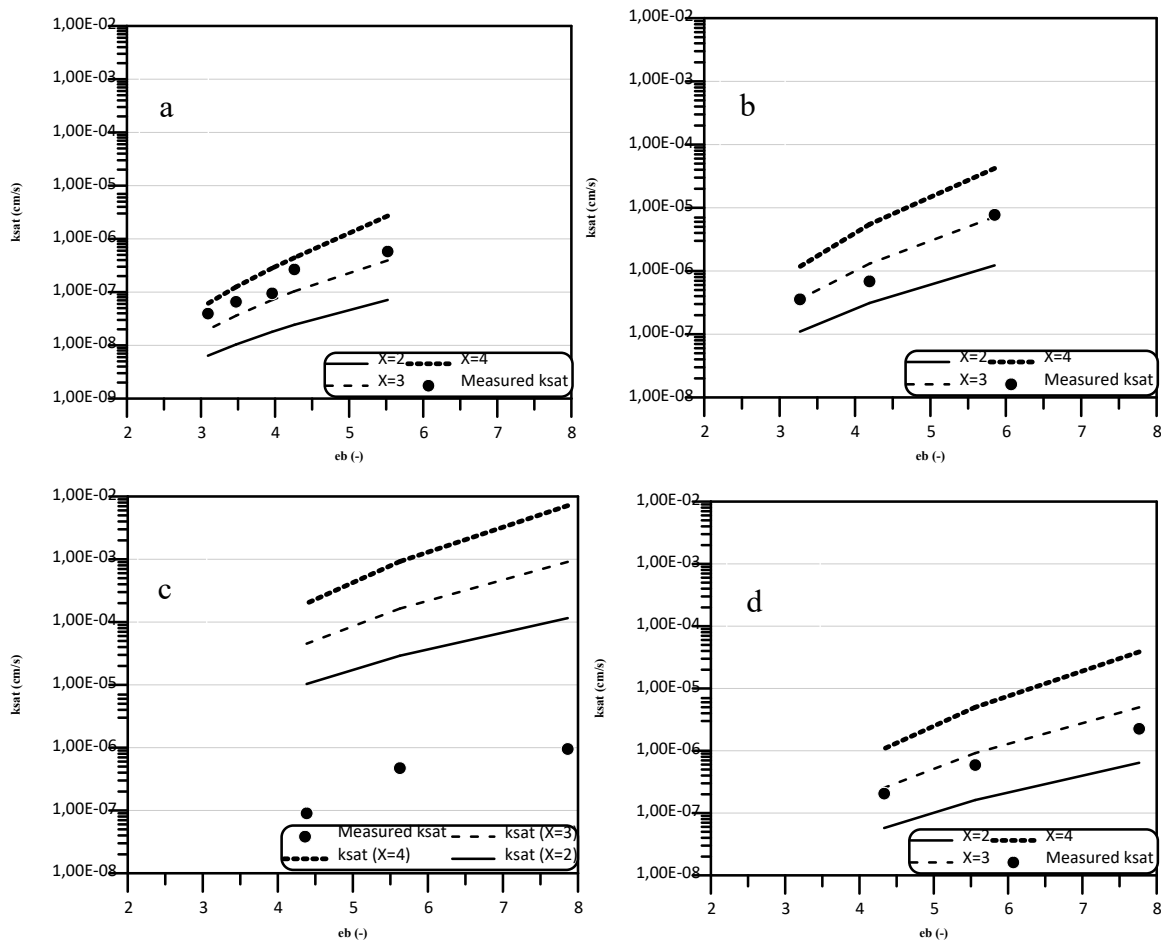


Figure 3.6  $k_{sat}$  values computed by Equation 3.20 represented as function of  $e_b$  for CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) and T-B1 (d).

### 3.4.2 Proposal 2 – modification based on $k_p^*$

Similarly, to the previous propositions, the  $k_p^*$  equation (Equation 17) was modified to account for (1)  $e_b$ , (2) the void ratio at the  $LL_b$  under saturated state ( $e_{Lb}$ ) and (3) the GSD of the base material:

$$k_p^* = C_p^* \frac{G_s^{2X-2}}{\gamma_w \times \mu_w} \frac{e_b^{3+X}}{(1+e_b) \times e_{Lb}^{2X}} C_{UG}^{1/6} \quad (3.23)$$

Figure 3.7 shows that Equation 3.21 can represent well the  $k_{sat}$  of all the tested types of materials (detailed calculations are presented in Table B.2 of Appendix B of the article). However, the results show that specific values of  $x$  must be defined to match experimental results.  $x$  values of 2 appear to be adequate for CR1-B1 and T-B1 whereas  $x$  values of 4 and 3 are required to represent well experimental values for CR2-B1 and S-B1,



respectively. However, using a  $x$  value of 3 for all materials generally yields predictions within one half of an order of magnitude, which is generally considered precise enough for  $k_{sat}$  models.

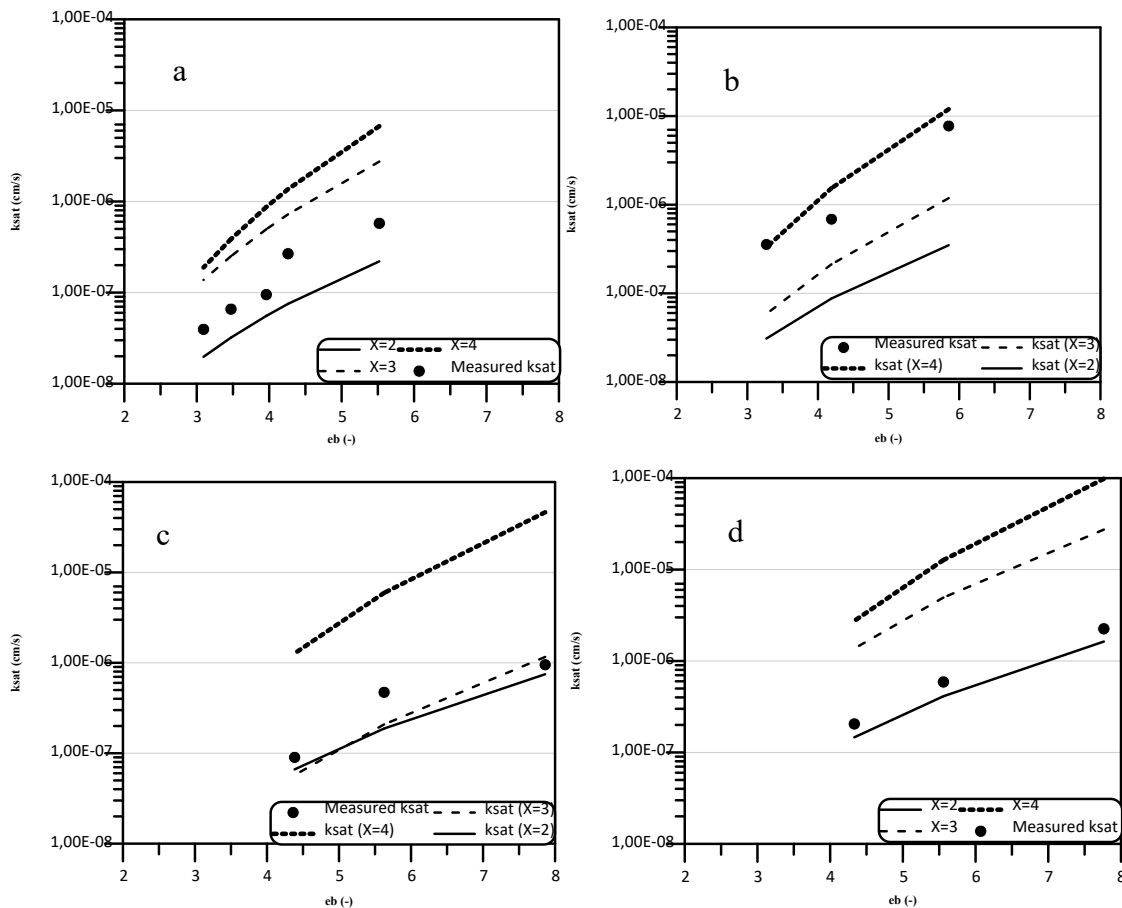


Figure 3.7  $k_{sat}$  values computed by equation 3.21 represented as function of  $e_b$  for CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) and T-B1 (d).

### 3.5 Discussion

The results obtained showed that the tested existing models are able to adequately predict the  $k_{sat}$  of some specific materials but fail to do so for others. This inadequacy can be attributed to the fact that these models were not originally designed or validated for predicting the  $k_{sat}$  of some of the tested materials (i.e., crushed rock bentonite mixtures). On the other hand, the determination of the liquid limit of some soil-bentonite mixtures may be difficult or not practical (crushed rock-bentonite mixtures) to obtain, which limits the use of some of the existing models. In this study, further steps toward the application

of the developed models include to quantify the ability of the models to represent the experimental data obtained in this study, assess their ability to represent measured data from the literature and provide limits to their application. In this way, the ability of Equations 3.20 and 3.21 to match the experimental results obtained for CR1-B1, CR2-B1, S-B1 and T-B1 was first assessed. Figure 3.8 shows a comparison between the predicted and measured  $k_{\text{sat}}$  for CR1-B1 (Figure 3.8a), CR2-B1 (Figure 3.8b), S-B1 (Figure 3.8c) and T-B1 (figure 3.8d) obtained via Equations 3.20 and 3.21 for  $x=3$ . The root-mean-square (RMSE) of each scenario (equation / material) was also calculated to quantify the performance of both models to compute  $k_{\text{sat}}$ . The results indicate that the application of Equations 3.20 and 3.21 yields satisfactory results for CR1-B1, CR2-B1, and R-B1 but the Equation 3.20 provides more precise results. For those cases, the RMSE of Equation 3.20 is about one order of magnitude lower than that of Equation 21. However, for S-B1, only Equation 3.21 minimized the RMSE ( $2.0 \times 10^{-7}$  for Equation 3.21 vs  $5.3 \times 10^{-4}$  for Equation 3.20) and provided good predictions of  $k_{\text{sat}}$ . Based on these findings, it is proposed to utilize equation 3.21 as the general equation for predicting the  $k_{\text{sat}}$  of various types of soil-bentonite mixtures. For  $C_{\text{UG}}$  values exceeding 5 and for enhanced accuracy, equation 3.20 is preferred.

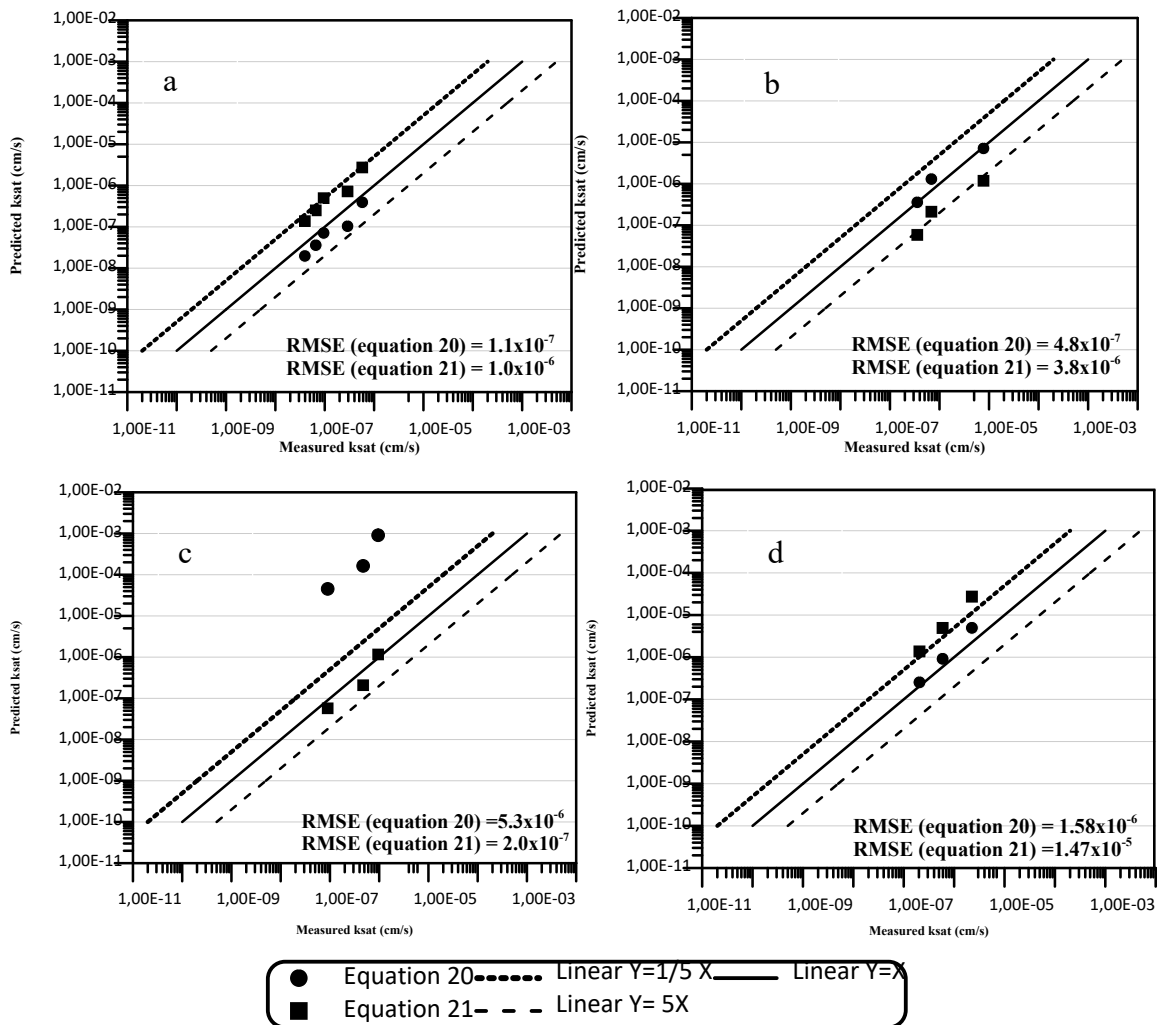


Figure 3.8 Predicted  $k_{sat}$  as function of measured  $k_{sat}$  for CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) and T-B1 (d) using Equation 3.20 ( or Equation 20) and 3.21 (or Equation 21).

The ability of existing models as well as equations 3.20 and 3.21 to compute the  $k_{sat}$  of the tested soil-bentonite mixtures was also assessed by the means of quantifying the RMSE between measured and predicted values for all materials (Table 3.3). The results obtained for CR1-B1 and T-B1 show that equation 3.20 and the models of Sivapullaiah et al. (2000) and Tripathi (2013) yield similar RMSE. In the same way, equation 3.21 and the models of Sivapullaiah et al. (2000), Tripathi (2013) and Chapuis (1990) performed similarly for the S-B1 mixture. However, for CR2-B1, the developed model (Equation 3.20) is more adequate to represent the  $k_{sat}$  than existing models. This suggests that the proposed model

could allow predicting more precisely the  $k_{sat}$  of more diverse types of soil-bentonite mixtures than existing models.

Table 3.3 RMSE between experimental results and predictions made with equations 3.20 and 3.21 as well as selected existing  $k_{sat}$  models for CR1-B1, CR2-B1, S-B1 and T-B1.

Mixture	Equation 3.20	Equation 3.21	Chapuis (1990)	Sivapulliah et al (2000)	Tripathi (2013)
CR1-B1	$1.1 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$
CR2-B1	$4.8 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$
S-B1	$5.3 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$4.8 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-7}$
T-B1	$1.6 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-6}$

The ability of Equations 3.20 and 3.21 to compute the  $k_{sat}$  of graded and uniform soil-bentonite mixtures, respectively, was further investigated using data from the literature. To do so, key studies providing the information required to calculate  $e_b$  were selected. The work of Boulanger-Martel et al. (2016) and Xu et al. (2016) were used to test Equation 3.20 and compute the  $k_{sat}$  of graded soil-bentonite mixtures. Boulanger-Martel et al. (2016) determined the  $k_{sat}$  of crushed rock-bentonite mixtures at 5.0, 6.5 and 8.0% bentonite, whereas Xu et al. (2016) worked on sand-bentonite mixtures at 5.0 to 20.0% bentonite. Similarly, the ability of Equation 3.21 to compute the  $k_{sat}$  of uniform sand-bentonite mixtures (2 to 12% bentonite) was assessed based on the data from Kenney et al (1992) and Ameta et Wayal (2008). A summary of the main geotechnical properties of the materials is provided in Table 3.4. Model application results are provided in Figure 3.9 for graded (Figure 3.9a) and uniform (Figure 3.9b) materials. Figure 3.9a illustrates that Equations 3.20 and 3.21 computes well most experimental results for the graded crushed rock- and sand-bentonite mixtures but Equation 3.20 provides more precise results. However, Figure 3.9a suggests that at bentonite contents greater than 10% (15.0% and 20.0% of bentonite), Equations increasingly underestimate  $k_{sat}$ . This can be attributed to the fact that, in general, the addition of bentonite at a certain content does not result in a decrease in the values of  $k_{sat}$ . Experimental laboratory and field tests have confirmed that, at a specific bentonite content (with a bentonite content exceeding 10-15%), the measured hydraulic conductivity remains constant (Chapuis et al. 2002). The proposed predictive model is based on the calculation of  $e_b$ . As bentonite content increases,  $e_b$  decreases, which

has a direct influence on the predicted  $k_{sat}$  value. Consequently, at high bentonite contents, the  $e_b$  decreases, leading to a subsequent reduction in the predicted hydraulic conductivity. Therefore, the observed difference between measured and predicted  $k_{sat}$  values for high bentonite contents can be attributed to the impact of  $e_b$  on the predicted  $k_{sat}$  values. Figure 3.9b also indicates that only Equation 3.21 predicts well the  $k_{sat}$  of uniform sand-bentonite mixtures. However, the tested data also show that equation 3.21 can overestimate  $k_{sat}$  at low bentonite contents. Chapuis (2002) showed that at bentonite content less than 5.0%, the bentonite in the mixture is washed away by seepage forces, an internal erosion problem. The measured  $k_{sat}$  value, in this case, is close to that of soil alone (high permeability) and this can explain the overestimation of the hydraulic conductivity when the predictive equations were used for bentonite content less than 5.0%.

Table 3.4 Summary of the geotechnical properties of the materials from the literature.

	Kenney et al. (1990)	Ameta and wayal (2008)	Boulanger Martel et al (2016)	Xu et al. (2016)
Mixture	Sand- bentonite	Sand- bentonite	Crushed rock- bentonite	Sand- bentonite
LL <sub>b</sub> (%)	500	250	150	181
Cu <sub>s</sub> (-)	1.87	1.72	24	35.9
G <sub>s</sub> (-)	2.65	-	3.0	-
G <sub>b</sub> (-)	2.74	-	2.6	-

s: base material; b: bentonite

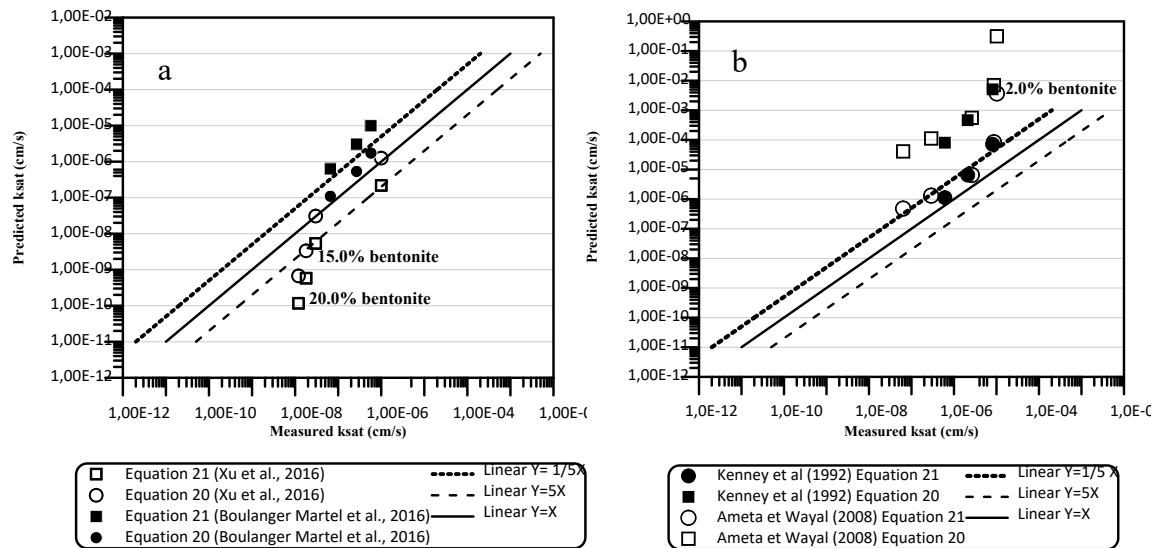


Figure 3.9 Predicted  $k_{sat}$  as function of measured  $k_{sat}$  for (a) graded and (b) uniform soil-bentonite mixtures using Equation 3.20 ( or Equation 20) and 3.21 (or Equation 21) for  $x=3$ .

This study and the use of some data from the literature showed that the proposed equations can be used to provide quick and reliable  $k_{sat}$  values of different soil-bentonite mixtures. Equation 3.21 is recommended for predicting the  $k_{sat}$  of most types of soil-bentonite mixtures, especially when the uniformity coefficients of the base material is uniform. This equation has been validated for liquid limits of the bentonite between 150 and 500%. Graded base material has also frequently been used for the construction of engineered cover systems. For example, a natural sand having a  $C_U$  between 8 and 25 has been used in the construction of a cover with capillary barrier effects at the Les Terrains Aurifères site (Bussière et al., 2006). Demdoun (2019) also provide example of sand with  $C_U$  greater than 5 used as base materials for waste storage structures. In this case, the use of equation 3.20 is preferred to accurately estimate  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures for  $C_{UG}$  greater than 5 and liquidity limits between 150 and 352%.

### 3.6 Conclusion

The use of soil bentonite mixture as low permeability materials in waste mine confinement structures offers an interesting alternative, especially when natural fine-grained soils are not available close to the construction site. One of the key hydraulic properties required for

the design of such mine waste confinement structures is the  $k_{sat}$ . This study shows that the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures depends on several factors, the  $k_{sat}$  is notably affected by the bentonite content, the void ratio of bentonite within the mixture, and the GSD of the base material. In general, the soil-bentonite mixtures with higher bentonite contents and with higher  $C_{UG}$  resulted in lower measured  $k_{sat}$ .

Permeability tests are time-consuming and certain parameters, such as hydration and mixture saturation, are challenging to control during testing. Therefore, at an early stage of design, it can be useful to use predictive models to estimate  $k_{sat}$ . Such approach can help in selecting the appropriate base material and bentonite content and understanding how the fundamental properties of the materials may impact the performance of hazardous waste confinement structures. In this context, the primary objective of this study was to develop a model for predicting the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures made with common base materials in mine waste confinement structures. This was motivated by the inadequacy of some existing models to accurately predict  $k_{sat}$  and by the difficulties in the determination of some parameters such as the liquid limit of mixture. A modification of Mbonimpa et al (2002) model was proposed, and two equations were developed. These equations consider the void ratio of bentonite within the mixture, the GSD of the base material, the liquid limit of the bentonite, the tortuosity, and the fluid properties.

It was observed that the  $k_{sat}$  of the tested soil-bentonite mixtures could be well predicted using the developed equations. These cases include different types of soil-bentonite mixtures (crushed rock-, sand- and tailing-bentonite) having different GSDs and various bentonite contents (5.0 to 9.0 %). Equation 3.21 is best for uniform soil-bentonite mixtures whereas Equation 3.20 is recommended to be used in most mine waste confinement applications (graded  $C_U$ ).

However, the obtained results highlight the need to push further the understanding of soil-bentonite mixtures at  $C_{UD}$  between 2 and 6 and to link parameter the tortuosity coefficient  $x$  to the properties of granular material used ( $C_{UD}$ ). Additionally, the equations were tested within a limited range of bentonite liquid limits, and their applicability to other bentonites should be further investigated. The suggested equations offer a valuable tool for estimating  $k_{sat}$  values during the preliminary analysis phase or early design stages, aiding in cost

estimations and design requirements. They can also be used to assess the validity of laboratory test results.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)-UQAT Industrial Research Chair on Mine Site Reclamation and by the Research Institute on Mines and the Environment (RIME UQAT-Polytechnique; <http://www.irme.ca>) and its industrial partners.

## REFERENCES

- Abeele, W. (1986). The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. *Nuclear and chemical waste* Abeele, W. (1986). The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. *Nuclear and chemical waste management*, 6(1), 81-88.
- 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.
- Amadi, A., & Eberemu, A. (2013). Characterization of geotechnical properties of lateritic soil-bentonite mixtures relevant to their use as barrier in engineered waste landfills. *Nigerian Journal of Technology*, 32(1), 93-100.
- Ameta, N., & Wayal, A. S. (2008). Effect of bentonite on permeability of dune sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13(8).
- ASTM, D. (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils.
- ASTM D4318; Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.  
*ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.*
- ASTM D4318–17 (2017) Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.  
*ASTM International, West Conshohocken*
- ASTM D698; Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2021.*



ASTM D4318; Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.

ASTM D2434-22; Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).

ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022

Aubertin, M., Bussiere, B., & Chapuis, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 470-482.

Benson, C. H., Zhai, H., & Wang, X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of geotechnical engineering*, 120(2), 366-387.

Börgesson, L., Johannesson, L.-E., & Gunnarsson, D. (2003). Influence of soil structure heterogeneities on the behaviour of backfill materials based on mixtures of bentonite and crushed rock. *Applied clay science*, 23(1-4), 121-131.

Boulanger-Martel, V. (2015). *Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques*, École Polytechnique de Montréal].

Boulanger-Martel, V. (2019). *Évaluation de la performance de recouvrements miniers pour contrôler le drainage minier acide en climat arctique*, Polytechnique Montréal].

Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2021). Insulation Covers. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, 1, 203-224.

Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2021). Resistance of a soapstone waste rock to freeze-thaw and wet-dry cycles: implications for use in a reclamation cover in the Canadian Arctic. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 41-54.

Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques*. École Polytechnique de Montréal.

Bussière, B., & Guittonny, M. (2020). *Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage*. CRC press.

- Chalermyanont, T., & Arrykul, S. (2005). Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarinn J. Sci. Technol*, 27(2), 313-323.
- Chapuis, R. (1996). *Tapis d'étanchéité en sol-bentonite et en argile locale compactée: leçons tirées de projets récents au Québec*. Proceedings of an International Symposium, Exemples majeurs et récents en géotechnique de l'environnement. Éditions ENPCEDF, Paris (p. 107-128).
- Chapuis, R. P. (1989). Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. *Groundwater*, 27(5), 647-654.
- Chapuis, R. P. (1990). Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 47-57.
- Chapuis, R. P. (1999). Borehole variable-head permeability tests in compacted clay liners and covers. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), 39-51.
- 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. (2004). Permeability tests in rigid-wall permeameters: determining the degree of saturation, its evolution, and its influence of test results. *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 304-313.
- Chapuis, R. P., Lavoie, J., & Girard, D. (1992). Design, construction, performance, and repair of the soil-bentonite liners of two lagoons. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 638-649.
- Comeau, S. (1999). *Caractérisation géotechnique et étude de la conductivité hydraulique verticale des barrières étanches d'un site d'enfouissement à Red Pine, NB*. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- de Magistris, F. S., Silvestri, F., & Vinale, F. (1998). Physical and mechanical properties of a compacted silty sand with low bentonite fraction. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 909-925.
- de normalisation du Québec, B. (2013). BNQ 2501-025. *Sols-Analyse granulométrique des sols inorganiques*.

- Demdoum, A. (2019). *Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite-Sable Calcaire-Tuf: Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD)*, Université Amar Telidji-Laghouat (Algérie)].
- Ebina, T., Minja, R. J., Nagase, T., Onodera, Y., & Chatterjee, A. (2004). Correlation of hydraulic conductivity of clay–sand compacted specimens with clay properties. *Applied clay science*, 26(1-4), 3-12.
- Fall, M., Célestin, J., & Han, F. (2009). Suitability of bentonite-paste tailings mixtures as engineering barrier material for mine waste containment facilities. *Minerals Engineering*, 22(9-10), 840-848.
- Fodje, M., Grochulski, P., Janzen, K., Labiuk, S., Gorin, J., & Berg, R. (2014). 08B1-1: an automated beamline for macromolecular crystallography experiments at the Canadian Light Source. *Journal of synchrotron radiation*, 21(3), 633-637.
- 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.
- Gökalp, Z., Başaran, M., & Uzun, O. (2011). Compaction and swelling characteristics of sand-bentonite and pumice-bentonite mixtures. *Clay Minerals*, 46(3), 449-459.
- Gray, M., Cheung, S., & Dixon, D. (1984). *The influence of sand content on swelling pressures and structure developed in statically compacted Na-bentonite*. Atomic Energy of Canada Ltd.
- GUEDDOUDA, M. K. (2011). *Comportement hydro-mécanique des sols compactés: Application à la conception d'une barrière ouvragée «sable de dune–bentonite»*].
- Hansen, D. (2004). Discussion of " On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils". *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 990-993.
- Heineck, K. S., Lemos, R. G., Flores, J. A. A., & Consoli, N. C. (2010). Influence of particle morphology on the hydraulic behavior of coal ash and sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, 325-335.
- Hfaiedh, Yosra (2023). Evaluation and prediction of hydraulic conductivity of soil-bentonite mixture used as low permeability materials in mine waste confinement structures. University of Quebec at Abitibi-temisamingue.

- Hubbard, C. R., & Snyder, R. L. (1988). RIR-measurement and use in quantitative XRD. *Powder Diffraction*, 3(2), 74-77.
- Imaizumi, S., Wataru, M., & Takahashi, N. (2009). Estimation of critical ratio of bentonite addition to tuff sand. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11(4), 299-304.
- Kashir, M., & Yanful, E. K. (2001). Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1034-1048.
- Kenney, T., Veen, W. V., Swallow, M. A., & Sungaila, M. (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 364-374.
- Komine, H. (2008). Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(4), 497-508.
- Komine, H. (2010). Predicting hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes. *Engineering Geology*, 114(3-4), 123-134.
- Komine, H., & Ogata, N. (1999). Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. *Soils and foundations*, 39(2), 83-97.
- Komine, H., & Ogata, N. (2004). Predicting swelling characteristics of bentonites. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 130(8), 818-829.
- Komine, H., Ogata, N., Horie, Y., Ishii, T., & Nishino, S.-y. (1991). *Permeability and mechanical properties of bentonite-sand mixture for sealing LLW (Low Level Radioactive Wastes) repositories*. Transactions of the 11th international conference on structural mechanics in reactor technology.
- Konrad, J.-M., & Samson, M. (2000). Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 857-869.
- Kouloughli, S., & Lehocine, M. B. (2007). Etude des mélanges sable-bentonite utilisés dans la construction de barrières de confinement de déchets solides. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*, 34-42.

- Lee, J.-M., & Shackelford, C. D. (2005). Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 64-77.
- Martel, V. B., Bussière, B., Côté, J., & Mbonimpa, M. (2015). Laboratory column experiment to evaluate oxygen diffusion through covers with capillary barrier effects subjected to freeze-thaw cycles. Dans *Cold Regions Engineering 2015* (p. 34-45).
- Mata, C., & Ledesma, A. (2003). Permeability of a bentonite–crushed granite rock mixture using different experimental techniques. *Geotechnique*, 53(8), 747-758.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovacs (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.
- Metreveli, G., & Frimmel, F. H. (2007). Influence of Na-bentonite colloids on the transport of heavy metals in porous media. Dans *Colloidal transport in porous media* (p. 29-53). Springer.
- Mishra, A. K., Ohtsubo, M., Li, L., & Higashi, T. (2011). Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, 52(1-2), 78-84.
- Mishra, A. K., Ohtsubo, M., Li, L. Y., & Higashi, T. (2010). Influence of the bentonite on the consolidation behaviour of soil–bentonite mixtures. *Carbonates and evaporites*, 25, 43-49.
- Olson, R., & Daniel, D. (1981). Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. *Permeability and groundwater contaminant transport, ASTM STP*, 746, 18-64.
- Ören, A. H., Kaya, A., & Kayalar, A. Ş. (2011). Hydraulic conductivity of zeolite–bentonite mixtures in comparison with sand–bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1343-1353.

- Ouyang, S., & Daemen, J. (1991). Design of bentonite/crushed rock seals. *Geotechnical & Geological Engineering*, 9, 63-72.
- Ouyang, S., & Daemen, J. (1996). Performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole seals. *Sealing of boreholes and underground excavations in rock*, 65-95.
- Ouyang, S., & Daemen, J. J. (1992). *Sealing performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole plugs*. US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC (United States).
- Paumier, S., Foltz, N. T., Pantet, A., Guyonnet, D., Norotte, V., & Didier, G. (2009). *Utilisation de méthodes hydrauliques et mécaniques pour différencier les types de bentonites*. Rencontres geosynthétiques 2009 (p. 377-386).
- Praetorius, S., & Schöber, B. (2017). *Bentonite handbook: Lubrication for pipe jacking*. John Wiley & Sons.
- Sällfors, G., & Öberg-Högsta, A.-L. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical & Geological Engineering*, 20, 65-80.
- Shackelford, C. D., & Scalia, J. (2016). Semipermeable membrane behavior in bentonite-based barriers: Past, present, and future. *Proceedings of GeoVancouver*.
- Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Groundwater*, 27(5), 633-638.
- Sivapullaiah, P., Sridharan, A., & Stalin, V. (2000). Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Canadian geotechnical journal*, 37(2), 406-413.
- Soil, A. C. D.-o., & Rock. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (constant Head)*. ASTM International.
- Soil, A. C. D.-o., & Rock. (2010). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. ASTM International.
- Song, Q., & Yanful, E. K. (2008). Monitoring and modeling of sand-bentonite cover for ARD mitigation. *Water, air, and soil pollution*, 190(1-4), 65-85.
- Stewart, D., Studts, P., & Cousens, T. (2003). The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand. *Applied Clay Science*, 23(1-4), 97-110.
- STP523, A. (2011). ASTM D5084, 22.

- Taheri, S., Ebadi, T., Maknoon, R., & Amiri, M. (2018). Predicting variations in the permeability and strength parameters of a sand-bentonite mixture (SBM) contaminated simultaneously with lead (II) and diesel. *Applied Clay Science*, *157*, 102-110.
- Tong, S., & Shackelford, C. (2016). Standardized hydraulic conductivity testing of compacted sand-bentonite mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, *39*(6), 1015-1029.
- Touze-Foltz, N., Duquennoi, C., & Gaget, E. (2006). Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, *24*(3), 188-197.
- Tripathi, K. (2013). Hydraulic conductivity prediction of saturated sand-bentonite mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, *31*, 581-591.
- Xu, H., Zhu, W., Qian, X., Wang, S., & Fan, X. (2016). Studies on hydraulic conductivity and compressibility of backfills for soil-bentonite cutoff walls. *Applied Clay Science*, *132*, 326-335.

## CHAPITRE 4 ASPECTS MÉTHODOLOGIQUE ET RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

La durabilité des matériaux de recouvrement face aux cycles de gel-dégel est un aspect important associé à la restauration minière en régions froides (Boulanger-Martel, 2019; Boulanger Martel et al., 2020). Habituellement, les effets des cycles de gel-dégel sur les propriétés des géomatériaux sont évalués en suivant l'évolution de propriétés clés à la suite des cycles environnementaux (Chamberlain et al., 1997; Boulanger Martel et al., 2020). En restauration minière, la conductivité hydraulique saturée est souvent utilisée comme paramètre index permettant de quantifier les effets des cycles de gel-dégel (Dagenais, 2005; Boulanger Martel et al., 2016; 2020; Merzouk, 2022). Dans ce projet de recherche, les effets des cycles de gel-dégel sur les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite ont été aussi évaluée afin de statuer sur leur potentiel d'utilisation à titre de matériaux dans la construction de recouvrements miniers en régions froides. Ce chapitre représente, tout d'abord, la méthodologie des essais gel-dégel (G-D) réalisés sur les mélanges du sol-bentonite et ensuite, les résultats obtenus seront mis en œuvre.

### 4.1 Aspects méthodologiques

Des essais de gel-dégel ont été réalisés sur les différents mélanges sol-bentonite testés (CR1-B1, CR1-B2, CR2-B1, S-B1 et R-B1) afin d'évaluer l'influence des phénomènes associés aux cycles de gel-dégel sur  $k_{sat}$ . La Figure 4.1 présente la matrice d'essai qui a été utilisé pour caractériser ces effets. L'influence du type de bentonite et de la granulométrie du matériau de base sur la réponse des mélanges gravier-bentonite face aux phénomènes gel-dégel a d'abord été évaluée. L'effet des cycles de gel-dégel sur les  $k_{sat}$  d'autres mélanges comme les sables- et les résidus-bentonite ont aussi été évalué (Figure 4.1).

L'approche décrite dans Boulanger-Martel et al. (2014, 2016) a été suivie pour réaliser ces essais. Les résultats des essais de  $k_{sat}$  présentés au Chapitre 3 ont constitué la valeur initiale avant cycle de gel-dégel pour chacun des mélanges testés. Ensuite, chaque échantillon a été placé dans un moule isolant spécialement conçu pour simuler un gel et dégel unidimensionnel et soumis à des cycles de gel-dégel. La partie supérieure des échantillons a été recouverte d'une pellicule plastique pour limiter l'évaporation (Figure 4.2). La



congélation a été réalisée en plaçant le dispositif dans un congélateur pendant 48 heures. La température de congélation était de  $-26^{\circ}\text{C}$ , et la décongélation a été effectuée sur 48h à la température ambiante ( $22^{\circ}\text{C}$  en moyenne). Des essais de perméabilité ont été réalisés après 1, 3, 5 et 10 cycles de gel-dégel sur chaque échantillon.

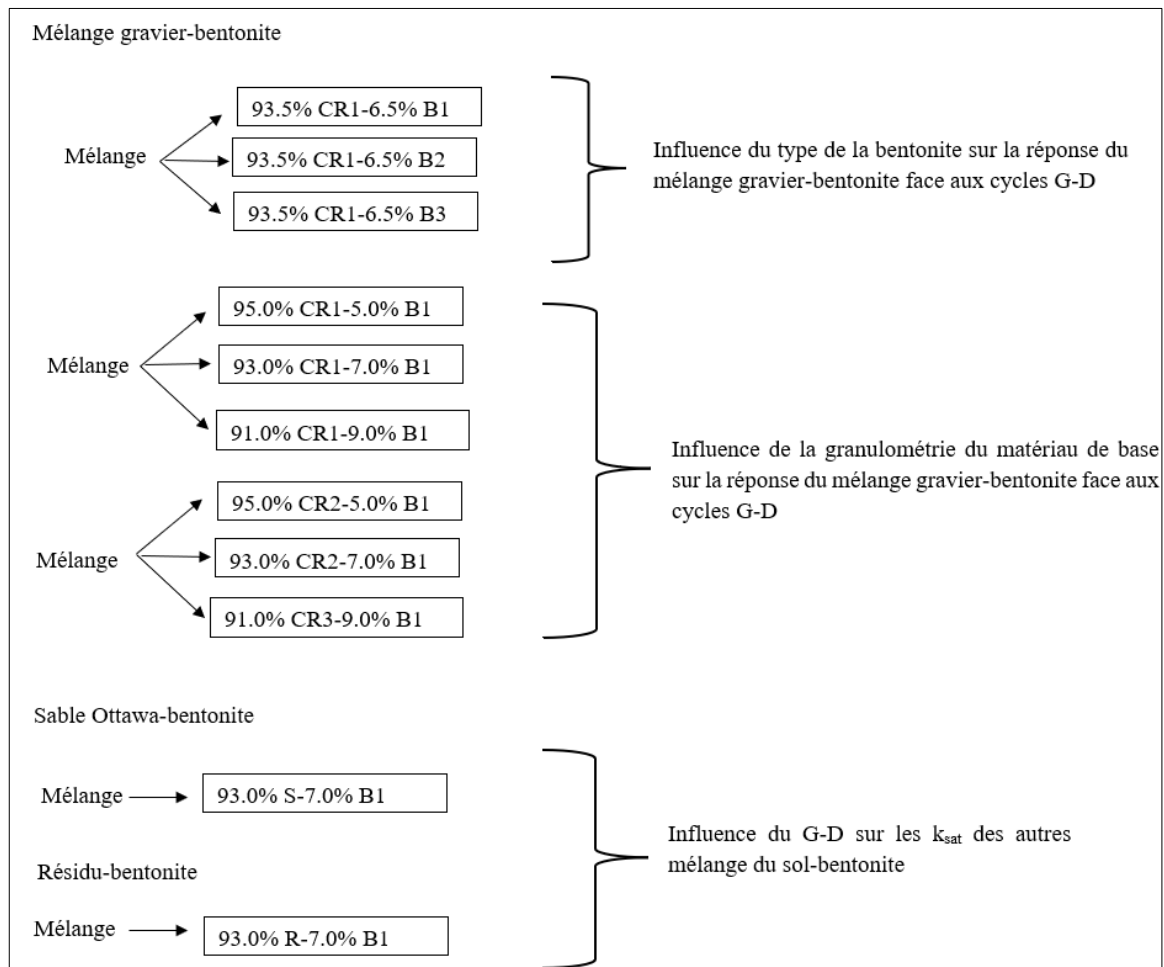


Figure 4.1 Matrice des essais de G-D réalisés.

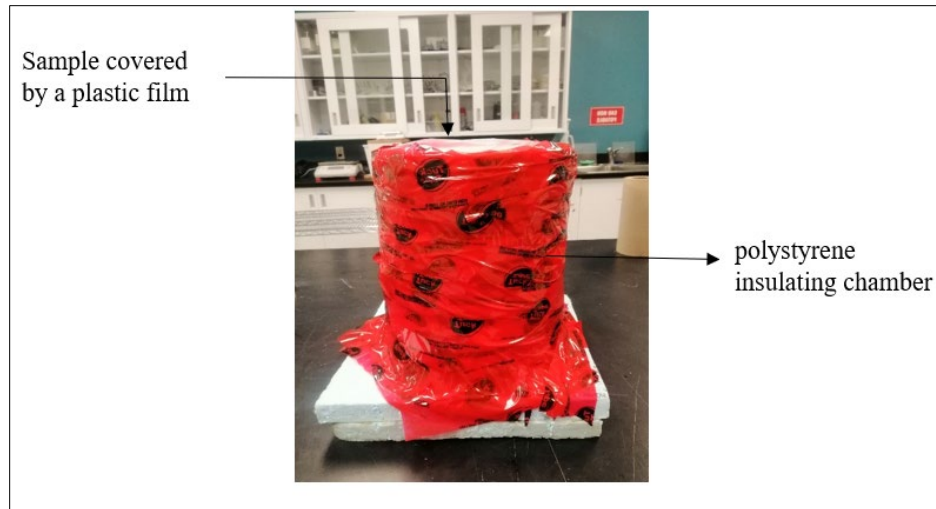


Figure 4.2 Dispositif de l'essai.

## 4.2 Résultats des essais gel-dégel

Les résultats des essais de gel-dégel indiquent que les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1 et CR1-B2 à une teneur en bentonite de 6.5 % augmentent d'un ordre de grandeur après dix cycles de gel-dégel, par rapport à leurs valeurs initiales (Tableau 4.1). Cependant, les résultats obtenus par Boulanger Martel et al. (2016) pour le mélange CR1-B3 à la même teneur en bentonite ont montré que  $k_{sat}$  augmente significativement après trois à cinq cycles et atteint 735 fois sa valeur initiale (Figure 4.3). Sur la base de ces résultats, il est remarqué que B3 a été beaucoup plus influencée par le phénomène de gel-dégel que B1 et B2. Aucune variation de volume importante des échantillons testés n'a été observée après 10 cycles de gel-dégel. Quelques craques ont toutefois été observées à la surface de certains échantillons de ce mélange gravier-bentonite.

Tableau 4.1 Résultats des essais G-D.

		$k_{\text{sat}}$ (cm/s)				
Mélange	Teneur en bentonite (%)	0 cycle G/D	1 cycle G/D	3 cycles G/D	5 cycles G/D	10 cycles G/D
CR1-B2	6.5	$4.0 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$
CR1-B3	6.5	$2.2 \times 10^{-7}$	$3.7 \times 10^{-6}$	$3.8 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-5}$
CR1-B1	5.0	$5.8 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$9.4 \times 10^{-6}$	$9.5 \times 10^{-6}$
	6.5	$2.9 \times 10^{-7}$	$8.1 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-6}$
	7.0	$9.5 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-7}$	$9.6 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$6.8 \times 10^{-7}$
	9.0	$4.0 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$6.8 \times 10^{-7}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-7}$
CR2-B1	5.0	$7.4 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$9.4 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-5}$
	7.0	$6.9 \times 10^{-7}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$
	9.0	$3.6 \times 10^{-7}$	$9.5 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$
R-B1	7.0	$5.6 \times 10^{-7}$	$6.8 \times 10^{-7}$	$7.0 \times 10^{-7}$	$7.6 \times 10^{-7}$	$8.2 \times 10^{-7}$
S-B1	7.0	$4.7 \times 10^{-7}$	$5.6 \times 10^{-7}$	$5.2 \times 10^{-7}$	$4.9 \times 10^{-7}$	$5.8 \times 10^{-7}$

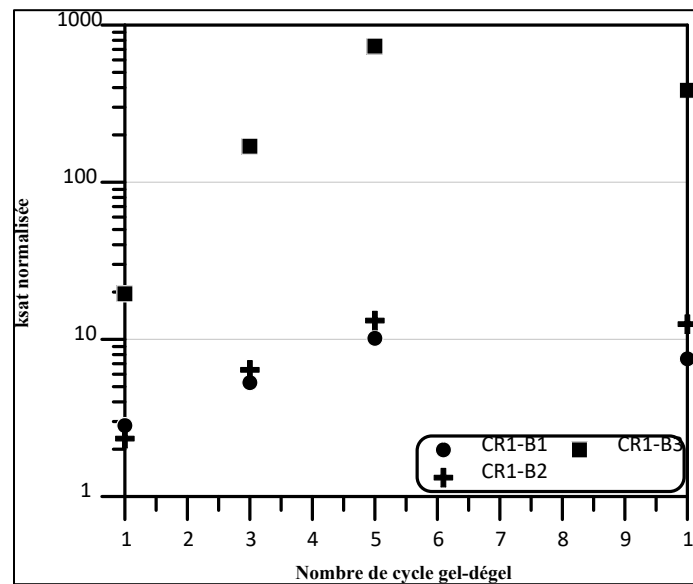


Figure 4.3 La conductivité hydraulique normalisée en fonction du nombre de G-D pour CR1-B1, CR1-B2 et CR1-B3 à une teneur en bentonite de 6.5%.

Les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges CR2-B1 à des teneurs en bentonite de 5.0, 7.0 et 9.0 % ont été augmentées d'un à deux ordres de grandeur après 10 cycles de gel-dégel, cependant, celles des mélanges CR1-B1 aux mêmes teneurs en bentonite n'ont été augmentées que d'un ordre de grandeur (Tableau 4.1 et Figure 4.4). Autrement dit, les mélanges CR2-B1 ont été beaucoup plus influencés par le phénomène de gel-dégel que les mélanges CR1-B1. Cette disparité s'explique essentiellement par la différence de la granulométrie des matériaux de base testés (CR1 présente une granulométrie étalée et CR2 présente une granulométrie semi-étalée).

Aucune variation de volume importante des échantillons testés n'a aussi été observée après 10 cycles de gel-dégel pour les mélanges CR2-B1. Quelques craques ont toutefois été observées à la surface de certains échantillons. Pour les mélanges résidus-bentonite et sable-bentonite à une teneur en bentonite de 7.0%, les valeurs de  $k_{sat}$  ne varient pas, même après 10 cycles gel-dégel (Figure 4.5).

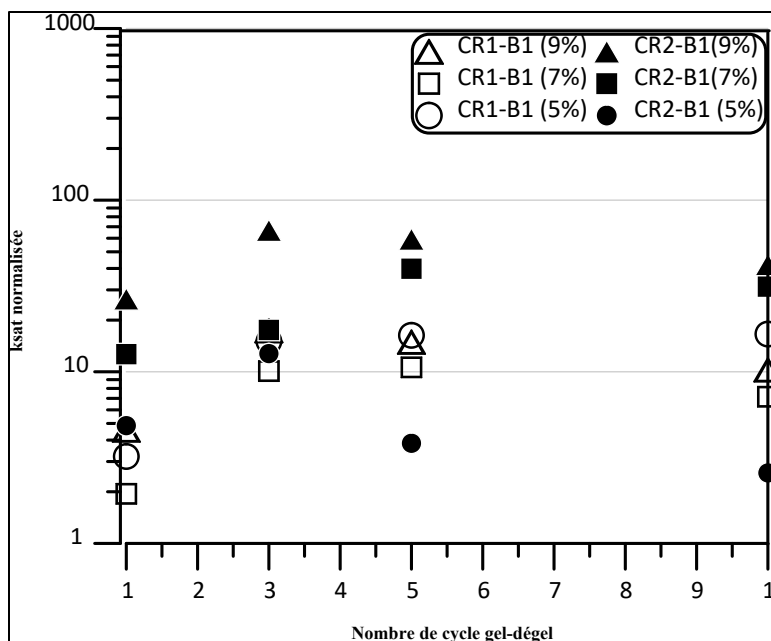


Figure 4.4 La conductivité hydraulique normalisée en fonction du nombre de G-D pour les mélanges CR1-B1 et CR2-B1.

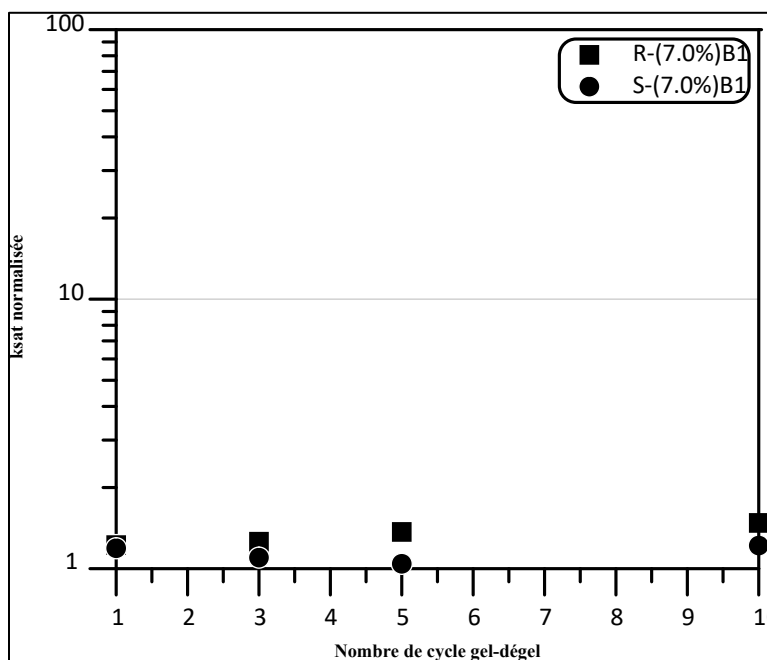


Figure 4.5 La conductivité hydraulique normalisée en fonction du nombre de G-D pour les mélanges S-B1 et R-B1 à une teneur en bentonite de 7.0%.

## CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce projet de recherche est de montrer le potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite dans la construction des structures d'entreposage des rejets miniers. Plusieurs essais de perméabilité ont été réalisés pour optimiser la conductivité hydraulique saturée des différents mélanges sol-bentonite, en prenant en compte à la fois les propriétés de la bentonite et celles du matériau de base. De plus, des essais de gel-dégel ont été effectués afin d'évaluer l'impact de ce phénomène sur les valeurs  $k_{sat}$  des mélanges testés. Ce projet visait également à développer un modèle prédictif de  $k_{sat}$  qui sera précieux dans les phases préliminaires de la conception. Les premières sections abordent en détail les facteurs qui influencent la valeur de  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite, et plus particulièrement les effets des cycles de gel-dégel. Ensuite, le potentiel d'utilisation de ces mélanges dans la construction des structures d'entreposage et de confinement et des recouvrements miniers sera discuté. La deuxième partie met en lumière l'importance cruciale d'utiliser un modèle prédictif de la conductivité hydraulique des mélanges sol-bentonite lors des phases préliminaires d'un projet, en soulignant ses avantages pour la prise de décision en matière de conception et de sélection des matériaux de construction. Enfin, les défis et les difficultés rencontrés tout au long de ce projet de recherche seront également présentés.

### 5.1 Potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite

Plusieurs propriétés et caractéristiques devraient être étudiées pour déterminer le potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite dans la construction des structures d'entreposage des rejets et des recouvrements miniers telles que; la conductivité hydraulique saturée, les propriétés hydriques non saturées, la résistance mécanique, la durabilité (résistance aux phénomènes de gel-dégel et de mouillage-séchage), le potentiel de lixiviation de contaminant, le comportement hydraulique, compatibilité avec les rejets miniers et le coût d'exploitation et de construction. La présente section vise à évaluer le potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite sur la base des propriétés hydriques obtenues lors de cette étude, mais aussi à partir des propriétés non-saturées de mélanges sol-bentonite tirés de la littérature. Une attention particulière sera portée à la présentation de résultats de durabilité

des mélanges testés face aux cycles de gel-dégel afin de confirmer l'utilisation potentielle de ces mélanges dans des ouvrages géotechniques situés près de la surface du sol.

### **5.1.1 Conductivité hydraulique saturée**

La conductivité hydraulique saturée est un des paramètres clés à prendre en considération lors de la phase de conception et du choix de matériaux utilisés dans la construction des structures de confinement et d'entreposage des rejets miniers ainsi que dans la construction des recouvrements miniers. Pour les mélanges sol-bentonite,  $k_{sat}$  dépend de plusieurs facteurs tels que le type et la teneur en bentonite, la granulométrie du matériau de base, l'indice de vides de la bentonite dans le mélange, le degré de compactage et les propriétés de fluide en écoulement (la viscosité et la densité de fluide). Certains de ces facteurs sont discutés davantage et mis en contexte d'après les résultats obtenus dans ce qui suit.

#### **5.1.1.1 Effet de la teneur en bentonite**

Le troisième chapitre de ce mémoire montre que les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite testés dépend essentiellement des propriétés de la bentonite. Les résultats des essais de perméabilité montrent que l'ajout de la bentonite au matériau de base permet de réduire considérablement les  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite. Ils indiquent aussi que plus la teneur en bentonite est importante, plus les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite seront faibles. La bentonite a une capacité de gonflement importante en présence d'eau (gonfle de 10 à 15 fois de son volume initial) (Laird, 2006; Arifin, 2008), ce qui remplit les vides entre les particules du sol. À des teneurs en bentonite suffisamment élevées, la bentonite peut remplir complètement les vides, réduisant ainsi la porosité effective du mélange. Ce phénomène explique bien la diminution de  $k_{sat}$  en fonction de la teneur en bentonite. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Chapuis (2002b) qui a montré que les  $k_{sat}$  des mélanges sable-bentonite diminuent de  $8.0 \times 10^{-4}$  à  $7.0 \times 10^{-9}$  cm/s pour des teneurs en bentonite de 2.0% à 10.0%. Boulanger Martel et al. (2016) ont aussi trouvé que les  $k_{sat}$  des mélanges gravier-bentonite varient de  $3.5 \times 10^{-7}$  à  $4.8 \times 10^{-8}$  cm/s pour des teneurs en bentonite de 5.0% à 8.0%.

Les résultats obtenus montrent également qu'il y a une forte corrélation entre les valeurs de  $k_{sat}$  et l'indice des vides de la bentonite dans le mélange ( $e_b$ ). Plus  $e_b$  est faible, plus  $k_{sat}$

sera faible. On peut conclure que l'écoulement dans un tel mélange est principalement contrôlé par les propriétés de la bentonite, en particulier son indice des vides dans le mélange. Ces conclusions ont également été obtenues par plusieurs auteurs tels que Kenney et al. (1992), Studds et al. (1998) et Tripathi (2013), qui ont montré que l'indice des vides de la bentonite est un paramètre critique qui permet de bien quantifier la capacité de la bentonite à contrôler l'écoulement de l'eau.

### 5.1.1.2 Effet du type de la bentonite

D'après les résultats obtenus, il est également observé que le type de bentonite n'a pas une grande influence sur  $k_{sat}$  des mélanges testés malgré la différence des propriétés de base des bentonites testées. Il est vrai que le type de bentonite peut exercer une influence importante sur  $k_{sat}$  d'un mélange sol-bentonite, notamment puisque différents types de bentonite peuvent avoir des propriétés différentes en termes de gonflement, de rétention d'eau et d'interaction avec le sol (Olson and Daniel, 1981). Toutefois, dans cette étude, les trois bentonites testées sont de type sodique et cela peut expliquer les valeurs similaires de  $k_{sat}$  obtenues. Il est observé que 6.5 % de bentonite était suffisant pour générer des  $e_b$  similaires, malgré les différences en indice de gonflement libre observé pour les trois types de bentonite testés.

Une différence de  $k_{sat}$  aurait pu être observée si des bentonites calciques et sodiques avaient été testées. Plusieurs études ont montré que la bentonite sodique a un bon potentiel de gonflement par rapport à celui de la bentonite calcique (Olson and Daniel, 1981; Alther, 1987; Benkhelifa et Daoud, 1998; Callot, 1983). Le rapport de gonflement libre entre la bentonite sodique et la bentonite calcique est d'environ 3, expliquant les faibles  $k_{sat}$  des mélanges avec bentonite sodique par rapport à celles avec la bentonite calcique (Ait Saadi, 2003).

De plus,  $k_{sat}$  est considérée la propriété la plus variable de toutes les propriétés géotechniques. En comparant des résultats des essais de perméabilité effectués sur le même matériau dans le même laboratoire ou dans des laboratoires différents et en utilisant des procédures expérimentales identiques ou différentes, il n'est pas rare d'observer des variations atteignant jusqu'à un demi-ordre de grandeur, voire davantage dans certains cas (Harr, 1999). Également, la technique de validation du degré de saturation se diffère d'une



étude à une autre ce qui peut avoir une influence considérablement sur la valeur de  $k_{sat}$  obtenue (Chapuis et al 1989; Chapuis 2012). Dans cette étude, le perméamètre à paroi flexible a été utilisé pour déterminer la conductivité hydraulique des mélanges de CR1-B1 et CR1-B2. Tandis que Boulanger Martel et al (2016) ont utilisé la cellule triaxiale pour mesurer la perméabilité du mélange CR1-B3. Ainsi, le paramètre de Skempton  $\beta$  a été utilisé par Boulanger Martel et al (2016) pour vérifier la saturation des mélanges comme décrit par Black et Lee (1973). Toutefois, dans cette étude, une vérification directe (Chapuis et al. 1989) a plutôt été suivie.

### **5.1.1.3 Effet de la granulométrie de matériau de base**

L'effet de la granulométrie du sol de base sur les  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite est un aspect crucial à prendre en compte dans la conception d'ouvrages géotechniques constitués de mélanges sol-bentonite. Cette étude a démontré que plus la granulométrie du matériau de base est étalée et plus le pourcentage des particules fines du sol est important, plus la valeur de  $k_{sat}$  du mélange est faible, pour une teneur en bentonite similaire. Ces résultats concordent bien avec ceux trouvés par Koerner and Daniel (1997) qui ont montré qu'un matériau de base avec une granulométrie plus étalée requiert une plus faible proportion de bentonite qu'un matériau de granulométrie uniforme pour atteindre une même la valeur de  $k_{sat}$ . Chapuis et al, (2002), Sivapullaiah et al., (2000) et Wong and Haug (1991) ont montré également que plus le pourcentage des particules fines dans le matériau de base est important, plus la valeur de  $k_{sat}$  est faible.

### **5.1.2 Stabilité interne**

La stabilité interne d'un mélange sol-bentonite est un aspect crucial dans la construction de barrières d'étanchéité. Elle se réfère à la capacité du mélange à maintenir son intégrité structurelle et à éviter la ségrégation des particules et l'érosion interne. Chapuis (2002) a montré que pour des teneurs de bentonite inférieures à 5.0%, les forces d'écoulement et l'érosion interne peuvent entraîner un enlèvement de la bentonite ce qui peut influencer énormément les valeurs de  $k_{sat}$ . Ces résultats ont été obtenus sur des mélanges de sable-bentonite. Dans cette étude, un enlèvement de la bentonite a été observé pour certains mélanges gravier-bentonite à 5.0% bentonite. Ces essais ont été ignorés et repris. Toutefois,

ces observations viennent démontrer l'importance de s'assurer de la compatibilité entre le matériau de base, la bentonite (et la proportion de bentonite) et les gradients attendus sur le terrain.

### **5.1.3 Courbe de rétention d'eau CRE**

La capacité de rétention d'eau est un paramètre important à déterminer pour l'utilisation des mélanges sol-bentonite en restauration minière comme lors de la construction des couvertures multicouches qui se basent sur les effets de barrières capillaires telles que les couvertures avec effets de barrière capillaire (Aubertin et al. 2002; Demers et al., 2021). Cette propriété n'a pas été investiguée dans le cadre de ce projet, mais il paraît important qu'on la mentionne. Boulanger Martel et al (2016) ont déterminé la courbe de rétention d'eau de trois mélanges gravier-bentonite constitués du gravier CR1 et de la bentonite B3. Des mélanges gravier-bentonite à 5.0%, 6.5% et 8.0% ont été testés. Les valeurs de pression d'entrée d'air (AEV) de ces matériaux se trouvent entre 8 et 20 KPa. Boulanger-Martel et al. (2016) ont démontré le potentiel de ces matériaux à constituer une couche de rétention d'humidité et créer des effets de barrière capillaire efficaces. Cependant, les matériaux testés par Boulanger-Martel et al. (2016) sont toutefois significativement affectés par les cycles de gel-dégel. Aubertin et al (1999) ont réalisé des mesures de CRE pour des résidus miniers mélangés avec la bentonite. Des valeurs d'entrée d'air entre 27 et 81 kPa ont été trouvées pour des mélanges ayant de 6.0 à 8.0% de bentonite. Vu et al. (2014) ont trouvé des valeurs de AEV entre 2 et 25 kPa pour des mélanges gravier-bentonite dont la teneur en bentonite varie de 1.0% à 5.0%. Pour des mélanges du sable-bentonite (8.0% de bentonite), des valeurs inférieures entre 10 et 20 kPa ont été déterminées par Stoicescu et al (1996, 1998). Ces études montrent que les AEV des mélanges sol-bentonite sont importantes et qu'elles augmentent avec l'augmentation de la teneur de bentonite (Stoicescu et al. 1996; Aubertin et al., 1998 ; Vu et al., 2014; Mata et al., 2005). On peut donc conclure que les matériaux testés dans le cadre de cette étude pourraient également avoir un bon potentiel de rétention d'eau (des valeurs de AEV importantes).

#### 5.1.4 Résistance aux cycles de gel-dégel

La durabilité des matériaux de recouvrement face aux cycles de gel-dégel est un aspect important associé à la restauration minière en régions froides (Boulangier-Martel, 2019; Boulangier-Martel et al., 2020). Le Chapitre 4 présente les différents résultats des essais de gel-dégel réalisés sur différents types de mélange sol-bentonite. Ces résultats montrent que B3 a été beaucoup plus influencée par les phénomènes de gel-dégel que B1 et B2 et cela peut être expliqué par la différence de leurs propriétés de base (la granulométrie, la surface spécifique, la plasticité et le potentiel de gonflement) comme montré dans le Chapitre 3. Possiblement que les bentonites B1 et B2 ont des propriétés de base les rendant moins sensibles aux cycles de gel-dégel. Ils peuvent donc maintenir une structure plus stable durant les cycles du gel-dégel. Cela peut expliquer la faible augmentation de la conductivité hydraulique des mélanges CR1-B1 et CR1-B2 après dix cycles de gel-dégel par rapport à celle du mélange CR1-B3. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en considération les propriétés des bentonites dans la conception de mélanges utilisés dans la construction de structures d'entreposage des rejets miniers. Aussi, les essais de G-D réalisés ont montré que les mélanges CR2-B1 ont été beaucoup plus influencés par le phénomène de gel-dégel que les mélanges CR1-B1. D'après ces résultats, on peut conclure que la distribution granulométrique du matériau de base peut influencer la réponse du mélange face aux cycles de gel-dégel. Lors du processus de gel-dégel, il peut y avoir une réorganisation des particules de bentonite. Cette réorganisation dépend de la granulométrie du matériau de base, ce qui pourrait entraîner un changement de structure interne de mélange et par la suite influencer de la conductivité hydraulique du mélange. Townsend et Casthy (1963) ont observé que la taille et la distribution des grands pores dans les mélanges sol-bentonite sont des facteurs importants dans la ségrégation de la glace. Wong et Haug (1991), Haug et Wong (1993) et Kraus et al (1997) ont montré que les mélanges du sol-bentonite ont un bon potentiel d'autocicatrisation mais que ce potentiel dépend toujours de la distribution et la taille des pores. Dans le cas de cette étude, il est suspecté que la bentonite remplisse mieux les vides du gravier de granulométrie étalée que ceux du gravier de granulométrie uniforme (et avec un faible pourcentage des particules fines). Par conséquent la taille des pores des mélanges CR1-B1 est plus faible par rapport à celle des mélanges CR2-B1, ce qui pourrait expliquer la différence des résultats obtenus.

Il est aussi suggéré dans la littérature que la différence de compactage entre un mélange avec un sol de granulométrie étalée et un autre avec une granulométrie uniforme peut également expliquer la différence de réponse des mélanges face aux phénomènes de gel-dégel puisque le compactage peut influencer la porosité et indirectement la conductivité hydraulique du mélange. Une observation de la microstructure des mélanges gravier-bentonite testés avant et après les cycles du gel-dégel serait importante afin de bien comprendre les changements et les modifications de la structure interne. Plusieurs études ont montré l'efficacité de l'ajout de bentonite à un sol granulaire pour en diminuer la valeur de  $k_{sat}$  mais surtout pour minimiser les effets du gel en limitant la migration d'eau vers le front de gel (Wong et Haug, 1991; Haug et Wong, 1993).

Pour les mélanges résidus-bentonite et sable-bentonite à une teneur en bentonite de 7.0%, les  $k_{sat}$  ne varient pas même après 10 cycles gel-dégel. Des résultats similaires ont été obtenus par Haug and Wong (1993), Kraus et al., (1997), Chapuis (1990), Chamberlain et Gow (1997) et Aubertin et al., (1999), qui ont démontré que les mélanges sable- et résidus-bentonite sont moins sensibles aux effets des cycles de gel-dégel. L'étude de Fall et al. (2009) a aussi montré que les changements de  $k_{sat}$  de mélanges de résidu en pâte-bentonite sont négligeables après 5 à 6 cycles de gel-dégel et même après des cycles de mouillage-séchage.

En général, d'après les résultats des essais de gel-dégel, il est constaté que les mélanges de sable-bentonite et de résidus-bentonite résistent généralement bien aux cycles gel-dégel. Pour les mélanges gravier-bentonite, la réponse aux cycles de gel-dégel diffère d'un mélange à l'autre. Il est recommandé dans tel cas de bien sélectionner le type de bentonite et la granulométrie du matériau base. Il est aussi essentiel de souligner que la réponse des mélanges sol-bentonite aux cycles de gel-dégel est considérée comme un processus complexe qui dépend de nombreux facteurs, notamment les propriétés de base de la bentonite, celles du matériau de base, la composition globale du mélange, l'interaction entre les différents composants du mélange et les conditions environnementales et la méthodologie de l'essai.

### 5.1.5 Exigences et potentiel d'utilisation des mélanges sol-bentonite testés

La construction des structures d'entreposage ou de confinement des rejets miniers nécessite des matériaux à faible conductivité hydraulique saturée afin de limiter l'infiltration de l'eau (Parker et al., 1993; Chapuis, 1990, 2002 ; Chalermyanont et al., 2004; Maqsoud et al., 2021). De plus, dans les cas d'utilisation dans la construction des recouvrements miniers comme les CEBC, les matériaux devraient également avoir une valeur de  $k_{\text{sat}}$  beaucoup plus faible que celle des matériaux utilisés dans les deux couches de bris capillaire (une différence de trois ordres de grandeur) et avoir une AEV importante (supérieure aux valeurs d'entrée d'eau (WEV) de deux couches de bris capillaire; Aubertin et al., 2000; Demers et al 2021). L'utilisation en conditions nordiques exige également que ces matériaux puissent être également résistants aux cycles de gel-dégel. Dans le contexte de la construction de structures de stockage des rejets miniers, il est crucial que la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite soit maintenue dans une plage allant de  $10^{-6}$  cm/s à  $10^{-8}$  cm/s (Chapuis, 1990 ; Parker et al., 1993 ; Marcoen et al., 2001 ; Pierson et al., 2004 ; Souli et al., 2008; Maqsoud et al. 2021). Pour les cas d'utilisation dans la construction des CEBC, la valeur de  $k_{\text{sat}}$  du mélange devrait être inférieure à  $1 \times 10^{-7}$  cm/s et avoir une AEV supérieure à la WEV des matériaux de couches de bris capillaires (Demers et al., 2021). Également, la bentonite doit être du type sodique et doit présenter un fort potentiel de gonflement afin d'assurer un bon contact avec le sol, ce qui permet de colmater les fissures existantes et les fissures qui peuvent se développer à l'avenir (Yilmaz et Marschalko, 2014).

Actuellement, en environnement minier, les mélanges sol-bentonite sont principalement utilisés pour créer des noyaux imperméables dans les digues minières. Plusieurs études ont recommandé des teneurs en bentonite optimales, généralement entre 5,0 % et 8,0 % pour la bentonite sodique et entre 9,0 % et 15,0 % pour la bentonite calcique (Chapuis, 1990; Egloffstein, 2001; Graham et al., 2001; Montañez, 2002).

En ce qui concerne les valeurs de  $k_{\text{sat}}$  des mélanges sol-bentonite testés dans cette étude, les résultats ont montré que les mélanges CR1-B1, CR1-B2, R-B1 et S-B1 présentent un potentiel intéressant en tant que matériaux de construction pour les structures de confinement et pour certains recouvrements miniers. Les valeurs de  $k_{\text{sat}}$  des mélanges CR1-

B1 varie de  $5.8 \times 10^{-7}$  à  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s pour des teneurs en bentonite de 5.0% à 9.0%, pour S-B1, les valeurs de  $k_{\text{sat}}$  sont entre  $9.5 \times 10^{-7}$  et  $9.0 \times 10^{-8}$  cm/s et pour T-B1, des  $k_{\text{sat}}$  entre  $2.3 \times 10^{-6}$  et  $2.1 \times 10^{-7}$  cm/s ont été trouvées pour les mêmes teneurs en bentonite. Ces valeurs de  $k_{\text{sat}}$  correspondent bien aux valeurs exigées décrites précédemment. De plus, ces mélanges résistent aux cycles de gel-dégel, ce qui les rend adaptés aux environnements nordiques. Ces matériaux peuvent également constituer une alternative intéressante aux sols argileux, qui sont souvent sensibles aux cycles gel-dégel. De plus, Boulanger Martel et al. (2016) ont trouvé des pressions d'entrée d'air des mélanges graviers-bentonite entre 8 et 20 kPa pour des teneurs en bentonite allant de 5.0% à 8.0% et de 8 kPa pour le mélange de 6.5 % de bentonite.

La bentonite, en tant que composant clé dans les mélanges sol-bentonite utilisés, joue un rôle crucial dans l'étanchéité des ouvrages miniers. En termes de coût d'achat, il est mentionné que plusieurs facteurs influent sur la variation des prix de la bentonite. La qualité de la bentonite, mesurée par sa pureté et ses propriétés d'expansion, peut influencer significativement son coût. Selon l'annuaire des minéraux au Canada (2007), le coût de la bentonite brute en vrac en usine au Wyoming est entre 36 et 82 \$US/t. L'utilisation de la bentonite et des argiles en générale est importante au Canada dans différents domaines (Annuaire des minéraux au Canada, 2007).

Étant donné la hausse d'utilisation et de coût de la bentonite en poudre, il est essentiel d'optimiser les propriétés hydrauliques des mélanges sol-bentonite, notamment en réduisant la quantité de bentonite nécessaire pour atteindre une valeur de  $k_{\text{sat}}$ . Il est suggéré qu'un mélange contenant 7.0 % de bentonite pourrait offrir d'excellentes performances; les valeurs de  $k_{\text{sat}}$  pour CR1-B1, S-B1 et R-B1 sont inférieures à  $10^{-6}$  cm/s même après 10 cycles G-D.

Il est important de souligner que la sélection du mélange optimal pour la conception ne dépend pas seulement de la conductivité hydraulique saturée, mais aussi du comportement mécanique du mélange, de sa durabilité et de sa capacité de rétention d'eau. Il convient donc de déterminer d'autres propriétés des mélanges sol-bentonite telles que la résistance au cisaillement et à la traction/compression et la courbe de rétention d'eau. Des essais en conditions réelles devraient être entrepris pour valider les performances de ces mélanges sol-bentonite sur le terrain.

## 5.2 Prédiction de $k_{sat}$

Les essais de perméabilité au laboratoire prennent du temps, entre 10 et 15 jours en perméamètre à paroi flexible, et ils peuvent être coûteux. De plus, le contrôle de certains paramètres tel que la saturation du mélange, l'hydratation et le gonflement de la bentonite durant l'essai peut-être complexe et affecter beaucoup les résultats (Chapuis, 1990). C'est pourquoi l'estimation de  $k_{sat}$  par des modèles prédictifs s'avère une solution intéressante à un stade précoce de conception. Cela permet d'obtenir une valeur préliminaire qui peut être utilisée pour le choix des matériaux et estimer les coûts associés. Le chapitre 3 met en évidence que certains modèles de prédiction de  $k_{sat}$  (Chapuis, 1990; Sivapullaiah et al., 2002; Tripathi, 2013; KCM, Mbonimpa et al., 2002) ne sont pas tout à fait appropriés pour estimer la valeur de  $k_{sat}$  de l'ensemble des mélanges sol-bentonite testés dans cette étude. Ces modèles conduisent globalement à une sous-estimation des  $k_{sat}$  de la plupart des mélanges du sol-bentonite testés. Cette sous-estimation de  $k_{sat}$  particulièrement présente pour les mélanges gravier-bentonite peut être attribuée au fait que ces modèles n'ont pas été conçus pour estimer les  $k_{sat}$  de ce type de matériau; ils ont été développés pour les mélanges sable/silt-bentonite. D'autre part, la détermination de la limite de liquidité de certains mélanges sol-bentonite peut être difficile (mélanges du gravier-bentonite) à obtenir, ce qui limite l'utilisation de certains des modèles existants. Par conséquent, il est apparu important de développer un modèle prédictif spécifique pour les  $k_{sat}$  des mélanges de sol-bentonite utilisés dans la construction des structures d'entreposage des rejets miniers. Trois propositions de modification du modèle de KCM ont été suggérées dont deux seulement ont été présentées et expliquées en détails dans le chapitre 4. En général, ces équations prennent en compte les propriétés de la bentonite, du matériau de base et de fluide en écoulement.

L'équation 3.21 est recommandée pour prédire les  $k_{sat}$  de tous les types de mélanges sol-bentonite et plus spécifiquement pour les mélanges ayant des matériaux de base de granulométrie uniforme et pour des limites de liquidités de bentonites entre 150 et 500%. Et dans le cas d'utilisation des mélanges sol-bentonite dans les structures d'entreposage, les matériaux de base utilisés sont généralement de coefficient d'uniformité supérieur à 5. Dans tel cas d'utilisation, l'équation 3.20 est préférée pour estimer avec précision  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite ayant des limites de liquidités de bentonites entre 150 et 352%. Il

est essentiel de souligner que ces équations ne peuvent être utilisées qu'au stade préliminaire d'un projet, dans le but d'obtenir des valeurs préliminaires. Elles doivent ensuite être confirmées par des essais en laboratoire ou sur le terrain.

### **5.3 Les défis et les difficultés rencontrés**

Au cours de cette étude, divers défis et difficultés ont été rencontrés, ce qui a contribué à enrichir la compréhension du comportement hydrique des mélanges sol-bentonite. L'un des principaux défis qui ont été rencontrés est lié à la réalisation des essais de perméabilité avec le perméamètre à paroi flexible. Environ vingt essais de perméabilité ont été effectués, parmi lesquels l'essai avec 5.0 % de bentonite a été répété trois fois. Au cours de l'essai sur le mélange CR1 à 5.0% bentonite, on a observé que l'écoulement de l'eau entraîne un enlèvement de la bentonite dans le mélange, ce qui a eu pour conséquence une augmentation brusque de la conductivité hydraulique saturée. Cette observation a soulevé des questions importantes sur la stabilité interne des échantillons à faible teneur en bentonite. D'un autre côté, chaque essai de perméabilité nécessite une période de saturation de 10 à 15 jours, au cours de laquelle on a effectué des suivis et des mesures de  $k_{sat}$  à des intervalles de 24 à 48 heures. Cette approche a permis d'obtenir des données détaillées sur la variation de  $k_{sat}$  avec le temps de saturation.

En plus, un seul essai de gel-dégel de dix cycles demande une période plus de 40 jours afin de mesurer la valeur de  $k_{sat}$  du mélange après gel-dégel. Au total, 11 essais de gel-dégel ont été réalisés dans le cadre de ce projet de recherche pendant une période de 10 mois. Cette démarche visait à évaluer la résistance des mélanges sol-bentonite aux cycles du gel-dégel, ce qui s'est avéré être une tâche exigeante, mais essentielle pour comprendre la stabilité et la résistance des mélanges sol-bentonite aux conditions environnementales.



## CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 6.1 Conclusions

En conclusion, ce projet de recherche a examiné l'utilisation potentielle des mélanges sol-bentonite dans la construction des structures de confinement et d'entreposage des rejets miniers. La disponibilité limitée des matériaux fins à proximité des sites miniers peut compliquer la construction et entraîner des coûts plus élevés. C'est pourquoi cette étude a exploré une solution intéressante pour ce problème.

Les résultats de caractérisation hydrogéologique ont montré que les valeurs de  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1 et CR2-B1 varient de  $5.8 \times 10^{-7}$  à  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s et  $7.7 \times 10^{-6}$  à  $3.6 \times 10^{-7}$  respectivement pour des teneurs en bentonite de 5.0% à 9.0%. Pour les mélanges S-B1 et R-B1, les valeurs de  $k_{sat}$  sont entre  $9.5 \times 10^{-7}$  et  $9.0 \times 10^{-8}$  cm/s et  $2.3 \times 10^{-6}$  et  $2.1 \times 10^{-7}$  cm/s respectivement pour les mêmes teneurs en bentonite. Ces résultats ont indiqué que  $k_{sat}$  est fortement influencée par la teneur de la bentonite, l'indice des vides de la bentonite dans le mélange et la granulométrie du matériau de base. Également, les effets de gel-dégel sur les  $k_{sat}$  des mélanges S-B1 et R-B1 étaient très limités, cependant, l'impact de G-D a varié les valeurs de  $k_{sat}$  d'un ordre grandeur pour les mélanges CR1-B1 et CR1-B2 et de deux ordres de grandeur celles de CR2-B1. D'après ces résultats, il est constaté que les mélanges CR1-B1, CR1-B2, R-B1 et S-B1 présentent les propriétés exigées pour être utilisés comme matériaux à faible conductivité hydraulique dans les structures d'entreposage des rejets miniers.

En plus, dans le but de faciliter la conception et le choix des matériaux dès les premières phases du projet, un modèle prédictif de la conductivité hydraulique saturée des mélanges sol-bentonite a été développé. Ce modèle, basé sur le modèle de KCM (Mbonimpa et al., 2002) et prend en compte les propriétés de la bentonite, du matériau de base et du fluide en circulation. Également, il tient en compte l'effet de l'écoulement en fonction de l'indice des vides de la bentonite dans le mélange  $e_b$ .

Deux équations ont été proposées; L'équation 3.21 est recommandée pour prédire les  $k_{sat}$  de tous les types de mélanges sol-bentonite et plus spécifiquement pour les mélanges ayant des matériaux de base de granulométrie uniforme et pour des limites de liquidités de bentonites entre 150 et 500%. Et dans le cas d'utilisation des mélanges sol-bentonite dans

les structures d'entreposage, les matériaux de base utilisés sont généralement de coefficient d'uniformité supérieur à 5. Dans tel cas d'utilisation, l'équation 3.20 est préférée pour estimer avec précision  $k_{sat}$  des mélanges sol-bentonite ayant des limites de liquidités de bentonites entre 150 et 352%. De façon générale, les résultats d'application de ces équations pour différents mélanges sol-bentonite sont généralement prometteurs. Cependant, il est important de souligner la nécessité d'approfondir la compréhension du comportement des mélanges sable-bentonite avec  $C_{UG}$  entre 1 et 6.

## 6.2 Recommandations

Pour conclure, ce projet de maîtrise a révélé le potentiel d'utilisation des mélanges de sol-bentonite en tant que matériaux de construction à faible perméabilité pour les structures de confinement des résidus miniers, notamment les digues et les recouvrements miniers. De plus, le développement d'un modèle prédictif de la conductivité hydraulique saturée représente une contribution importante. Des recherches supplémentaires sont toutefois nécessaires pour mieux comprendre le comportement mécanique et la durabilité des mélanges de sol-bentonite testés. Une évaluation de la performance de ces mélanges sur le terrain est recommandée afin de vérifier l'absence ou non des interactions chimiques entre le mélange et le fluide en circulation, notamment les échanges ioniques en présence de DMA qui pourrait réduire la capacité de gonflement de la bentonite. Il est également conseillé d'examiner l'impact de la végétalisation, car les racines pourraient altérer les propriétés de la bentonite et réduire sa capacité à contrôler la percolation. Il est important aussi d'évaluer la stabilité interne de différents mélanges à différents teneurs de bentonite. La détermination de la courbe de rétention et du coefficient de diffusion d'oxygène des mélanges sol-bentonite est également recommandée dans le cas d'utilisation de ces mélanges dans la construction de CEBC.

Ainsi, une étude de la structure interne des échantillons avant et après les cycles gel-dégel par la technique de la tomographie est nécessaire pour mieux comprendre l'impact de phénomène du gel-dégel surtout pour le cas des mélanges du gravier-bentonite. Toutefois, il est essentiel de noter que cette étude s'est principalement concentrée sur l'impact des cycles de gel-dégel, et il est important d'évaluer aussi l'influence des cycles de mouillage-séchage, ainsi que de réaliser des études de durabilité à long terme pour ces matériaux.

Pour la prédiction, le modèle proposé n'a pas testé pour plusieurs limites de liquidité de bentonite, il parait important de tester les équations développées avec d'autres types de bentonites. Également, il faut approfondir la compréhension des mélanges sol-bentonite à CUG entre 2 et 6 et relier  $x$  à  $C_{UG}$

## RÉFÉRENCES

- Aachib, M. (1997). *Étude en laboratoire de la performance des barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le DMA*. École Polytechnique de Montréal.
- Abeelee, W. (1986). The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. *Nuclear and chemical waste management*, 6(1), 81-88.
- Aboud, F. (2018). *Création d'un montage expérimental pour l'application des cycles de gel-dégel sous confinement pour les mélanges sol-ciment*, [École de technologie supérieure].
- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., Wang, X., & Blotz, L. R. (1996). Determining bentonite content in soil-bentonite mixtures using electrical conductivity. *Geotechnical Testing Journal*, 19(1), 51-57.
- Adamis, Z., & Williams, R. B. (2005). *Bentonite, kaolin, and selected clay minerals*. World health organization.
- Adu-Wusu, C. (2008). *Performance Evaluation of Engineered Soil Cover Systems*. ProQuest.
- 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.
- Adu-Wusu, C., Yanful, E. K., Lanteigne, L., & O'Kane, M. (2007). Prediction of the water balance of two soil cover systems. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25, 215-237.
- Al-Mukhtar, M., Touray, J.-C., & Bergaya, F. (1999a). Synthetic clay for the study of swelling behaviour of clayey soils: Na-laponite. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 4(329), 239-242.

- Al-Mukhtar, M., Touray, J.-C., & Bergaya, F. (1999b). Une argile modèle pour l'étude du gonflement des sols argileux: la laponite-Na de synthèse. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 329(4), 239-242.
- Ali, M. Z., Smaine, M. G. M., Boubaker, M. B., Benabed, M. B., & Kamal, M. G. M. Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite-Sable Calcaire-Tuf: Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD).
- ALLEGES, C. P.-M. D. C., DE MATERIAUX, L., DANS, E., LA CIMENTATION, D. P. D. P., & SALIFERES, D. L. Z. Mémoire de Magister.
- Amadi, A., & Eberemu, A. (2013). Characterization of geotechnical properties of lateritic soil-bentonite mixtures relevant to their use as barrier in engineered waste landfills. *Nigerian Journal of Technology*, 32(1), 93-100.
- Ameta, N., & Wayal, A. S. (2008). Effect of bentonite on permeability of dune sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13(8).
- Arifin, Y. F. (2008). Thermo-hydro-mechanical behavior of compacted bentonite-sand mixtures: an experimental study.
- ASTM, D. (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils.
- Aubertin, M. (1999). Étude sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers: rapport final.
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., . . . Li, L. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. *Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil*, 5-8.
- Aubertin, M., Bussiere, B., & Chapuis, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 470-482.
- Aubertin, M., Fala, O., Bussière, B., Martin, V., Campos, D., Gamache-Rochette, A., . . . Chapuis, R. (2002). *Analyse des écoulements de l'eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles*. Défis et perspectives: Symposium.

- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1104-1122.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M., & Riffon, O. (2002). *Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle*. Défis & Perspectives: Symposium.
- Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B., & Dagenais, A.-M. (2006). *Investigations of layered cover systems acting as oxygen barriers to limit acid mine drainage*. 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics: Proceedings of the ISSMGE's fifth international congress organized by the Geoenvironmental Research Centre, Cardiff University and held at Cardiff City Hall on 26–30th June 2006 (p. 827-835).
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Maqoud, A. (2015). *Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA*. Symposium 2015 sur l'environnement et les mines.
- Aubertin, M., Ricard, J.-F., & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), 55-69.
- Awoh, A. S. (2012). *Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sous un recouvrement en eau*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada).
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2013a). Determination of the reaction rate coefficient of sulphide mine tailings deposited under water. *Journal of environmental management*, 128, 1023-1032.
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2013b). Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover. *Mine Water and the Environment*, 32(1), 42.

- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2020). 6 Water Covers. *Hard rock mine reclamation: From prediction to management of acid mine drainage*, 135.
- Ayres, B., Dirom, G., Christensen, D., Januszewski, S., & O’Kane, M. (2003). *Performance of cover system field trials for waste rock at Myra Falls Operations*. 6th International Conference on Acid Rock Drainage, Cairns, Australia (p. 14-17).
- Baille, W., Tripathy, S., & Schanz, T. (2010). Swelling pressures and one-dimensional compressibility behaviour of bentonite at large pressures. *Applied Clay Science*, 48(3), 324-333.
- BATANA, F., TAOUTI, M., & GUIBADJ, A. Caractérisation d’une bentonite brute et traitée.
- Bear, J., & Verruijt, A. (1987). *Modeling groundwater flow and pollution* (vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Belbachir, I. (2018). *Modification de la Bentonite de Maghnia et application dans l’adsorption de colorants textiles et de métaux lourds*, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid].
- Belzile, N., Chen, Y.-W., Cai, M.-F., & Li, Y. (2004). A review on pyrrhotite oxidation. *Journal of geochemical exploration*, 84(2), 65-76.
- Benkhelifa, M., & DAOUD, Y. (1998). Influence de la bentonite sur les propriétés physiques d’un sol sableux.
- Benson, C. H., & Daniel, D. E. (1990). Influence of clods on the hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(8), 1231-1248.
- Benson, C. H., Zhai, H., & Wang, X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of geotechnical engineering*, 120(2), 366-387.
- Bernier, R., Li, M. G., & Moerman, A. (1999). Effects of tailings and binder geochemistry on the physical strength of paste backfill. *Proc. of Sudbury*, 99, 1113-1122.
- Biarez, J., & Hicher, P.-Y. (1994). *Elementary mechanics of soil behaviour: saturated remoulded soils*. AA Balkema.

- Blowes, D., Ptacek, C., Jambor, J., & Weisener, C. (2005). The geochemistry of acid mine. *Environ. Geochem*, 9, 149.
- Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (1990). The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings, Waite Amulet, Quebec, Canada. *Applied geochemistry*, 5(3), 327-346.
- Bohnhoff, G., Shackelford, C., Malusis, M., Scalia, J., Benson, C., Edil, T., . . . Mazzieri, F. (2013). *Novel bentonites for containment barrier applications*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, Paris, France (vol. 30, p. 2997-3000).
- Börgesson, L., Johannesson, L.-E., & Gunnarsson, D. (2003). Influence of soil structure heterogeneities on the behaviour of backfill materials based on mixtures of bentonite and crushed rock. *Applied clay science*, 23(1-4), 121-131.
- Boulanger-Martel, V. (2015). *Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques*, École Polytechnique de Montréal].
- Boulanger-Martel, V. (2019). *Évaluation de la performance de recouvrements miniers pour contrôler le drainage minier acide en climat arctique*, Polytechnique Montréal].
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2021a). Insulation Covers. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, 1, 203-224.
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2021b). Resistance of a soapstone waste rock to freeze-thaw and wet-dry cycles: implications for use in a reclamation cover in the Canadian Arctic. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 41-54.
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., Côté, J., & Mbonimpa, M. (2016). Influence of freeze-thaw cycles on the performance of covers with capillary barrier effects made of crushed rock-bentonite mixtures to control oxygen migration. *Canadian*



- Geotechnical Journal*, 53(5), 753-764. Article. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0155>
- BOUTARFA, M. (2012). *Caractérisation physique et rhéologique de la bentonite de Maghnia*, USTO].
- Bouziani, T. (2002). *Caractérisation physico-mécanique des ciments allégés à base de matériaux locaux afin de leur utilisation dans la cimentation des puits de pétrole dans les zones salifères*, Boumerdes, Université de M'hamed Bougara. Faculté des Sciences de l'Ingénieur].
- Bussiere, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.
- Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques*. École Polytechnique de Montréal.
- Bussière, B., Aubertin, M., & Chapuis, R. P. (1997). Écoulement non saturé à travers les couvertures avec effets de barrière capillaire, CEBC: modélisation physique et numérique avec application au drainage minier acide.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. W., & Chapuis, R. P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- Bussière, B., Bois, D., & Benzaazoua, M. (1997). *Valorisation des résidus miniers générateurs de drainage minier acide par la désulfuration*. Proceedings of the 20th Symposium on Wastewater, 9th Workshop on Drinking Water et 13th Eastern Canadian Conference on Water Quality (p. 275-289).
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2020). *Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage*. CRC press.
- Bussière, B., & Hayley, D. W. (2010). Effects of climate change on mine waste disposal in the Arctic. *Geo-Strata—Geo Institute of ASCE*, 14(5).

- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J., & Julien, M. (2006). Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Quebec. *CIM Bulletin*, 1(6), 1-11.
- Bussière, B., Pabst, T., Boulanger-Martel, V., Guittonny, M., Plante, B., Neculita, C. M., . . . Maqsoud, A. (2020). 10 Monitoring the Performance. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, 225.
- Caillère, S., & Hénin, S. (1982). *Minéralogie des argiles. (No Title)*.
- Carrier III, W. D. (2003). Goodbye, hazen; hello, kozeny-carman. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(11), 1054-1056.
- Castellanos, E., Villar, M., Romero, E., Lloret, A., & Gens, A. (2008). Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite. *Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C*, 33, S516-S526.
- Chalermyanont, T., & Arrykul, S. (2005). Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarinn J. Sci. Technol*, 27(2), 313-323.
- Chamberlain, E. J., Erickson, A. E., & Benson, C. H. (1997). Frost resistance of cover and liner materials for landfills and hazardous waste sites.
- Chapuis, R. (1996). *Tapis d'étanchéité en sol-bentonite et en argile locale compactée: leçons tirées de projets récents au Québec*. Proceedings of an International Symposium, Exemples majeurs et récents en géotechnique de l'environnement. Éditions ENPCEDF, Paris (p. 107-128).
- Chapuis, R. P. (1989). Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. *Groundwater*, 27(5), 647-654.
- Chapuis, R. P. (1990). Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 47-57.
- Chapuis, R. P. (1999). Borehole variable-head permeability tests in compacted clay liners and covers. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), 39-51.

- 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. (2004). Permeability tests in rigid-wall permeameters: determining the degree of saturation, its evolution, and its influence of test results. *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 304-313.
- Chapuis, R. P., & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628.
- Chapuis, R. P., Lavoie, J., & Girard, D. (1992). Design, construction, performance, and repair of the soil-bentonite liners of two lagoons. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 638-649.
- Chevé, N. (2019). *Évaluation de la performance des géocomposites bentonitiques comme barrière aux fluides dans un contexte de recouvrement minier*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Childs, E. C., & Collis-George, N. (1950). The permeability of porous materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 201(1066), 392-405.
- Cho, W.-J., Lee, J.-O., & Kang, C.-H. (2000). Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixture for a potential backfill material for a high-level radioactive waste repository. *Nuclear Engineering and Technology*, 32(5), 495-503.
- Cissokho, F. (2007). *Études numériques des effets de la configuration des couvertures à effets de barrières capillaires inclinées sur la diffusion de l'oxygène*. École Polytechnique de Montréal.
- Collin, M., & Rasmuson, A. (1988). A comparison of gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Science Society of America Journal*, 52(6), 1559-1565.

- Comeau, S. (1999). *Caractérisation géotechnique et étude de la conductivité hydraulique verticale des barrières étanches d'un site d'enfouissement à Red Pine, NB*. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- Coulombe, V. (2012). *Performance de recouvrements isolants partiels pour contrôler l'oxydation de résidus miniers sulfureux*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].
- Cui, S.-L., Zhang, H.-Y., & Zhang, M. (2012). Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite-sand mixtures as a buffer/backfill material in China. *Engineering Geology*, 141, 65-73.
- Cui, Y.-J., Tang, A. M., Loiseau, C., & Delage, P. (2008). Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand-bentonite mixture under constant-volume and free-swell conditions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, S462-S471.
- D'Appolonia, D. J. (1980). Soil-bentonite slurry trench cutoffs. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(4), 399-417.
- Dafalla, M., Shaker, A. A., Elkady, T., Al-Shamrani, M., & Dhowian, A. (2015). Effects of confining pressure and effective stress on hydraulic conductivity of sand-clay mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 9993-10001.
- Dagenais, A.-M. (2005). *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires*, École Polytechnique de Montréal].
- Dali-Youcef, Z., Bouabdasselem, H., & Bettahar, N. (2006). Élimination des composés organiques par des argiles locales. *Comptes Rendus Chimie*, 9(10), 1295-1300.
- Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings: the fundamentals.
- Davies, M. P., Lighthall, P. C., Rice, S., & Martin, T. E. Phoenix, 2002 Design of Tailings Dams and Impoundments.
- de Magistris, F. S., Silvestri, F., & Vinale, F. (1998). Physical and mechanical properties of a compacted silty sand with low bentonite fraction. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 909-925.

- de normalisation du Québec, B. (2013). BNQ 2501-025. *Sols–Analyse granulométrique des sols inorganiques*.
- Demdoun, A. (2019a). *Comportement hydrique et mécanique d'un mélange de Bentonite-Sable Calcaire-Tuf: Application à la conception des Installations de Stockage des Déchets (ISD)*, Université Amar Telidji-Laghouat (Algérie)].
- Demdoun, A. (2019b). *Hydraulic and mechanical behaviour of a Bentonite-Calcareous sand-Tuff mixture: Application in the design of waste landfill site*, Université Amar Telidji-Laghouat (Algérie)].
- Demdoun, A., Gueddouda, M. K., Goual, I., Souli, H., & Ghembaza, M. S. (2020). Effect of landfill leachate on the hydromechanical behavior of bentonite-geomaterials mixture. *Construction and Building Materials*, 234, 117356.
- Demers, I. (2008). *Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].
- Demers, I., & Pabst, T. (2020). *7 Covers with Capillary Barrier Effects*. CRC Press; Taylor and Francis London, UK.
- Demers, I., & Pabst, T. (2021). Covers with capillary barrier effects. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*; Bussière, B., Guittonny, M., Eds, 167-186.
- Deng, L., Yuan, P., Liu, D., Annabi-Bergaya, F., Zhou, J., Chen, F., & Liu, Z. (2017). Effects of microstructure of clay minerals, montmorillonite, kaolinite and halloysite, on their benzene adsorption behaviors. *Applied Clay Science*, 143, 184-191.
- Derafa, G. (2018). *Synthèse et caractérisation de montmorillonite modifiée: Application à l'adsorption des colorants cationiques*].
- Didier, G. and Cavalcante Rocha, J. (1998) *Définition des conditions optimales de traitement en place d'un sol perméable en vue de son imperméabilisation*, Rap. Subvention N° 90012, Min. de l'environnement, Direction Générale de

- l'Administration et du Développement, Service de la Recherche et des Affaires Economiques, 215 p.
- Dobchuk, B., Nahir, M., O'Kane, M., & Ayres, B. (2012). *Mine waste cover system design—considerations for cold regions*. Mine Closure 2012: Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure (p. 417-431).
- Du, Y.-j., & Fan, R.-d. (2011). Compressibility and permeability behavior of two types of amended soil-bentonite vertical cutoff wall backfills. *Rock Soil Mech*, 32(S1), 49-54.
- Ebina, T., Minja, R. J., Nagase, T., Onodera, Y., & Chatterjee, A. (2004). Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties. *Applied clay science*, 26(1-4), 3-12.
- Elberling, B., & Brandt, K. K. (2003). Uncoupling of microbial CO<sub>2</sub> production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(2), 263-272.
- Elberling, B., & Damgaard, L. R. (2001). Microscale measurements of oxygen diffusion and consumption in subaqueous sulfide tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(12), 1897-1905.
- Evangelou, V. P., & Zhang, Y. (1995). A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25(2), 141-199.
- Fall, M., Célestin, J., & Han, F. (2009). Suitability of bentonite-paste tailings mixtures as engineering barrier material for mine waste containment facilities. *Minerals Engineering*, 22(9-10), 840-848.
- Fetter, C. W., Boving, T. B., & Kreamer, D. K. (1999). *Contaminant hydrogeology* (vol. 1138). Prentice hall Upper Saddle River, NJ.
- Fodje, M., Grochulski, P., Janzen, K., Labiuk, S., Gorin, J., & Berg, R. (2014). 08B1-1: an automated beamline for macromolecular crystallography experiments at the Canadian Light Source. *Journal of synchrotron radiation*, 21(3), 633-637.

- Fodje, M., Janzen, K., Labiuk, S., Gorin, J., & Grochulski, P. (2014). MS52. P02. *Acta Cryst*, 70, C791.
- Fourie, A. (2009). Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impacts of tailings storage facilities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1067-1071.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), 521-532.
- 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.
- Gökalp, Z., Başaran, M., & Uzun, O. (2011). Compaction and swelling characteristics of sand-bentonite and pumice-bentonite mixtures. *Clay Minerals*, 46(3), 449-459.
- Gray, M., Cheung, S., & Dixon, D. (1984). *The influence of sand content on swelling pressures and structure developed in statically compacted Na-bentonite*. Atomic Energy of Canada Ltd.
- Gueddouda, M., Goual, I., Lamara, M., & Goual, S. (2013). Amélioration des propriétés physico-mécaniques des argiles gonflantes stabilisées par ajout de sable de dune. 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique CMIG'13. *Alger, Algeria*, 221-226.
- GUEDDOUDA, M. K. (2011). *Comportement hydro-mécanique des sols compactés: Application à la conception d'une barrière ouvragée «sable de dune-bentonite»*].
- 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.
- Hansen, D. (2004). Discussion of " On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils". *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 990-993.

- Haug, M. D., & Wong, L. C. (1992). Impact of molding water content on hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 253-262.
- Heineck, K., Lemos, R., Lautenschlager, C., & Consoli, N. (2010). Behavior of Vertical Hydraulic Barriers Composed by Sandy Soil, Bentonite, and Cement Subjected to Alkaline Contaminants. Dans *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design* (p. 2462-2471).
- Heineck, K. S., Lemos, R. G., Flores, J. A. A., & Consoli, N. C. (2010). Influence of particle morphology on the hydraulic behavior of coal ash and sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, 325-335.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Presses inter Polytechnique.
- Holubec, I. (2004). Covers for Reactive Tailings Located in Permafrost Regions Review, MEND Report 1.61. 6. *Natural Resources Canada, Minerals and Metals Sector: Ottawa, ON, Canada*.
- Hubbard, C. R., & Snyder, R. L. (1988). RIR-measurement and use in quantitative XRD. *Powder Diffraction*, 3(2), 74-77.
- Imaizumi, S., Wataru, M., & Takahashi, N. (2009). Estimation of critical ratio of bentonite addition to tuff sand. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11(4), 299-304.
- Kashir, M., & Yanful, E. K. (2001). Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1034-1048.
- Kenney, T., Veen, W. V., Swallow, M. A., & Sungaila, M. (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 364-374.
- Kirby, C. S., & Rimstidt, J. D. (1994). Interaction of municipal solid waste ash with water. *Environmental science & technology*, 28(3), 443-451.



- Kiviranta, L., & Kumpulainen, S. (2011). *Quality control and characterization of bentonite materials*. Posiva Oy.
- Koerner, R. M., & Daniel, D. E. (1997). *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps*. Thomas Telford.
- 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.
- Komine, H. (2008). Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(4), 497-508.
- Komine, H. (2010). Predicting hydraulic conductivity of sand–bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes. *Engineering Geology*, 114(3-4), 123-134.
- Komine, H., & Ogata, N. (1999). Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. *Soils and foundations*, 39(2), 83-97.
- Komine, H., & Ogata, N. (2004). Predicting swelling characteristics of bentonites. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 130(8), 818-829.
- Komine, H., Ogata, N., Horie, Y., Ishii, T., & Nishino, S.-y. (1991). *Permeability and mechanical properties of bentonite-sand mixture for sealing LLW (Low Level Radioactive Wastes) repositories*. Transactions of the 11th international conference on structural mechanics in reactor technology.
- Konrad, J.-M. (1989). Effect of freeze–thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(2), 217-226.
- Konrad, J.-M., & Samson, M. (2000). Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 857-869.

- Kouloughèi, S. (2007). Étude expérimentale des mélanges sable bentonite-leurs performances comme barrières de confinement dans les CET.
- Kouloughli, S., & Lehocine, M. B. (2007). Etude des mélanges sable-bentonite utilisés dans la construction de barrières de confinement de déchets solides. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*, 34-42.
- Kovacs, M. (1981). Rating scales to assess depression in school-aged children. *Acta Paedopsychiatrica: International Journal of Child & Adolescent Psychiatry*.
- Kozaki, T., Suzuki, S., Kozai, N., Sato, S., & Ohashi, H. (2001). Observation of microstructures of compacted bentonite by microfocus X-ray computerized tomography (Micro-CT). *Journal of Nuclear Science and Technology*, 38(8), 697-699.
- 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.
- Johannesson, L.E., Borgesson, L., Sanden, T., (1999). *Backfill materials based on crushed rock*.  
(Part 2). Geotechnical properties determined in laboratory. . SKB, Stockholm.
- Larochelle, C. G., Bussière, B., Boulanger-Martel, V., Wilson, W., & Rivest, É. In situ thermal behavior of an insulation cover for mine site reclamation in arctic climate.
- Lassin, A. (1998). *Thermodynamique de l'hydratation et modelisation de la stabilite des argiles. Application a la pedogenese climatique et a la diagenese hydrothermale*, Strasbourg 1].
- Le Pluart, L. (2002). *Nanocomposites, epoxyde, amine, montmorillonite: rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux*, Lyon, INSA].
- Lee, J.-M., & Shackelford, C. D. (2005). Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 64-77.

- Lessard, F. (2018). *Évaluation des couvertures isolantes avec effets de barrière capillaire faites de résidus désulfurés afin de contrôler le drainage minier acide en conditions nordiques*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Li, L., Aubertin, M., Simon, R., Chapuis, R. P., Bussière, B., Bernier, L., . . . Benzaazoua, M. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement.
- Liu, J. (2013). *Etanchéité de l'interface argilite-bentonite re-saturée et soumise à une pression de gaz, dans le contexte du stockage profond de déchets radioactifs*, Ecole Centrale de Lille].
- Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in colloid and interface science*, 82(1-3), 43-92.
- Lundgren, T. (1981). *Some bentonite sealants in soil mixed blankets*. Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (vol. 2, p. 349-354).
- Maqsood, A., Bussière, B., & Aubertin, M. (2002). L'hystérésis de sols non saturés utilisés dans les couvertures avec effets de barrière capillaire.
- Maqsood, A., Bussière, B., & Mbonimpa, M. (2021). Low saturated hydraulic conductivity covers. *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage; Bussière, B., Guittonny, M., Eds*, 93-113.
- Marshall, T. (1958). A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of soil science*, 9(1), 1-8.
- Martel, V. B., Bussière, B., Côté, J., & Mbonimpa, M. (2015). Laboratory column experiment to evaluate oxygen diffusion through covers with capillary barrier effects subjected to freeze-thaw cycles. Dans *Cold Regions Engineering 2015* (p. 34-45).
- Martin, V., McMullen, J., & Aubertin, M. (2005). *Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Mining and the Environment, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada (p. 56-71).

- Mata, C., Guimarães, L. d. N., Ledesma, A., Gens, A., & Olivella, S. (2005). A hydro-geochemical analysis of the saturation process with salt water of a bentonite crushed granite rock mixture in an engineered nuclear barrier. *Engineering geology*, 81(3), 227-245.
- Mata, C., & Ledesma, A. (2003). Permeability of a bentonite–crushed granite rock mixture using different experimental techniques. *Geotechnique*, 53(8), 747-758.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovacs (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.
- Merzouk, A. (2022). *Amendement des argiles afin de limiter les effets engendrés par les cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique saturée*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue].
- Metreveli, G., & Frimmel, F. H. (2007). Influence of Na-bentonite colloids on the transport of heavy metals in porous media. Dans *Colloidal transport in porous media* (p. 29-53). Springer.
- Mishra, A. K., Ohtsubo, M., Li, L., & Higashi, T. (2011). Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, 52(1-2), 78-84.
- Mishra, A. K., Ohtsubo, M., Li, L. Y., & Higashi, T. (2010). Influence of the bentonite on the consolidation behaviour of soil–bentonite mixtures. *Carbonates and evaporites*, 25, 43-49.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (vol. 3). John Wiley & Sons New York.
- Mollins, L. H. (1996). *The design of bentonite-sand mixtures*, University of Leeds].

- Moncur, M., Jambor, J., Ptacek, C., & Blowes, D. (2009). Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite. *Applied Geochemistry*, 24(12), 2362-2373.
- 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.
- Nicholson, R. V., & Scharer, J. M. (1994). Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics. Dans. ACS Publications.
- Nordstrom, D. K. (2000). Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters. *International Geology Review*, 42(6), 499-515.
- OGATA, N., KOMINE, H., NAKASHIMA, H., NAGASAWA, T., & ISHII, T. (1994). Method of designing bentonite/sand mixture to achieve the target permeability. *Journal of the Clay Science Society of Japan (in Japanese)*, 34(2), 95-101.
- Ojuri, O., & Oluwatuyi, O. E. (2017). Strength and hydraulic conductivity characteristics of sand-bentonite mixtures designed as a landfill liner. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11(4), 614-622.
- Olson, R., & Daniel, D. (1981). Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. *Permeability and groundwater contaminant transport, ASTM STP*, 746, 18-64.
- Oosterbaan, R., & Nijland, H. (1994). 12 Determining the Saturated Hydraulic Conductivity.
- Ören, A. H., Kaya, A., & Kayalar, A. Ş. (2011). Hydraulic conductivity of zeolite–bentonite mixtures in comparison with sand–bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1343-1353.
- Orsini, L., & Remy, J. (1976). Utilisation du chlorure de cobaltihexammine pour la determination simultanee de la capacite d'echange et des bases echangeables des sols. *Bulletin de l'Association Francaise pour l'Etude du Sol. Science du Sol*.

- Othman, M. A., & Benson, C. H. (1993). Effect of freeze–thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), 236-246.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G., & Bussière, B. (2006). *The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: a laboratory and numerical modeling study*. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD) (p. 26-30).
- Ouyang, S., & Daemen, J. (1991). Design of bentonite/crushed rock seals. *Geotechnical & Geological Engineering*, 9, 63-72.
- Ouyang, S., & Daemen, J. (1996). Performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole seals. *Sealing of boreholes and underground excavations in rock*, 65-95.
- Ouyang, S., & Daemen, J. J. (1992). *Sealing performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole plugs*. US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC (United States). Div ....
- Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Paumier, S., Foltz, N. T., Pantet, A., Guyonnet, D., Norotte, V., & Didier, G. (2009). *Utilisation de méthodes hydrauliques et mécaniques pour différencier les types de bentonites*. Rencontres geosynthétiques 2009 (p. 377-386).
- Paumier, S., Monnet, P., & Pantet, A. (2008). Rheological behavior of smectite dispersions: the influence of suspension concentration and exchangeable cation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2008.
- Peregoedova, A. (2012). *Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire*, [École Polytechnique de Montréal].
- Pétel, K. (2017). *Évaluation en laboratoire de recouvrements spécifiquement adaptés au contrôle du drainage neutre contaminé*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).

- Pirrion, T., Touze-Foltz, N., Croissant, D., Rosin-Paumier, S., & Ouvry, J. (2011). *Performance d'un GSB dans une couverture d'installation de stockage de déchets après six ans en service*. 8èmes Rencontres Géosynthétiques (p. p. 339-p. 348).
- Praetorius, S., & Schöber, B. (2017). *Bentonite handbook: Lubrication for pipe jacking*. John Wiley & Sons.
- Price, W., Potter, A., Thomson, T. K., Smith, G., Hazen, A., & Beardsley, R. (1911). Discussion on dams on sand foundations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 73(3), 190-208.
- Proteau, A., Guittonny, M., Bussière, B., & Maqsoud, A. (2020). Oxygen migration through a cover with capillary barrier effects colonized by roots. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(12), 1903-1914.
- Pusch, R. (1992). Use of bentonite for isolation of radioactive waste products. *Clay minerals*, 27(3), 353-361.
- Pusch, R., Karnland, O., & Hökmark, H. (1990). *GMM-a general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Rasmuson, A., & Eriksson, J.-C. (1987). *Capillary barriers in covers for mine tailing dumps*. Naturvårdsverket.
- Reid, J. W. (2023). Synchrotron powder diffraction data for some smectite clay mineral standards. *Powder Diffraction*, 1-7.
- Rimstidt, J. D., & Vaughan, D. J. (2003). Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 67(5), 873-880.
- Ritcey, G. M. (1989). Tailings management.
- Rosli, R. N., Selamat, M. R., & Ramli, H. (2019). *The permeability and strength of compacted laterite soil-bentonite mixtures for landfill cover application*. AWAM International Conference on Civil Engineering (p. 163-175).

- Saba, S., Barnichon, J.-D., Cui, Y.-J., Tang, A. M., & Delage, P. (2014). Microstructure and anisotropic swelling behaviour of compacted bentonite/sand mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 126-132.
- Sällfors, G., & Öberg-Högsta, A.-L. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical & Geological Engineering*, 20, 65-80.
- Serratrice, J.-F., & Soyeux, B. (1996). Les essais de gonflement. *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 65-86.
- Serratrice, J., & Soyeux, B. (1996). The swelling tests. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 204, 65-85.
- Shackelford, C. D., & Scalia, J. (2016). Semipermeable membrane behavior in bentonite-based barriers: Past, present, and future. *Proceedings of GeoVancouver*.
- Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Groundwater*, 27(5), 633-638.
- Sivapullaiah, P., Sridharan, A., & Stalin, V. (2000). Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Canadian geotechnical journal*, 37(2), 406-413.
- Soil, A. C. D.-o., & Rock. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (constant Head)*. ASTM International.
- Soil, A. C. D.-o., & Rock. (2010). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. ASTM International.
- Song, Q., & Yanful, E. K. (2008). Monitoring and modeling of sand-bentonite cover for ARD mitigation. *Water, air, and soil pollution*, 190(1-4), 65-85.
- Standard, A. (2006). D2434-68, 2006. *Standard test method for permeability of granular soils (Constant Head)*. *ASTM International, West Conshohocken, PA. doi, 10, D0422*.
- Stewart, D., Studs, P., & Cousens, T. (2003). The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand. *Applied Clay Science*, 23(1-4), 97-110.



- Stoicescu, J., Haug, M., & Fredlund, D. (1996). *The soil-water characteristics and pore size distribution of a sand bentonite mixture*. Proc. 49th Canadian Geotechnical Conference, St. John's Newfoundland, September (p. 23-25).
- STP523, A. (2011). ASTM D5084, 22.
- Studds, P., Stewart, D., & Cousens, T. (1998). The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures. *Clay Minerals*, 33(4), 651-660.
- Sun, D. a., Cui, H., & Sun, W. (2009). Swelling of compacted sand-bentonite mixtures. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 485-492.
- Swartzen-Allen, S. L., & Matijevic, E. (1974). Surface and colloid chemistry of clays. *Chemical Reviews*, 74(3), 385-400.
- Taheri, S., Ebadi, T., Maknoon, R., & Amiri, M. (2018). Predicting variations in the permeability and strength parameters of a sand-bentonite mixture (SBM) contaminated simultaneously with lead (II) and diesel. *Applied Clay Science*, 157, 102-110.
- Tang, A.-M., & Cui, Y.-J. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 287-296.
- Therriault, J. A., Frostiak, J., & Welch, D. (2003). *Surface disposal of past tailings at the Bulyanhulu gold mine, Tanzania*. Mining & the Environment III Conference.
- Thériault, P. (2001). *Etude de l'influence des métaux lourds sur la conductivité hydraulique de couches sable/bentonite*. Université Laval.
- Tong, S., & Shackelford, C. (2016). Standardized hydraulic conductivity testing of compacted sand-bentonite mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 39(6), 1015-1029.
- Topp, G. C., & Miller, E. (1966). Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media. *Soil Science Society of America Journal*, 30(2), 156-162.

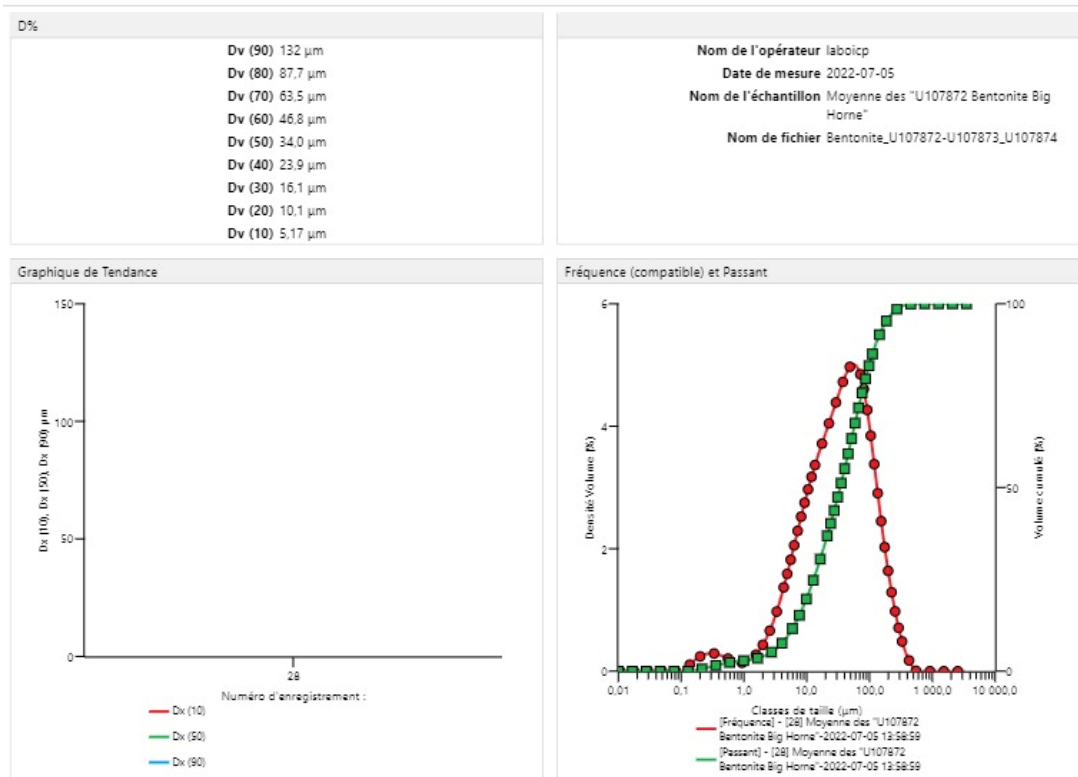
- Touze-Foltz, N., Duquennoi, C., & Gaget, E. (2006). Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(3), 188-197.
- Touze-Foltz, N., Lupo, J., & Barroso, M. (2008). Geoenvironmental applications of geosynthetics. *Keynote Lecture, Proceedings Eurogeo*, 4, 98.
- Townsend, D. L., & Csathy, T. I. (1963). *Soil type in relation to frost action*. Queen's University.
- Tremblay, G., & Hogan, C. (2001). Mine environment neutral drainage (MEND) manual 5.4. 2d: prevention and control. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. *Natural Resources Canada, Ottawa*, 352.
- Tripathi, K. (2013). Hydraulic conductivity prediction of saturated sand-bentonite mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 581-591.
- Tripathi, K., & Viswanadham, B. (2012). Evaluation of the permeability behaviour of sand-bentonite mixtures through laboratory tests. *Indian Geotechnical Journal*, 42, 267-277.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Van, O. H., & Hsu, P. (1977). An introduction to clay colloid chemistry. *For Clay Technologists, Geologists, and Soil Scientists Wiley New York*.
- Vienne, F. (2006). Le géosynthétique bentonitique en couverture d'installation de stockage de déchets.
- 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.
- Wolkersdorfer, C., & Bowell, R. (2004). Contemporary reviews of mine water studies in Europe. *Mine Water and the Environment*, 23(4), 161.

- Wong, L. C., & Haug, M. D. (1991). Cyclical closed-system freeze–thaw permeability testing of soil liner and cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 784-793.
- Xie, M., Moog, H. C., & Kolditz, O. (2007). *Geochemical effects on swelling pressure of highly compacted bentonite: experiments and model analysis*. Theoretical and numerical unsaturated soil mechanics (p. 93-100).
- Xu, H., Zhu, W., Qian, X., Wang, S., & Fan, X. (2016). Studies on hydraulic conductivity and compressibility of backfills for soil-bentonite cutoff walls. *Applied Clay Science*, 132, 326-335.
- Yang, N., & Barbour, S. (1992). The impact of soil structure and confining stress on the hydraulic conductivity of clays in brine environments. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(5), 730-739.
- Zeyneb, B., Amira, B., & Said, H. (2021). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption de bleu de méthylène sur une argile locale" région d'Oum-El-Bouaghi".

## ANNEXE A CARACTERISATION DE BASE

### Analyse granulométrique

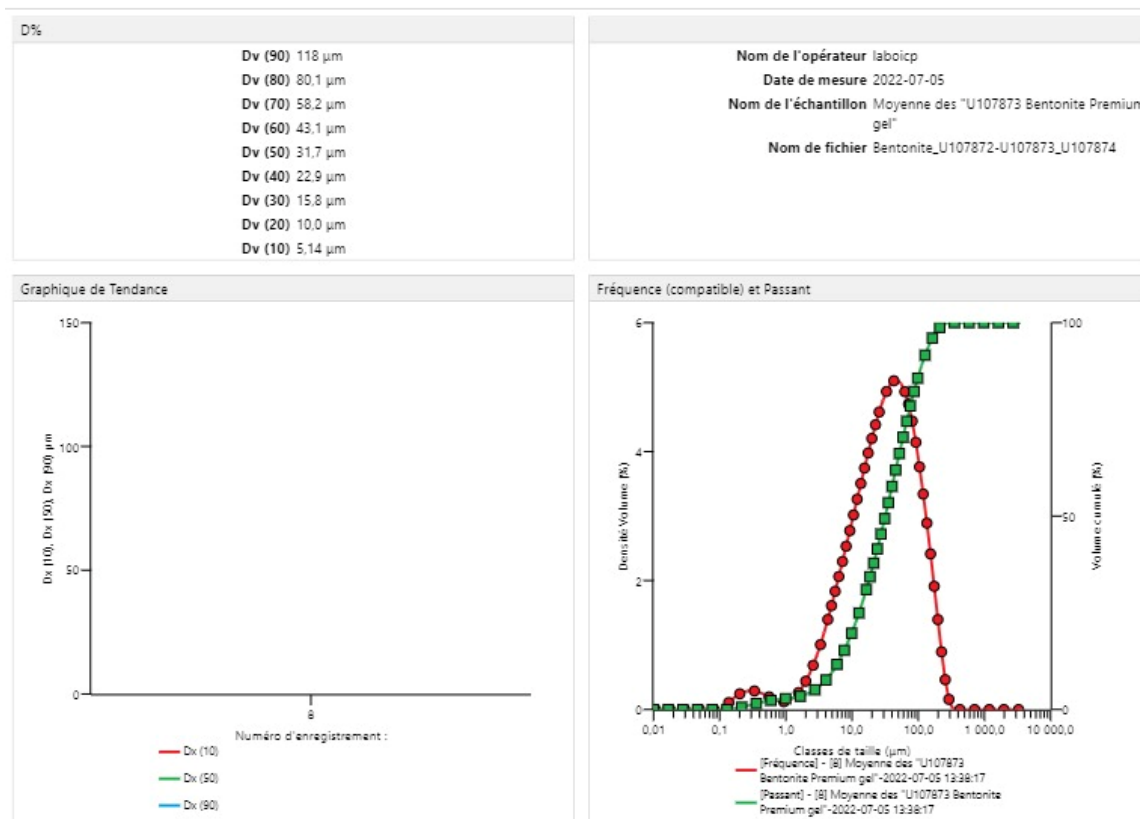
### Analyse Granulométrique



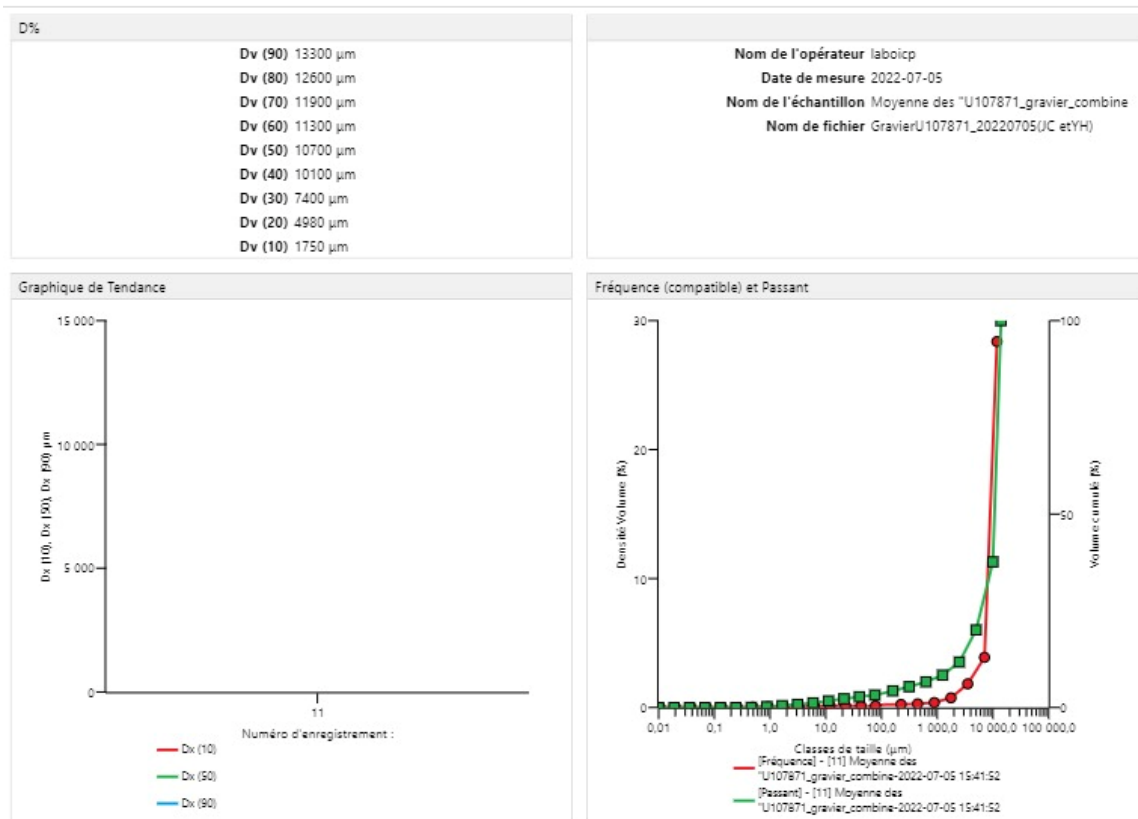
## Analyse Granulométrique

Résultat									
Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans
0,0100	0,00	0,166	0,17	2,75	0,70	45,6	4,26	756	0,00
0,0114	0,00	0,188	0,20	3,12	0,84	51,8	4,22	859	0,00
0,0129	0,00	0,214	0,23	3,55	0,99	58,9	4,11	976	0,00
0,0147	0,00	0,243	0,24	4,03	1,16	66,9	3,95	1110	0,00
0,0167	0,00	0,276	0,24	4,58	1,34	76,0	3,73	1260	0,00
0,0189	0,00	0,314	0,24	5,21	1,53	86,4	3,46	1430	0,00
0,0215	0,00	0,357	0,23	5,92	1,72	98,1	3,14	1630	0,00
0,0244	0,00	0,405	0,21	6,72	1,91	111	2,79	1850	0,00
0,0278	0,00	0,460	0,19	7,64	2,11	127	2,41	2100	0,00
0,0315	0,00	0,523	0,16	8,68	2,31	144	2,01	2390	0,00
0,0358	0,00	0,594	0,14	9,86	2,52	163	1,59	2710	0,00
0,0407	0,00	0,675	0,12	11,2	2,72	186	1,16	3080	0,00
0,0463	0,00	0,767	0,10	12,7	2,92	211	0,74	3500	
0,0526	0,00	0,872	0,10	14,5	3,12	240	0,38		
0,0597	0,00	0,991	0,11	16,4	3,32	272	0,12		
0,0679	0,00	1,13	0,13	18,7	3,51	310	0,00		
0,0771	0,00	1,28	0,17	21,2	3,68	352	0,00		
0,0876	0,00	1,45	0,22	24,1	3,85	400	0,00		
0,0995	0,00	1,65	0,28	27,4	3,99	454	0,00		
0,113	0,00	1,88	0,37	31,1	4,11	516	0,00		
0,128	0,09	2,13	0,46	35,3	4,20	586	0,00		
0,146	0,14	2,42	0,57	40,1	4,25	666	0,00		

## Analyse Granulométrique



## Analyse Granulométrique

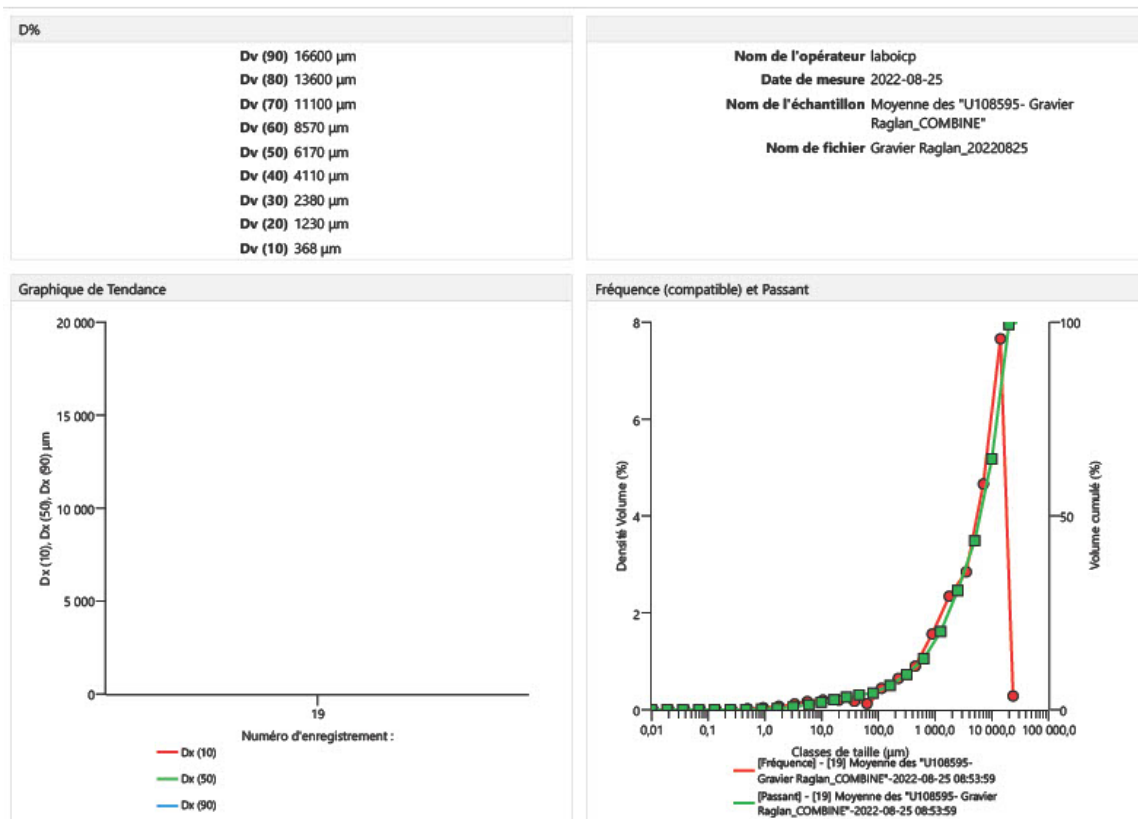


## Analyse Granulométrique

Résultat							
Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans
0,0100	0,00	0,166	0,00	2,75	0,06	45,6	0,10
0,0114	0,00	0,188	0,00	3,12	0,07	51,8	0,10
0,0129	0,00	0,214	0,00	3,55	0,07	58,9	0,08
0,0147	0,00	0,243	0,00	4,03	0,08	66,9	0,07
0,0167	0,00	0,276	0,00	4,58	0,09	76,0	0,02
0,0189	0,00	0,314	0,01	5,21	0,09	80,0	1,06
0,0215	0,00	0,357	0,01	5,92	0,10	160	1,06
0,0244	0,00	0,405	0,02	6,72	0,10	315	1,27
0,0278	0,00	0,460	0,03	7,64	0,10	630	1,72
0,0315	0,00	0,523	0,03	8,68	0,10	1250	3,39
0,0358	0,00	0,594	0,04	9,86	0,11	2500	8,30
0,0407	0,00	0,675	0,04	11,2	0,11	5000	17,59
0,0463	0,00	0,767	0,04	12,7	0,11	10000	62,36
0,0526	0,00	0,872	0,05	14,5	0,11	14000	
0,0597	0,00	0,991	0,05	16,4	0,11		
0,0679	0,00	1,13	0,05	18,7	0,11		
0,0771	0,00	1,28	0,06	21,2	0,10		
0,0876	0,00	1,45	0,06	24,1	0,11		
0,0995	0,00	1,65	0,06	27,4	0,11		
0,113	0,00	1,88	0,06	31,1	0,11		
0,128	0,00	2,13	0,06	35,3	0,11		
0,146	0,00	2,42	0,06	40,1	0,11		



## Analyse Granulométrique



## Analyse Granulométrique

Résultat							
Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans
0,0100	0,00	0,166	0,00	2,75	0,09	45,6	0,13
0,0114	0,00	0,188	0,00	3,12	0,10	51,8	0,12
0,0129	0,00	0,214	0,00	3,55	0,11	58,9	0,10
0,0147	0,00	0,243	0,00	4,03	0,12	66,9	0,09
0,0167	0,00	0,276	0,00	4,58	0,13	76,0	0,03
0,0189	0,00	0,314	0,00	5,21	0,14	80,0	1,99
0,0215	0,00	0,357	0,00	5,92	0,15	160	2,85
0,0244	0,00	0,405	0,01	6,72	0,15	315	4,06
0,0278	0,00	0,460	0,01	7,64	0,16	630	6,99
0,0315	0,00	0,523	0,02	8,68	0,16	1250	10,60
0,0358	0,00	0,594	0,02	9,86	0,16	2500	12,88
0,0407	0,00	0,675	0,03	11,2	0,17	5000	21,09
0,0463	0,00	0,767	0,03	12,7	0,17	10000	34,67
0,0526	0,00	0,872	0,03	14,5	0,17	20000	0,62
0,0597	0,00	0,991	0,04	16,4	0,16	28000	
0,0679	0,00	1,13	0,04	18,7	0,16		
0,0771	0,00	1,28	0,04	21,2	0,16		
0,0876	0,00	1,45	0,05	24,1	0,16		
0,0995	0,00	1,65	0,06	27,4	0,15		
0,113	0,00	1,88	0,06	31,1	0,15		
0,128	0,00	2,13	0,07	35,3	0,14		
0,146	0,00	2,42	0,08	40,1	0,14		

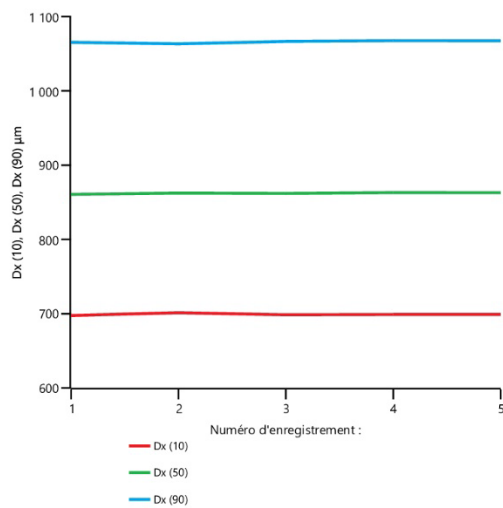
## Analyse Granulométrique Combinée

**Nom de l'opérateur** laboicp  
**Date de mesure** 2023-01-20  
**Nom de l'échantillon** Sable Ottawa  
**Type de l'instrument** Mastersizer3000  
**Nom de fichier** PI\_Mutaz\_Sable\_Ottawa\_230120\_PAJ

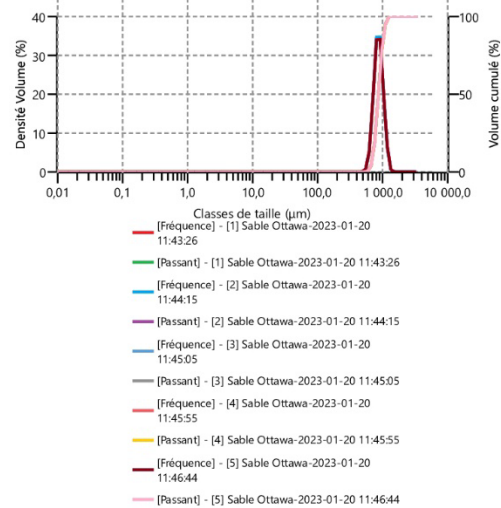
## Resultats

**Dv (10)** 698  $\mu\text{m}$   
**Dv (20)** 757  $\mu\text{m}$   
**Dv (30)** 790  $\mu\text{m}$   
**Dv (40)** 824  $\mu\text{m}$   
**Dv (50)** 861  $\mu\text{m}$   
**Dv (60)** 899  $\mu\text{m}$   
**Dv (70)** 939  $\mu\text{m}$   
**Dv (80)** 984  $\mu\text{m}$   
**Dv (90)** 1070  $\mu\text{m}$

## Graphique de Tendence



## Fréquence (compatible) et Passant



Malvern Instruments Ltd.  
www.malvern.com

Mastersizer - v3.81  
Page 1 of 2

PI\_Mutaz\_Sable\_Ottawa\_230120\_PAJ

Created: 2021-03-23  
Printed: 2023-01-20 13:32

## Analyse Granulométrique Combinée

Résultat							
Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans	Taille (µm)	% Volume Dans
0,0100	0,00	0,523	0,00	27,4	0,00	1430	0,00
0,0114	0,00	0,594	0,00	31,1	0,00	1630	0,00
0,0129	0,00	0,675	0,00	35,3	0,00	1850	0,00
0,0147	0,00	0,767	0,00	40,1	0,00	2100	0,00
0,0167	0,00	0,872	0,00	45,6	0,00	2390	0,00
0,0189	0,00	0,991	0,00	51,8	0,00	2710	0,00
0,0215	0,00	1,13	0,00	58,9	0,00	3080	0,00
0,0244	0,00	1,28	0,00	66,9	0,00	3500	
0,0278	0,00	1,45	0,00	76,0	0,00		
0,0315	0,00	1,65	0,00	86,4	0,00		
0,0358	0,00	1,88	0,00	98,1	0,00		
0,0407	0,00	2,13	0,00	111	0,00		
0,0463	0,00	2,42	0,00	127	0,00		
0,0526	0,00	2,75	0,00	144	0,00		
0,0597	0,00	3,12	0,00	163	0,00		
0,0679	0,00	3,55	0,00	186	0,00		
0,0771	0,00	4,03	0,00	211	0,00		
0,0876	0,00	4,58	0,00	240	0,00		
0,0995	0,00	5,21	0,00	272	0,00		
0,113	0,00	5,92	0,00	310	0,00		
0,128	0,00	6,72	0,00	352	0,00		
0,146	0,00	7,64	0,00	400	0,00		
0,166	0,00	8,68	0,00	454	0,01		
0,188	0,00	9,86	0,00	516	0,37		
0,214	0,00	11,2	0,00	586	3,91		
0,243	0,00	12,7	0,00	666	15,69		
0,276	0,00	14,5	0,00	756	29,71		
0,314	0,00	16,4	0,00	859	29,38		
0,357	0,00	18,7	0,00	976	16,02		
0,405	0,00	21,2	0,00	1110	4,89		
0,460	0,00	24,1	0,00	1260	0,04		

## Résultats de mesure de la gravité spécifique

QUANTACHROME CORPORATION  
Upsc 1200e V5.06  
Analysis Report

Thu Jun 30 11:15:27 2022  
User ID: URSTM

Sample Parameters

Sample ID: BENTOPRE  
Weight: 7.6337 g  
Description:  
Comment:

Analysis Parameters

Cell Size - Small  
V Added - Small: 12.8440 cc  
V Cell: 19.0363 cc  
Analysis Temperature: 24.4 C  
Target Pressure: 131.0 kPa  
Type of gas used: Helium  
Equilibration Time: Auto  
Flow Purge: 1.0 min.  
Maximum Runs: 15  
Number Of Runs Averaged: 3  
Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0224 %  
Average Volume: 2.8635 cc  
Volume Std. Dev.: 0.0007 cc  
Average Density: 2.6658 g/cc  
Density Std. Dev.: 0.0006 g/cc  
Coefficient of Variation: 0.0237 %

Run Data		
RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	2.8590	2.6701
2	2.8554	2.6734
3	2.8561	2.6728
4	2.8603	2.6689
5	2.8602	2.6689
6	2.8574	2.6716
7	2.8593	2.6698
8	2.8622	2.6671
9	2.8631	2.6662
10	2.8640	2.6654
11	2.8641	2.6653
12	2.8613	2.6679
13	2.8645	2.6649
14	2.8631	2.6663

QUANTACHROME CORPORATION  
 Upyc 1200e V5.06  
 Analysis Report

Thu Jun 30 11:48:11 2022  
 User ID: URSTM

Sample Parameters

Sample ID: BENTOHOR  
 Weight: 5.6451 g  
 Description:  
 Comment:

Analysis Parameters

Cell Size - Small  
 V Added - Small: 12.8440 cc  
 V Cell: 19.0363 cc  
 Analysis Temperature: 24.5 C  
 Target Pressure: 131.0 kPa  
 Type of gas used: Helium  
 Equilibration Time: Auto  
 Flow Purge: 1.0 min.  
 Maximum Runs: 15  
 Number Of Runs Averaged: 3  
 Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0159 %  
 Average Volume: 2.3295 cc  
 Volume Std. Dev.: 0.0004 cc  
 Average Density: 2.4233 g/cc  
 Density Std. Dev.: 0.0004 g/cc  
 Coefficient of Variation: 0.0179 %

-----  
 Run Data  
 -----

RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	2.3564	2.3956
2	2.3531	2.3990
3	2.3496	2.4026
4	2.3460	2.4063
5	2.3430	2.4093
6	2.3398	2.4127
7	2.3378	2.4147
8	2.3359	2.4167
9	2.3342	2.4184
10	2.3328	2.4199
11	2.3319	2.4208
12	2.3309	2.4218
13	2.3300	2.4227
14	2.3294	2.4234

QUANTACHROME CORPORATION  
Upsc 1200e V5.06  
Analysis Report

Tue Jul 5 14:12:13 2022  
User ID: URSTM

Sample Parameters

Sample ID: 107871  
Weight: 142.6600 g  
Description:  
Comment:

Analysis Parameters

Cell Size - Large  
V Added - Large: 80.3567 cc  
V Cell: 149.6719 cc  
Analysis Temperature: 25.4 C  
Target Pressure: 131.0 kPa  
Type of gas used: Helium  
Equilibration Time: Auto  
Flow Purge: 1.0 min.  
Maximum Runs: 15  
Number Of Runs Averaged: 3  
Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.1144 %  
Average Volume: 51.2887 cc  
Volume Std. Dev.: 0.0628 cc  
Average Density: 2.7815 g/cc  
Density Std. Dev.: 0.0034 g/cc  
Coefficient of Variation: 0.1224 %

-----  
Run Data  
-----

RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	51.1102	2.7912
2	51.1419	2.7895
3	51.2814	2.7819
4	51.2891	2.7815
5	51.2422	2.7840
6	51.2619	2.7830
7	51.2249	2.7850
8	51.2755	2.7822
9	51.1167	2.7909
10	51.1593	2.7885
11	51.1296	2.7902
12	51.4241	2.7742
13	51.2007	2.7863
14	51.3227	2.7797

QUANTACHROME CORPORATION  
Upsc 1200e V5.06  
Analysis Report

Thu Aug 18 11:28:01 2022  
User ID: URSTM

Sample Parameters

Sample ID: 108595  
Weight: 165.7500 g  
Description:  
Comment:

Analysis Parameters

Cell Size - Large  
V Added - Large: 80.4585 cc  
V Cell: 150.4415 cc  
Analysis Temperature: 24.0 C  
Target Pressure: 131.0 kPa  
Type of gas used: Helium  
Equilibration Time: Auto  
Flow Purge: 1.0 min.  
Maximum Runs: 15  
Number Of Runs Averaged: 3  
Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

Deviation Achieved: 0.0020 %  
Average Volume: 56.0151 cc  
Volume Std. Dev.: 0.0012 cc  
Average Density: 2.9590 g/cc  
Density Std. Dev.: 0.0001 g/cc  
Coefficient of Variation: 0.0021 %

-----  
Run Data  
-----

RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	56.1157	2.9537
2	56.0280	2.9583
3	56.0143	2.9591
4	56.0143	2.9591
5	56.0168	2.9589

-----



QUANTACHROME CORPORATION  
Upsc 1200e V5.06  
Analysis Report

Fri Jan 20 12:32:02 2023  
User ID: URSTM

Sample Parameters

Sample ID: SILICE  
Weight: 203.9900 g  
Description:  
Comment:

Analysis Parameters

Cell Size - Large  
V Added - Large: 81.1006 cc  
V Cell: 151.0160 cc  
Analysis Temperature: 24.6 C  
Target Pressure: 131.0 kPa  
Type of gas used: Helium  
Equilibration Time: Auto  
Flow Purge: 1.0 min.  
Maximum Runs: 15  
Number Of Runs Averaged: 3  
Deviation Requested: 0.0050 %

Analysis Results

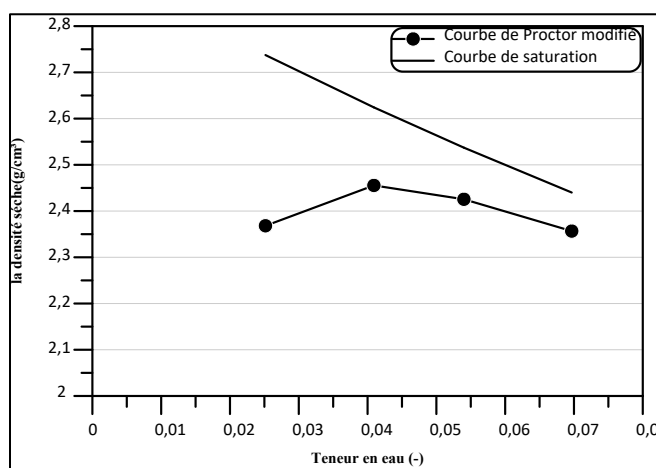
Deviation Achieved: 0.0049 %  
Average Volume: 76.8473 cc  
Volume Std. Dev.: 0.0042 cc  
**Average Density: 2.6545 g/cc**  
Density Std. Dev.: 0.0001 g/cc  
Coefficient of Variation: 0.0055 %

-----  
Run Data  
-----

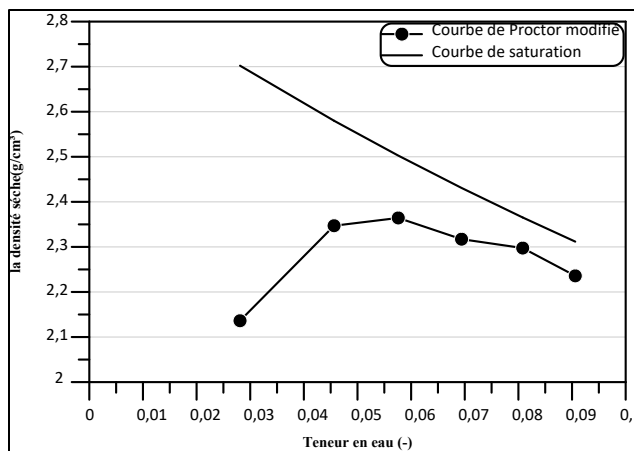
RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	76.4915	2.6668
2	76.6188	2.6624
3	76.6946	2.6598
4	76.7341	2.6584
5	76.7615	2.6575
6	76.7797	2.6568
7	76.7945	2.6563
8	76.8017	2.6561
9	76.8172	2.6555
10	76.8237	2.6553
11	76.8303	2.6551
12	76.8353	2.6549
13	76.8416	2.6547
14	76.8485	2.6544

## Résultats des essais Proctor

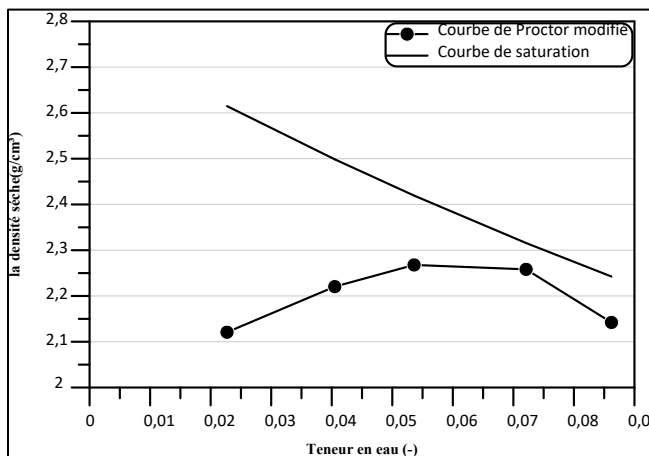
Mélange	Teneur en bentonite (%)	Teneur initial de mixage (%)	W (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (S <sub>r</sub> ) (g/cm <sup>3</sup> )
CR2-B1	6.5	2.5	2.60	2.23	2.57
		4.0	4.19	2.26	2.47
		5.5	5.49	2.28	2.39
		7.0	7.08	2.27	2.31
		8.5	8.21	2.17	2.25
CR2-B2	6.5	2.5	2.27	2.12	2.61
		4.0	4.05	2.22	2.50
		5.5	5.84	2.27	2.42
		7.0	7.21	2.26	2.32
		8.5	8.62	2.14	2.24
CR1-B1	6.5	1.5	2.81	2.14	2.70
		2.5	4.56	2.34	2.58
		4.0	5.76	2.36	2.50
		5.5	6.94	2.32	2.43
		7.0	8.08	2.29	2.37
CR1-B2	6.5	2.5	2.52	2.37	2.74
		4.0	4.09	2.45	2.62
		5.5	5.40	2.42	2.54
		7.0	6.97	2.35	2.44



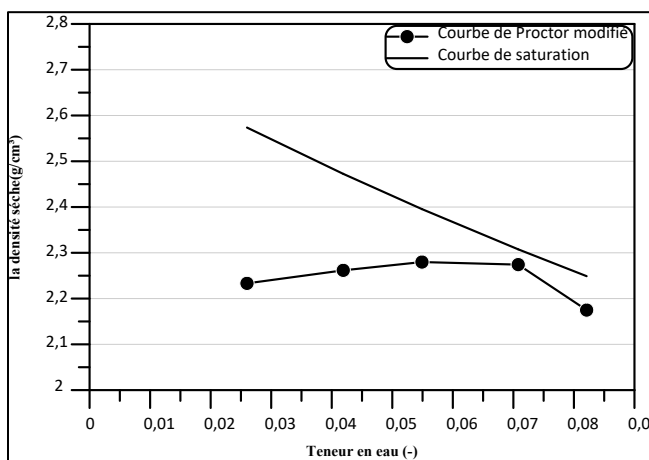
Courbe Proctor modifié pour le mélange CR1-B2.



Courbe Proctor modifié pour le mélange CR1-B1.

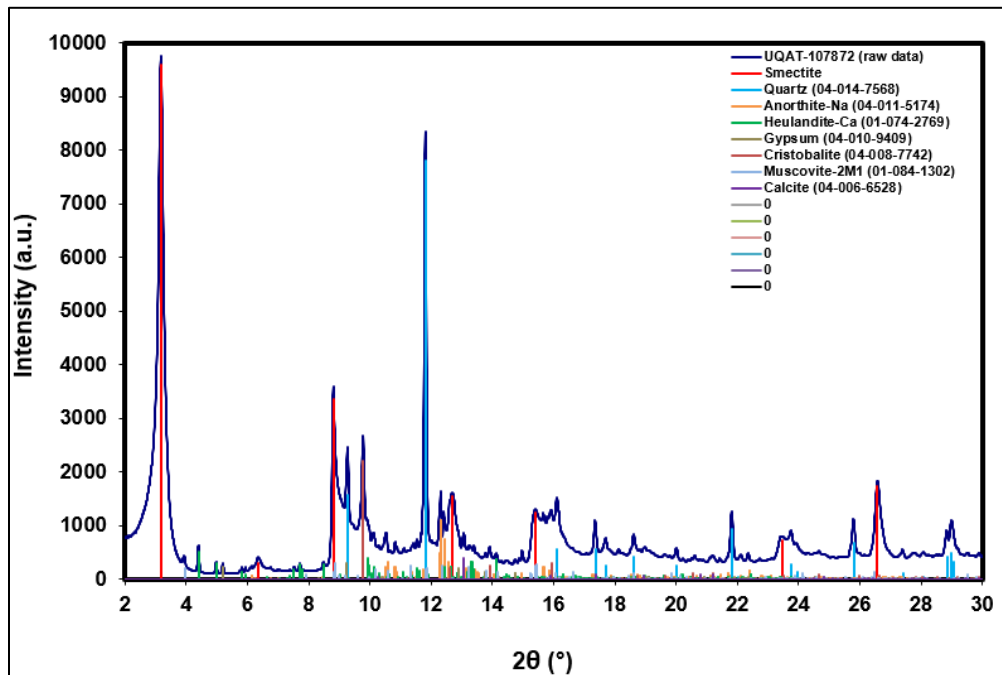


Courbe Proctor modifié pour le mélange CR2-B2.

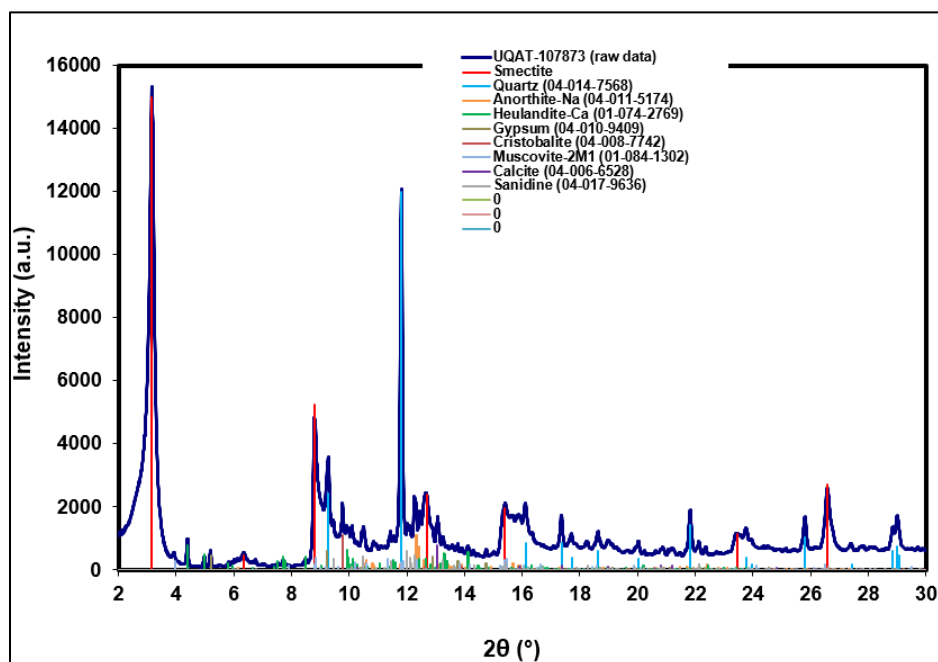


Courbe Proctor modifié pour le mélange CR2-B1

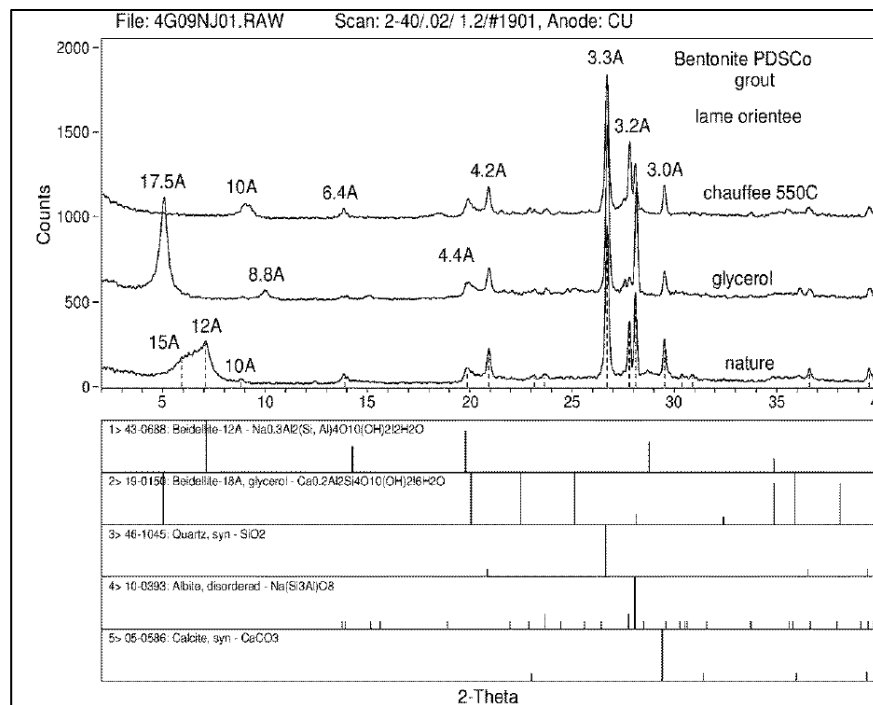
## Résultats de l'analyse minéralogique par DRX



Diffractogramme de la bentonite B1.



Diffractogramme de la bentonite B2.



Diffractogramme de la bentonite 3 (tiré de Boulanger Martel, 2015).

## ANNEXE B RESULTATS DE PERMEABILITÉ

### Hydratation des échantillons

Mélange	Teneur en bentonite (%)	Temps de saturation	k (cm/s)		
CR1-B1	5.0	20	$5.1 \times 10^{-6}$		
		43	$4.1 \times 10^{-6}$		
		67	$2.9 \times 10^{-6}$		
		90	$1.2 \times 10^{-6}$		
		121	$9.0 \times 10^{-7}$		
		144	$8.8 \times 10^{-7}$		
		191	$7.9 \times 10^{-7}$		
		234	$7.8 \times 10^{-7}$		
		251	$7.0 \times 10^{-7}$		
		275	$6.5 \times 10^{-7}$		
		295	$6.0 \times 10^{-7}$		
		305	$5.5 \times 10^{-7}$		
		325	$5.5 \times 10^{-7}$		
		6.5	6.5	29	$4.6 \times 10^{-6}$
				53	$1.6 \times 10^{-6}$
				91	$9.6 \times 10^{-7}$
127	$8.3 \times 10^{-7}$				
153	$7.4 \times 10^{-7}$				
201	$6.0 \times 10^{-7}$				
263	$5.2 \times 10^{-7}$				
287	$4.4 \times 10^{-7}$				
300	$3.2 \times 10^{-7}$				
320	$2.9 \times 10^{-7}$				
7.0	7.0	340	$2.7 \times 10^{-7}$		
		40	$1.0 \times 10^{-6}$		
		72	$7.0 \times 10^{-7}$		
		93	$5.1 \times 10^{-7}$		
		145	$4.9 \times 10^{-7}$		
		189	$2.4 \times 10^{-7}$		
		237	$1.9 \times 10^{-7}$		
		261	$1.5 \times 10^{-7}$		
		271	$9.5 \times 10^{-8}$		
		291	$9.5 \times 10^{-8}$		

		317	$9.5 \times 10^{-8}$
	8.0	40	$6.9 \times 10^{-7}$
		65	$5.7 \times 10^{-7}$
		94	$3.9 \times 10^{-7}$
		161	$2.9 \times 10^{-7}$
		233	$1.5 \times 10^{-7}$
		305	$7.9 \times 10^{-8}$
		321	$6.6 \times 10^{-8}$
		345	$6.5 \times 10^{-8}$
		365	$6.5 \times 10^{-8}$
	9.0	48	$6.0 \times 10^{-7}$
		63	$4.1 \times 10^{-7}$
		86	$3.8 \times 10^{-7}$
		141	$2.1 \times 10^{-7}$
		157	$2.0 \times 10^{-8}$
		162	$8.8 \times 10^{-8}$
		203	$7.1 \times 10^{-8}$
		243	$6.2 \times 10^{-8}$
		290	$5.7 \times 10^{-8}$
		310	$4.6 \times 10^{-8}$
		332	$4.0 \times 10^{-8}$
		354	$3.8 \times 10^{-8}$
		359	$4.0 \times 10^{-8}$
CR1-B2	6.5	65	$1.1 \times 10^{-6}$
		93	$9.3 \times 10^{-7}$
		141	$7.9 \times 10^{-7}$
		184	$6.8 \times 10^{-7}$
		199	$5.4 \times 10^{-7}$
		230	$4.9 \times 10^{-7}$
		277	$4.5 \times 10^{-7}$
		309	$3.7 \times 10^{-7}$
		329	$3.9 \times 10^{-7}$
		334	$3.9 \times 10^{-7}$
CR2-B1	5.0	50	$9.6 \times 10^{-5}$
		81	$5.6 \times 10^{-5}$
		104	$2.9 \times 10^{-5}$
		124	$9.9 \times 10^{-6}$
		142	$9.1 \times 10^{-6}$
		160	$8.7 \times 10^{-6}$
		176	$8.1 \times 10^{-6}$
		236	$7.7 \times 10^{-6}$
		266	$7.5 \times 10^{-6}$

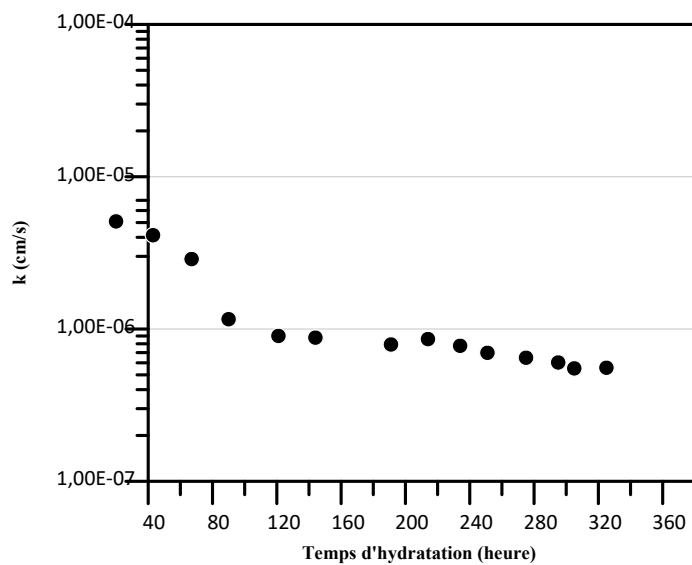
		280	$6.9 \times 10^{-6}$
		334	$7.0 \times 10^{-6}$
	7.0	60	$9.4 \times 10^{-6}$
		85	$5.8 \times 10^{-6}$
		106	$2.7 \times 10^{-6}$
		140	$2.0 \times 10^{-6}$
		158	$9.1 \times 10^{-6}$
		197	$8.2 \times 10^{-6}$
		237	$7.5 \times 10^{-6}$
		263	$6.2 \times 10^{-6}$
		311	$6.20 \times 10^{-6}$
	9.0	52	$3.9 \times 10^{-6}$
		60	$9.5 \times 10^{-7}$
		75	$8.0 \times 10^{-7}$
		97	$7.7 \times 10^{-7}$
		135	$7.3 \times 10^{-7}$
		202	$5.8 \times 10^{-7}$
		223	$4.9 \times 10^{-7}$
		240	$3.8 \times 10^{-7}$
		257	$3.5 \times 10^{-7}$
		273	$3.4 \times 10^{-7}$
		307	$3.4 \times 10^{-7}$
R-B1	7.0	53	$5.5 \times 10^{-6}$
		104	$2.7 \times 10^{-6}$
		134	$1.1 \times 10^{-6}$
		180	$9.8 \times 10^{-7}$
		202	$9.0 \times 10^{-7}$
		244	$8.6 \times 10^{-7}$
		262	$7.2 \times 10^{-7}$
		286	$6.9 \times 10^{-7}$
		334	$5.9 \times 10^{-7}$
		354	$5.8 \times 10^{-7}$
		378	$5.9 \times 10^{-7}$
S-B1	9.0	65	$9.6 \times 10^{-6}$
		98	$4.0 \times 10^{-6}$
		122	$9.1 \times 10^{-7}$
		148	$7.0 \times 10^{-7}$
		180	$4.0 \times 10^{-7}$
		215	$2.1 \times 10^{-7}$
		240	$2.5 \times 10^{-7}$
		265	$1.5 \times 10^{-7}$
		282	$8.9 \times 10^{-7}$



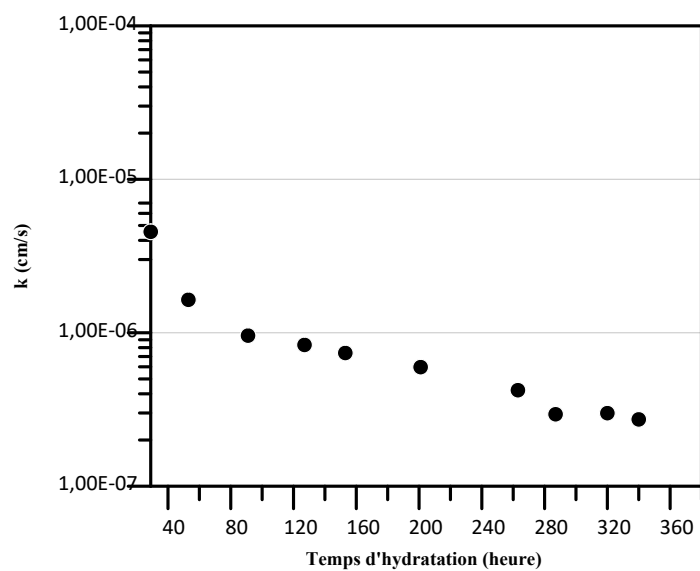
---

	322	$9.1 \times 10^{-8}$
	370	$8.9 \times 10^{-8}$
7%	30	$2.1 \times 10^{-5}$
	40	$7.7 \times 10^{-6}$
	58	$6.2 \times 10^{-6}$
	99	$5.5 \times 10^{-6}$
	123	$4.7 \times 10^{-6}$
	177	$3.7 \times 10^{-6}$
	201	$1.9 \times 10^{-6}$
	225	$9.0 \times 10^{-7}$
	248	$5.6 \times 10^{-7}$
	286	$4.6 \times 10^{-7}$
	336	$4.8 \times 10^{-7}$
	365	$4.7 \times 10^{-7}$
5.0	48	$3.6 \times 10^{-5}$
	71	$1.6 \times 10^{-5}$
	114	$9.5 \times 10^{-6}$
	149	$7.4 \times 10^{-6}$
	186	$6.0 \times 10^{-6}$
	210	$4.4 \times 10^{-6}$
	255	$3.4 \times 10^{-6}$
	283	$2.9 \times 10^{-6}$
	302	$1.8 \times 10^{-6}$
	324	$9.6 \times 10^{-7}$
	349	$9.4 \times 10^{-7}$
	364	$9.5 \times 10^{-7}$

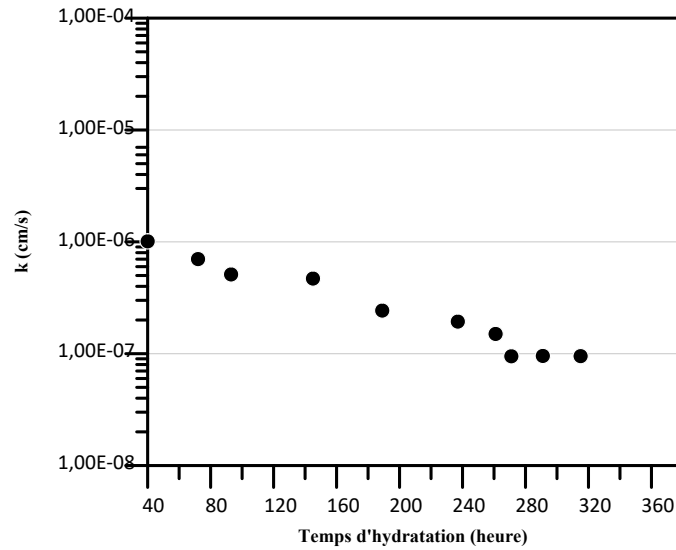
---



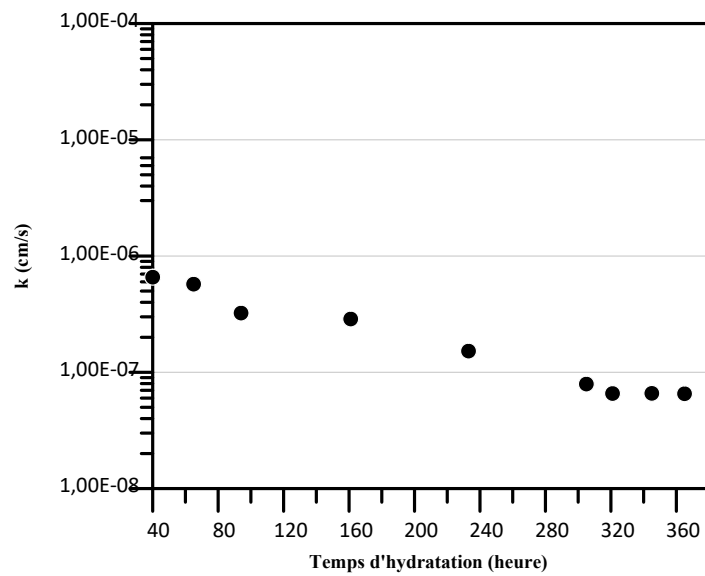
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR1-B1 à une teneur en bentonite 5.0%.



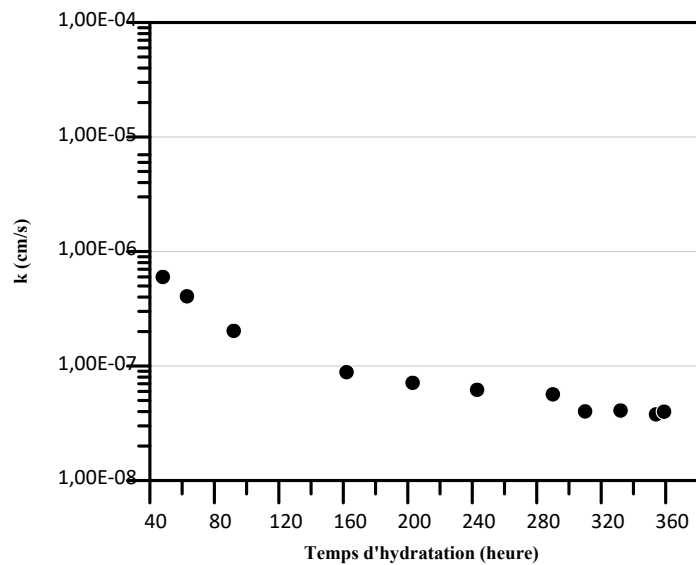
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR1-B1 à une teneur en bentonite 6.5%.



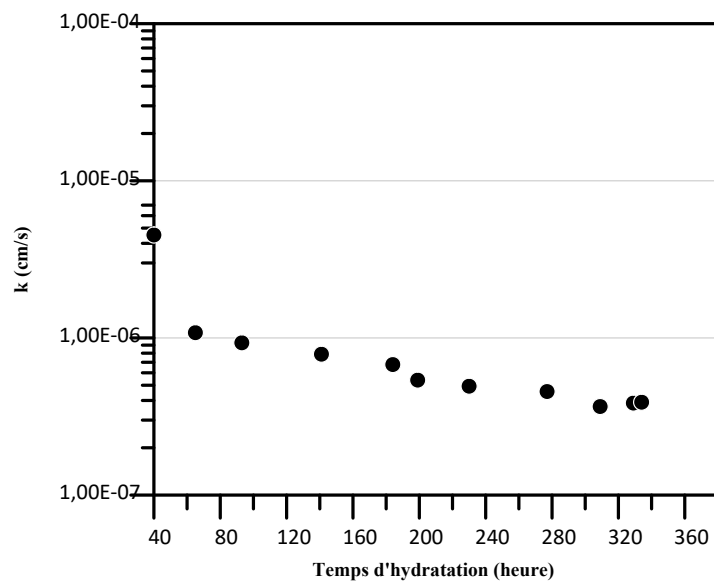
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR1-B1 à une teneur en bentonite 7.0%.



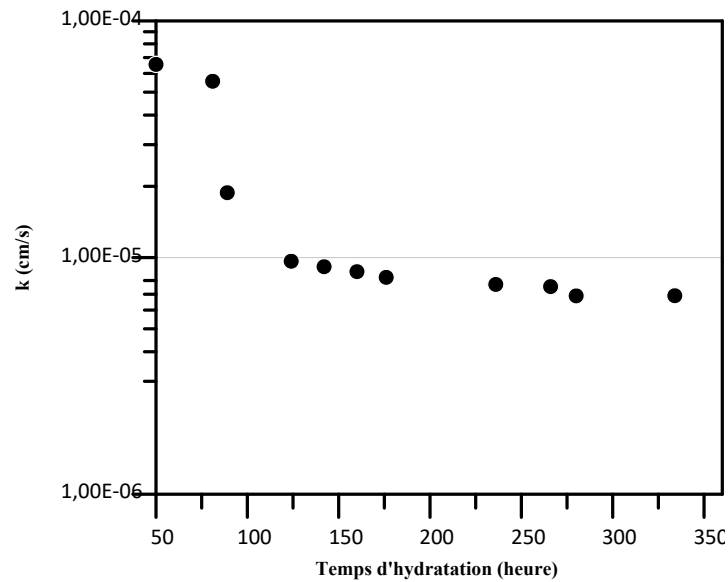
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR1-B1 à une teneur en bentonite 8.0%.



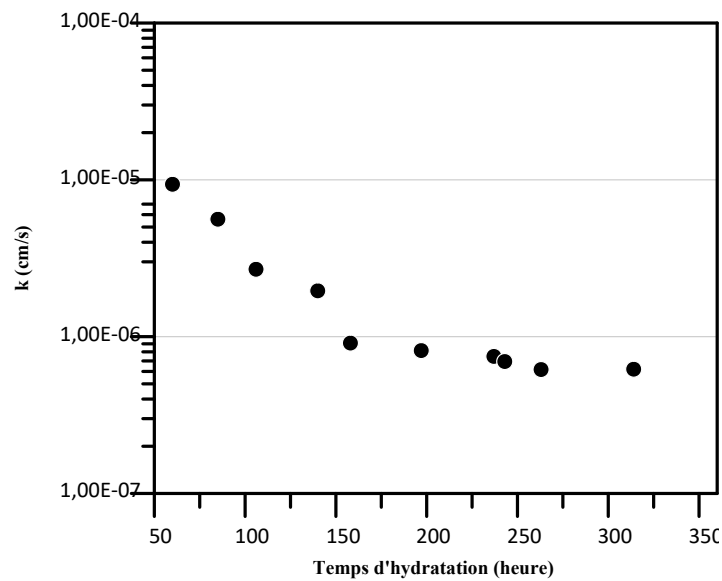
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR1-B1 à une teneur en bentonite 9.0%.



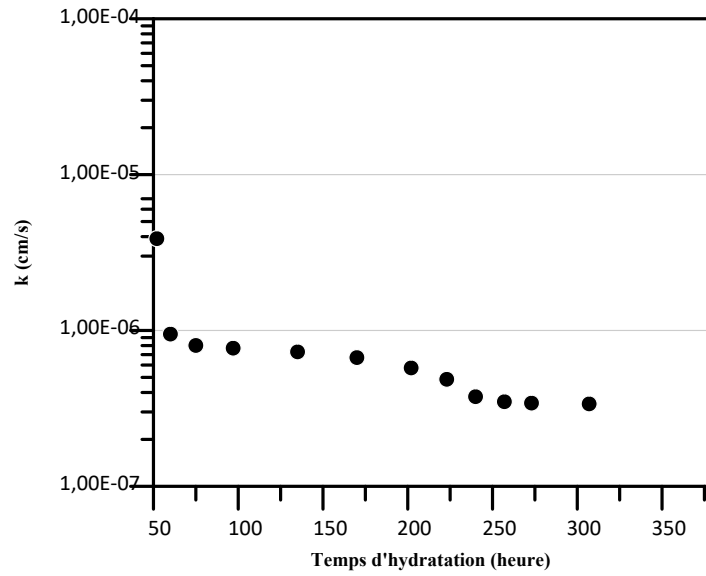
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR1-B2 à une teneur en bentonite 6.5%.



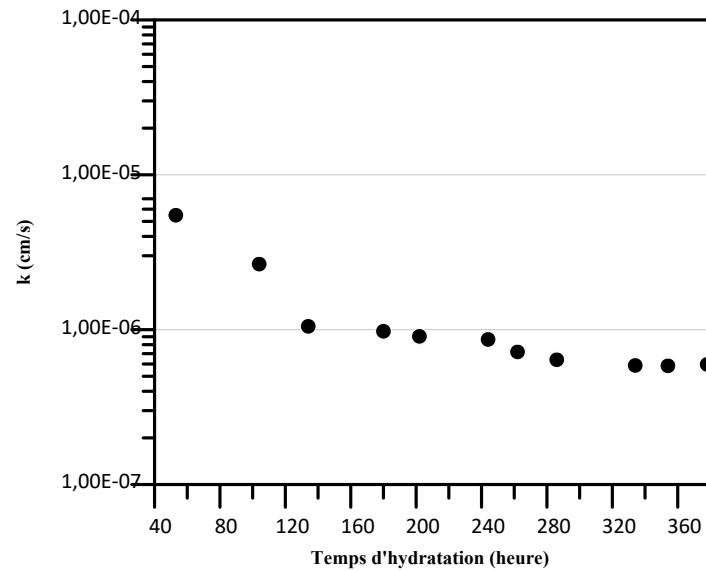
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR2-B1 à une teneur en bentonite 5.0%.



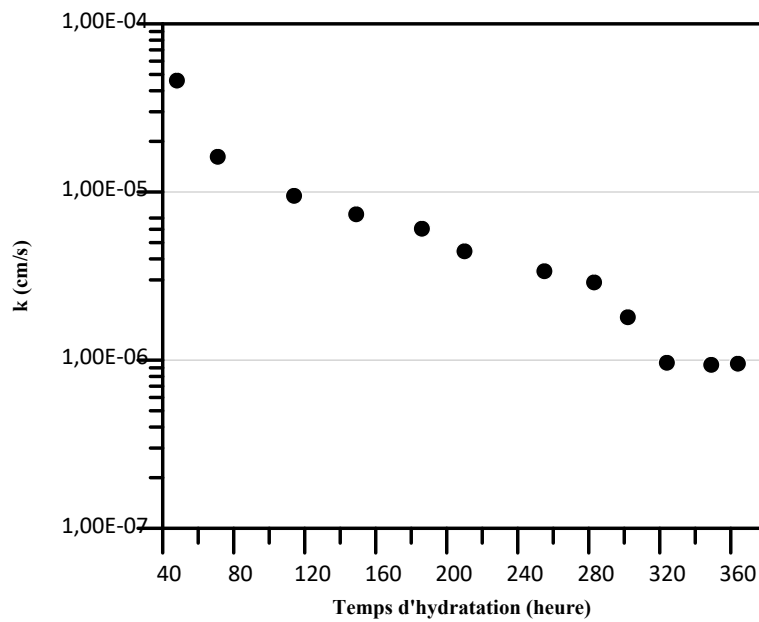
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR2-B1 à une teneur en bentonite 7.0%.



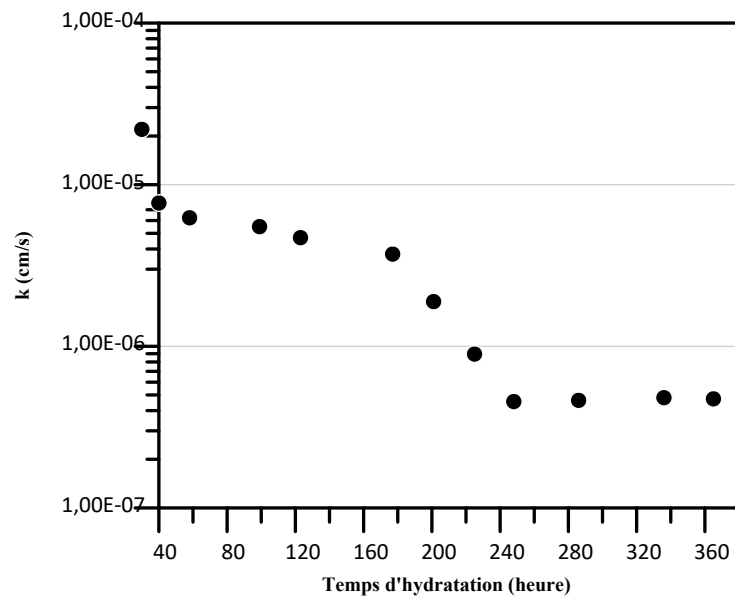
La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges CR2-B1 à une teneur en bentonite 9.0%.



La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges R-B1 à une teneur en bentonite 7.0%.



La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges S-B1 à une teneur en bentonite 5.0%.



La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges S-B1 à une teneur en bentonite 7.0%.

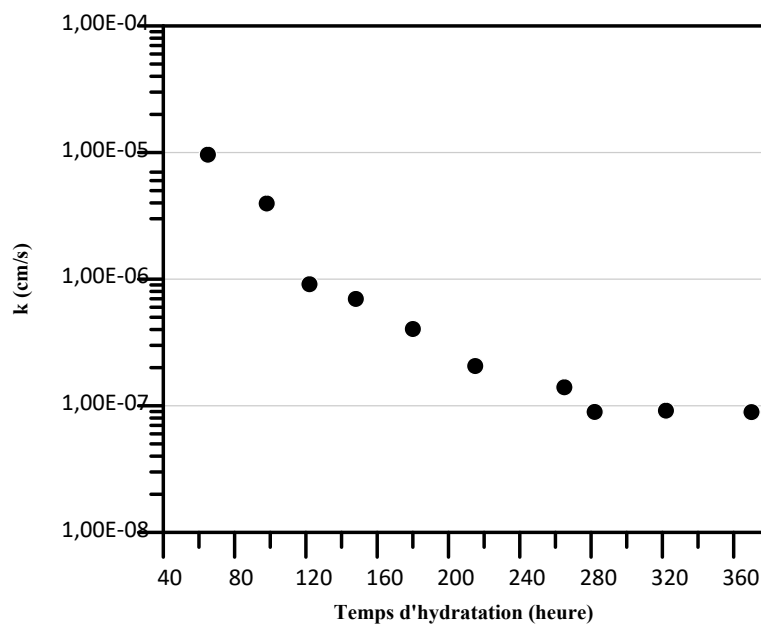


Figure : La conductivité hydraulique saturée en fonction du temps de saturation pour les mélanges S-B1 à une teneur en bentonite 9.0%.



## Degré de saturation des échantillons

Mélange	Teneur en bentonite en %	Degré de saturation final $S_{rf}$ en %
CR1-B1	5.0	91.8
	6.5	91.3
	7.0	90.5
	8.0	92.0
	9.0	90.6
CR1-B2	6.5	96.35
CR2-B1	5.0	92.9
	7.0	97.72
	9.0	95.45
R-B1	5.0	-
	7.0	94.77
	9.0	-
S-B1	5.0	97.39
	7.0	96.23
	9.0	95.67

## **ANNEXE C ARTICLE 2 : HYDRAULIC PROPERTIES OF CRUSHED ROCK-BENTONITE MIXTURES USED AS LOW PERMEABILITY MATERIALS IN MINE WASTES CONFINEMENT STRUCTURES**

Yosra Hfaiedh, Vincent Boulanger-Martel and Bruno Bussière

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Research Institute on Mines and the Environment, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

The article was submitted on May 15, 2023, in the Geotechnical Conference 2023, and it was published on October 03, 2023

### **ABSTRACT**

This study aims to characterize and optimize the hydraulic properties of crushed-rock bentonite mixtures for potential use as construction materials in mine wastes confinement structures. Several permeability tests were performed to assess the effects of bentonite type, bentonite content, crushed rock grain-size distribution and freeze-thaw cycle on the saturated hydraulic conductivity ( $k_{\text{sat}}$ ) of crushed rock-bentonite mixtures. Tests results show that the  $k_{\text{sat}}$  of the tested mixtures varied from  $5.8 \times 10^{-7}$  to  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s for bentonite contents ranging from 5.0 to 9.0%. Crushed rock-bentonite mixtures with higher bentonite contents and higher uniformity coefficients generally resulted in lower measured  $k_{\text{sat}}$ . The impact of freeze-thaw cycles on the  $k_{\text{sat}}$  of the tested mixtures was limited. The results of this study provide insights on the factors governing the  $k_{\text{sat}}$  of crushed-rock bentonite mixtures and their potential use as low permeability materials in confinement structures.

**KEY WORDS** : Hydrogeological Characterization, Mine Reclamation, Crushed Rock-Bentonite Mixture.

### **RESUMÉ**

Cette étude vise à caractériser et à optimiser les propriétés hydrauliques des mélanges gravier-bentonite utilisés comme matériaux de construction dans les structures de confinement des déchets miniers. Plusieurs essais de perméabilité ont été réalisés pour évaluer les effets du type de bentonite, de la teneur en bentonite, de la distribution

granulométrique du gravier et des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des mélanges du gravier-bentonite. Les résultats montrent que la  $k_{sat}$  des mélanges varie de  $5.8 \times 10^{-7}$  à  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s pour des teneurs de bentonite de 5.0 à 9.0%. Les mélanges gravier-bentonite ayant des teneurs en bentonite plus élevées et des coefficients d'uniformité plus importants ont observé des  $k_{sat}$  plus faibles. L'influence des cycles de gel-dégel sur  $k_{sat}$  des mélanges est demeuré faible. Les résultats de cette étude permettent de mieux comprendre les facteurs régissant sur  $k_{sat}$  des mélanges de gravier-bentonite et leur utilisation potentielle comme matériaux à faible perméabilité dans les structures de confinement.

**MOTS CLÉS:** Caractérisation hydrogéologique, Restauration minière, Mélange gravier-bentonite.

## INTRODUCTION

Soil-bentonite mixtures are commonly used as impervious materials in engineering construction. Typically, a combination of sand (Chapuis, 2002; Kenney et al., 1992) or, to a lesser extent crushed rock (e.g., Mata et al., 2005; Villar, 2006) is blended with bentonite to enhance the hydraulic characteristics of the resulting mixture. Bentonite has specific physical, hydraulic, structural, and chemical properties (i.e., high swelling capacity, low hydraulic conductivity, high water adsorption and cationic exchange capacities and high specific surface) that result in a low permeability and mechanically stable material once mixed within a granular matrix (Mitchell, 1993; Olsen and Daniel 1981). Thus, soil-bentonite mixtures are often used for the construction of dam cores, cover systems for municipal landfills, and impervious liners for confinement of various hazardous waste, or as buffer and backfill materials for underground isolation of nuclear wastes (e.g., Chapuis 1981; Chapuis et al., 1990a, 1990b; 1992; Lundgren 1981; Abeele, 1986; Komine et al., 2008; Tripathi, 2006; Guo et al., 2010).

In mine waste confinement structures such as tailings dams and engineered covers for the reclamation of tailings and waste rock storage facilities, fine-grained materials are usually required to build a barrier between the reactive waste and the environment. While soil-bentonite mixtures haven't been used widely for mine waste confinement applications, they offer an interesting alternative, especially when natural fine-grained soils are not available

close to the construction site (Boulanger-Martel et al., 2014; 2016). This is particularly the case for remote and Arctic mine sites, for which the occurrence of natural fine-grained materials deposits can be limited. Such operations also usually produce crushed rock materials that are used for construction and maintenance purposes associated with transport infrastructures (i.e., roads and airstrips: Boulanger-Martel et al., 2021). In this context, crushed rock-bentonite mixtures represent a promising option.

One of the key hydraulic properties required for the design of such mine waste confinement structures is the saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ). Several studies have been carried out on sand-bentonite mixtures used as low permeability materials (e.g., Chapuis 1990, 2002b; Kenney et al., 1992; Komine and Ogata, 1999), however, only a few studies, thus far, have focused on the hydraulic properties of crushed rock-bentonite mixtures.

This study aims to characterize and optimize the hydraulic properties of crushed-rock bentonite mixtures for potential use as construction materials in mine waste confinement structures. This article first presents the material preparation procedure as well as the basic physical and geotechnical properties of the tested materials. Then, several permeability tests were performed to assess the effects of bentonite type, bentonite content, grain-size distribution of the crushed rock, and the influence of freeze-thaw cycles on the  $k_{sat}$  of crushed rock-bentonite mixtures. Finally, this study provides insights on the ability of existing models to predict the  $k_{sat}$  of crushed rock-bentonite mixtures.

## **MATERIALS ET METHODS**

### **MATERIALS**

The soil-bentonite mixtures tested in this study were made from two different crushed rock materials and two powdered bentonites.

The first crushed rock (identified as CR1) originated from an active mine site and is currently used as a construction and maintenance material for the mine's transport infrastructures. CR1 was sampled directly from the mine's stockpile into 15-25L buckets. Materials were then manually homogenized, oven dried and, re-separated into 15 subsamples. A commercially available crushed rock (identified as CR 2) was also used for some of the tested mixtures.

Two commercially available powdered Wyoming sodium bentonites were used as constituents of the crushed rock-bentonite mixtures: the Big Horn® 200 (identified as B1) from Wyo-Ben and the Premium gel (identified as B2) from American Colloid Company. Powdered bentonite was chosen to facilitate mixing and dispersion in the soil pore space. Several crushed rock-bentonite mixtures were prepared, with bentonite contents ranging from 5.0 to 9.0% by weight.

Such bentonite contents fall within the practical range for waste containment structures. The selected bentonite contents are sufficiently high to prevent flow-induced washing of the bentonite while remaining within the optimal range for controlling water seepage. Within the spectrum of bentonite contents spanning from 5.0% to 15.0%,  $k_{sat}$  typically increases in proportion to the bentonite content (Chapuis 1990a) However, for greater bentonite contents,  $k_{sat}$  stabilizes and there is practically no further gain in increasing the bentonite content. The optimal bentonite content is the lowest amount that satisfies the hydraulic design criterion.

Each crushed rock-bentonite sample was prepared by mixing dry crushed rock with bentonite. Then, water was added to the mix to reach a gravimetric water content of 10% corresponding to degree of saturation greater than 90%. The mixture was then manually homogenized. A curing time of at least 48 hours was allowed for bentonite hydration before the permeability test was initiated. The liquid used for wetting, hydration, saturation, and permeation of the samples was tap water.

## **BASIC PHYSICAL AND GEOTECHNICAL PROPERTIES**

Before performing the various permeability tests, several techniques were used to characterize the basic physical and geotechnical properties of the materials.

The grain size distribution (GSD) of the bentonites was determined using laser diffraction techniques (with a Mastersizer S analyzer from Malvern Instruments) in air (Merkus 2009). The GSD of crushed rocks was obtained through sieving for particles  $\geq 80 \mu\text{m}$  (ASTM, D422; ASTM, 2007) and laser diffraction for particles  $\leq 80 \mu\text{m}$ . The specific surface (S.S) of the bentonites was determined using The BET (Brunauer, Emmett and Teller) method and methylene blue using the LC-21-255 method (BNQ, 2013). The specific gravity ( $G_s$ ) of the bentonites and crushed rocks was measured using ASTM standard D5550-14

(ASTM, 2014). The free swell void ratio of the bentonites was determined using ASTM D5890 standard (ASTM, 2019). The plastic index (PI) of the bentonites was obtained by determining the liquidity limit (LL) and plasticity limit (PL), as described in ASTM D4318 (ASTM, 2017). The liquid limit was assessed with a cone penetrometer using standard method A of ASTM D4318 (ASTM, 2017). Modified Proctor compaction curves were also obtained for the crushed rock-bentonite mixtures at 6.5% bentonite following standard method C of ASTM D1557 (ASTM, 2012b).

### **SATURATED HYDRAULIC TESTS**

Saturated hydraulic conductivity tests were performed in flexible wall permeameters following test method B (falling head with a fixed tailwater elevation) of ASTM D5084 (ASTM 2010). All test specimens were prepared from cured crushed rock-bentonite and compacted in a mold at a targeted porosity of 0.25. Compaction was achieved with a Proctor hammer with the energy required to reach the targeted dry density considering the initial water content of the mixture (10.0%). Saturation of the specimens was performed by circulating deaired water from bottom to top. Permeation was conducted for 240 to 360 hours at a back pressure of 25kPa. Permeability tests were performed every 24 to 48 hours to track changes in  $k_{sat}$  associated with saturation and hydration processes. Saturation and hydration were considered achieved when three successive  $k_{sat}$  values were stabilized within 1% of each other.  $k_{sat}$  was determined by performing three permeability tests at hydraulic gradients of about 20, 30 and 40.

### **INTRINSIC FACTORS ON $K_{SAT}$**

Figure 1 presents the test matrix that was followed to assess the influence of bentonite content, bentonite type, grain-size distribution of the crushed rock, and the influence of freeze-thaw cycles on the  $k_{sat}$  of crushed rock-bentonite mixtures.

The influence of bentonite content on  $k_{sat}$  was assessed by performing permeability tests on crushed rock-bentonite mixtures made with CR1 and 5.0, 6.5, 7.0, 8.0, and 9.0% B1 (Figure 1).

The effect of bentonite type on  $k_{sat}$  was evaluated by comparing the  $k_{sat}$  values obtained for mixtures made of CR1-6.5% B1 and CR1-6.5% B2. Results were also compared to those

of Boulanger Martel et al. (2016) obtained for a CR1-bentonite mixture at 6.5%. Boulanger-Martel et al. (2016) tested mixtures made with a PDSCo Grout sodium powdered bentonite (identified as B3; Figure 1).

Additional permeability tests were performed on samples composed of CR2 and B1. Results obtained for CR1 and CR2 at 5.0, 7.0 and 9.0% B1 were then analyzed to highlight the impact of the GSD of crushed rock on  $k_{sat}$  (Figure 1).

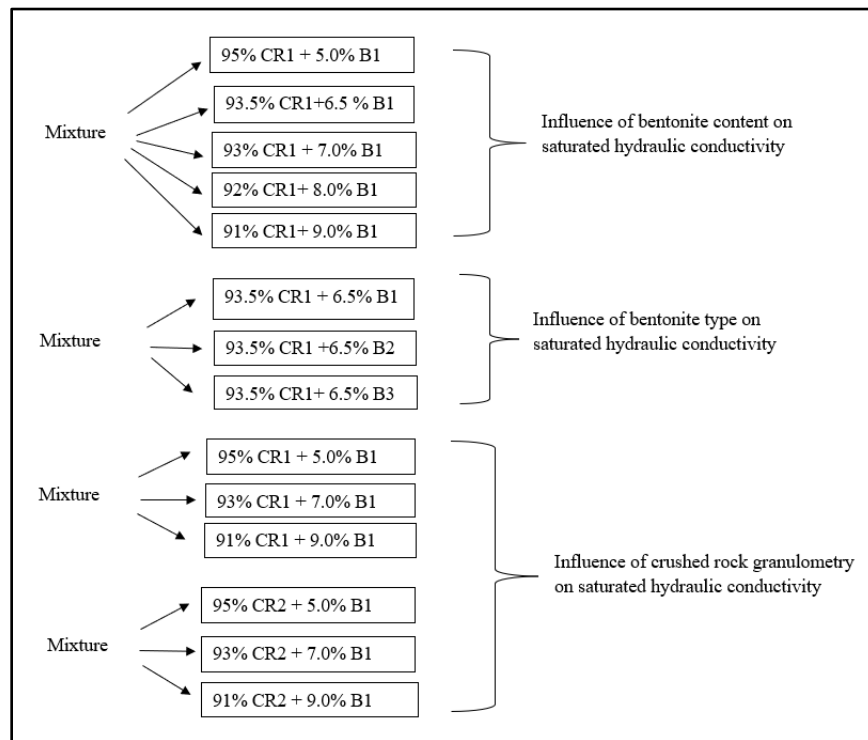


Figure 1. Matrix of permeability tests

## INFLUENCE OF FREEZE AND THAW CYCLES

All tested crushed rock-bentonite mixtures were submitted to cyclic freeze-thaw cycles permeability tests (Figure 1), as described by Boulanger-Martel et al. (2014; 2016). Samples were housed in a specifically designed freeze-thaw insulating mold that aims to simulate one-dimensional freezing and thawing. The top portion of the samples were also covered to prevent samples from drying. Freezing was achieved by placing the setup into a freezer for 48h. Freezing temperature was  $-26^{\circ}\text{C}$ , and thawing was performed at room

temperature (22.1°C on average). Permeability tests were performed after 1, 3, 5, and 10 freeze-thaw cycles.

### ABILITY OF EXISTING $K_{SAT}$ PREDICTIVE MODELS

$$k_{sat} = \frac{1.30 \times 10^{-8}}{e_f^2} \times \left( \frac{G_b \times \gamma_w}{x \times \gamma_d} - \left( \frac{1-x}{x} \right) \frac{G_b}{G_s} - 1 \right)^2 \times \left( 1 - \frac{(1-x)\gamma_d}{G_s \gamma_w} \right) \quad [1]$$

where  $k_{sat}$  : saturated hydraulic conductivity (cm/s);  $e_f$  : bentonite swell ratio ;  $G_b$  : specific gravity of bentonite;  $G_s$  : specific gravity of crushed rock ;  $\gamma_w$  : water density (kN/m<sup>3</sup>) ;  $\gamma_d$  : dry density of mixture (kN/m<sup>3</sup>) ; and  $x$ : ratio of bentonite content to crushed rock content in the mixture.

$$\log_{10} k = \frac{e^{-0,0535 \times LL - 5,286}}{0,0063 \times LL + 0,2516} \quad [2]$$

where  $e$ : bentonite void ratio; and  $LL$ : liquidity limit of bentonite.

$$\text{Log } k_{\text{préd}} = 20 \times (n_{\text{préd}}^* - 0.45) \quad [3]$$

$$n^* = n_{\text{crushed rock}} (S_r = 100\%) - \frac{2V_b}{V_s} \quad [4]$$

where  $n_{\text{crushed rock}}$ : porosity of crushed rock (base material);  $V_b$  : volume of bentonite in the mixture (cm<sup>3</sup>) ;  $V_s$ : volume of soil (cm<sup>3</sup>).

$$k_{sat} = C_p \times \frac{\gamma_w}{\mu_w} \times \left( \frac{e^{3+X}}{1+e} \right) \times \frac{1}{\rho_s^2 \times LL^{2X}} \quad [5]$$

where  $k_{sat}$  : saturated hydraulic conductivity (cm/s);  $C_p$ : a constant (5.6g<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>);  $\gamma_w$ : water density kN/m<sup>3</sup> (9.81 KN/m<sup>3</sup>) ;  $\mu_w$  : water viscosity ( $\mu_w = 10^{-3}$  Pa.s) ;  $\rho_s$  : density of mixture (Kg/m<sup>3</sup>) ;  $X$ : tortuosity coefficient ( $X=2$ );  $LL$ : liquidity limit (%) ;  $\chi$  : a constant between [0 ; 2] (in this equation  $\chi=1.5$ ); and  $e$ : void ratio of mixture.

## EXPERIMENTAL RESULTS

### BASIC PHYSICAL AND GEOTECHNICAL PROPERTIES

Tables 1, 2 and 3 summarize the characterization results obtained for the bentonites and crushed rocks.

The GSDs show that the grain size distributions of B1 and B2 were similar and finer than B3. Table 1 also shows that the GSD of CR2 was more uniform ( $C_u = 6.5$ ) than that of CR1 ( $C_u = 22.8$ ). The free swell void ratios of B1 ( $e_f = 30.50$ ) and B2 ( $e_f = 32.5$ ) were



greater than that of B3 ( $e_f = 11.32$ ), which can be explained by the significant difference in their specific surfaces. Greater swelling is generally observed at greater specific surface area (Mitchell, 1993).

### SATURATION, HYDRATION AND STABILIZATION OF $k_{SAT}$

Figure 2 shows an example of the evolution of  $k_{sat}$  with permeation time. These results show that  $k_{sat}$  decreased markedly in the first 100 permeation hours. Then the decrease in  $k_{sat}$  was more gradual until it reached equilibrium after about 360h. Such behavior is a result of the bentonite saturation and hydration process. The slow swelling of bentonite within the crushed rock matrix gradually reduces the pore space available to water flow which results in an overall decrease in  $k_{sat}$ . This behavior has been witnessed by several authors who showed that the time required for saturation of a soil-bentonite mixture varies from 240 to 360 hours using the flexible wall permeameter (e.g., Chapuis 1990; 2002). The degree of saturation of all samples was verified based on mass-to-volume relationships measured at dismantling.

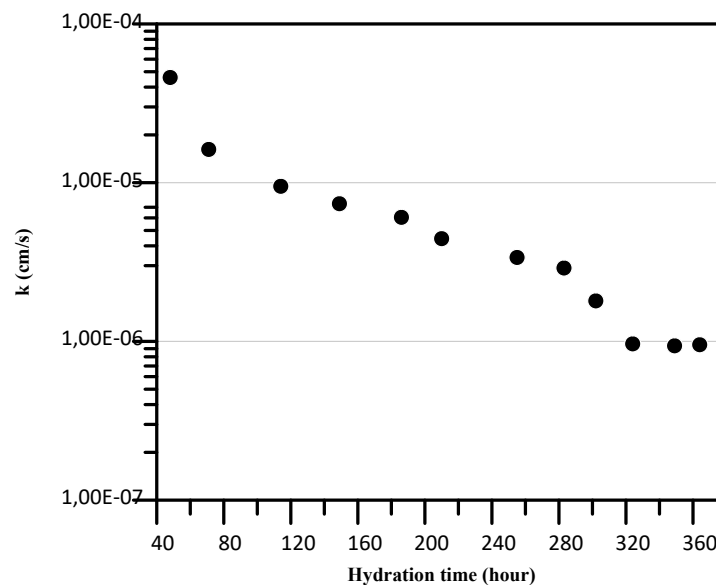


Figure 2. Evolution of  $k_{sat}$  with hydration time for crushed rock-bentonite at bentonite content of 9.0%.

Table 1. Basic characterization results for bentonites

Material	B1	B2	B3 <sup>1</sup>
G <sub>s</sub> (-)	2.42	2.67	2.59
D <sub>10</sub> (μm)	5.2	5.1	54
D <sub>30</sub> (μm)	16.1	15.8	-
D <sub>60</sub> (μm)	46.8	43.1	-
D <sub>80</sub> (μm)	87.7	80.1	-
D <sub>90</sub> (μm)	132	118	494.6
Cu (-)	9.05	8.39	6.02
S.S (m <sup>2</sup> /g)	475.02	-	18.65
LL (%)	352.5	239.1	149
PL (%)	29.4	38.5	-
PI (-)	323.1	254.6	-
e <sub>f</sub> (-)	30.5	32.5	11.3

<sup>1</sup> : data from Boulanger-Martel (2016).

D<sub>x</sub>: w/w% of particles having a diameter less than D<sub>x</sub>; G<sub>s</sub>: specific gravity; S.S : specific surface ; LL: liquidity limit; PI: plastic index; PL: plasticity index; e<sub>f</sub>: swell ratio; Cu : uniformity coefficient.

Table 2. Basic characterization results for crushed rock

Material	CR1	CR2
G <sub>s</sub> (-)	2.96	2.78
D <sub>10</sub> (μm)	368	1750
D <sub>30</sub> (μm)	2380	7400
D <sub>60</sub> (μm)	8570	11300
D <sub>80</sub> (μm)	13600	12600
D <sub>90</sub> (μm)	16600	13300
Cu (-)	22.8	6.5

Table 3. Modified Proctor curve for crushed rock – bentonite

Mixture	Bentonite content (%)	$W_{opt}$ (%)	$\rho_{d-max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (-)
CR1-B1	6.5	4.6	2.36	0.189
CR2-B1	6.5	6.3	2.29	0.169
CR1-B2	6.5	4.4	2.46	0.163
CR2-B2	6.5	6.4	2.28	0.178
CR1-B3 <sup>1</sup>	6.5	5.5	2.48	0.175

1 : data from Boulanger-Martel (2016).

### FACTORS CONTROLLING $K_{SAT}$

The following sections aims to present the main experimental results highlighting the factors controlling the  $k_{sat}$  of crushed rock-bentonite mixture.

#### EFFECT OF BENTONITE CONTENT ON $K_{SAT}$

Figure 3 and table 4 present the evolution of  $k_{sat}$  as a function of the bentonite content for CR1-B1 mixtures (also refer to Table 3). Results show that  $k_{sat}$  decreased from  $5.8 \times 10^{-7}$  to  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s for bentonite contents increasing from 5.0 to 9.0%. The higher the bentonite content, the lower the  $k_{sat}$ .

Table 4. Saturated hydraulic conductivity values of CR1- B1 mixtures.

Bentonite content (%)	$e_b$ (-)	n (-)	$k_{sat}$ (cm/s)
5.0	5.52	0.25	$5.76 \times 10^{-7}$
6.5	4.26	0.25	$2.9 \times 10^{-7}$
7.0	3.96	0.25	$9.5 \times 10^{-8}$
8.0	3.47	0.25	$6.5 \times 10^{-8}$
9.0	3.09	0.25	$3.5 \times 10^{-8}$

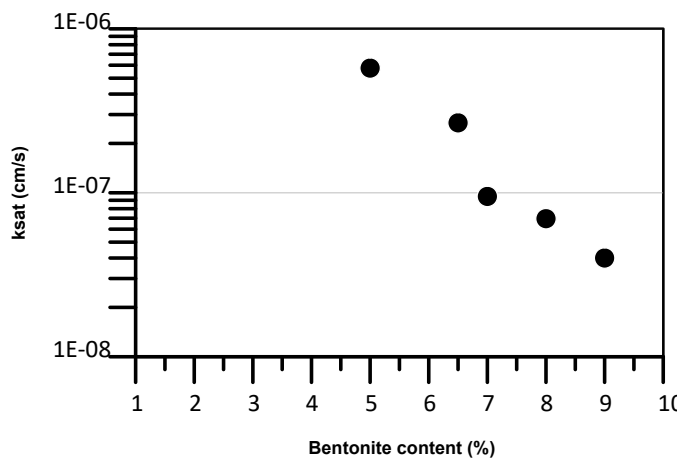


Figure 3. Saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) as a function of bentonite content.

The void ratio of bentonite in the mixtures  $e_b$  strongly controls the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures (Chapuis, 1990b; Kenney et al., 1992; Studds et al., 1998; Tripathi, 2013). The use of  $e_b$  is a common way to quantify the ability of bentonite to control water flow. The value of  $e_b$  for the mixtures can be calculated using Eq.6 (Kenney et al. (1992):

$$e_b = G_b \left[ \left( 1 + \frac{1}{r} \right) \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dm}} \right) - \frac{1}{rG_g} - 1 \right] \quad [6]$$

where  $\rho_{dm}$  is the dry density of mixture;  $r$  is the ratio of the dry masses of bentonite to that of the crushed rock and  $\rho_w$  is the density of water.

Figure 4 shows the strong correlation that exists between  $k_{sat}$  and  $e_b$ . The lower  $e_b$ , the lower  $k_{sat}$ . These findings suggest that the seepage in such mixtures is primarily governed by the properties of bentonite, particularly its void ratio.

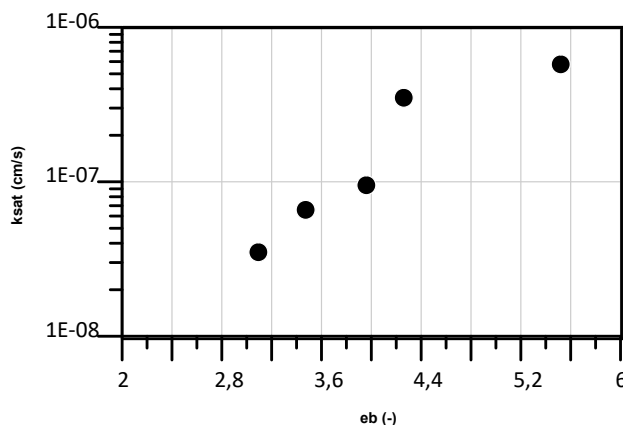


Figure 4. Saturated hydraulic conductivity as a function of the void ratio of the bentonite in the mixture  $e_b$ .

### EFFECT OF BENTONITE TYPE ON $k_{SAT}$

Table 5 shows that all measured  $k_{sat}$  values for the CR1-B1, CR1-B2, and CR1-B3 mixtures are within the same range. Considering that several other factors such as the method of mixing, the distribution of bentonite within the samples, the method of compaction, or the time of hydration or saturation of the mixture could also influence  $k_{sat}$ , the obtained results are considered similar.

The  $k_{sat}$  values in the table 4 were obtained from crushed rock-bentonite mixtures made of bentonites with different properties: the GSD of B3 is coarser than B1 and B2 and the free swell ratios of B1 and B2 are almost twice that of B3. The obtained results suggest that all tested bentonites swelled enough to occupy the pore space and control water flow. Because the measured  $k_{sat}$  values were similar and obtained from samples with similar  $e_b$  values, it is deemed that there is no significant difference in hydraulic properties. However, tests at lower bentonite contents and higher  $e_b$  values may yield a different behaviour.

Table 5. Comparison between the  $k_{sat}$  values of CR1- B1, CR1-B2 and CR1 – B3 mixtures

Mixture	Bentonite content(%)	$e_b(-)$	$k_{sat}$ (cm/s)
CR1-B1	6.5	4.26	$2.9 \times 10^{-7}$
CR1-B2	6.5	4.93	$4.0 \times 10^{-7}$
CR1-B3 <sup>1</sup>	6.5	4.18	$2.6 \times 10^{-7}$

<sup>1</sup>: data from Boulanger-Martel (2016).

### EFFECT OF CRUSHED ROCK GRAIN SIZE ON $k_{SAT}$

Table 6 shows that the  $k_{sat}$  values of the CR2-B1 mixtures ranged from  $7.7 \times 10^{-6}$  to  $3.6 \times 10^{-7}$  cm/s with bentonite contents ranging from 5.0 to 9.0%, whereas the  $k_{sat}$  of the CR1-B1 mixtures ranged from  $5.76 \times 10^{-7}$  to  $3.5 \times 10^{-8}$  cm/s over the same range of bentonite content (as shown in Table 3).

Overall, this suggests that the  $k_{sat}$  values measured for CR2-B1 were approximately one order of magnitude larger than for CR1-B1. The difference in  $k_{sat}$  is mostly explained by the difference in the uniformity coefficient of the two types of crushed rocks used in the mixtures (Figure 5). CR2 had a uniformity coefficient of 6.5, while CR1 had a coefficient of 22.8. These results indicate that the more uniform the GSD of the crushed rock, the higher the  $k_{sat}$  of the crushed rock-bentonite mixture.

Table 6. Saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) values of the CR2- B1 mixtures

Bentonite content (%)	$e_b$ (-)	$k_{sat}$ (cm/s)
5.0	5.85	$7.7 \times 10^{-6}$
7.0	4.19	$8.7 \times 10^{-7}$
9.0	3.27	$3.6 \times 10^{-7}$

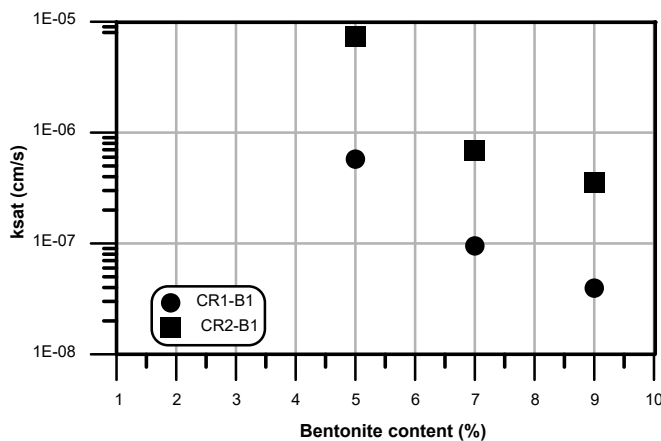


Figure 5. Saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) as a function of bentonite content for mixtures with CR1 and CR2.

## FREEZE AND THAW TESTS RESULTS

The results of the freeze-thaw permeability tests are presented in Figure 6. These results indicate that the saturated hydraulic conductivities of mixtures containing CR1-B1 and CR1-B2 at a bentonite content of 6.5% increased by an order of magnitude after three to five freeze-thaw cycles, compared to their initial values. However, Boulanger Martel's (2015) results for the CR1-B3 mixture showed that the  $k_{sat}$  at a bentonite content of 6.5% increased significantly after three to five cycles and reached 735 times its initial value (as shown in Figure 6). Based on these results, it can be observed that B3 was much more influenced by the freeze-thaw phenomenon than B1 and B2. Thus, the  $k_{sat}$  of CR2-B1 mixtures at a bentonite content of 5.0%, 7.0%, and 9.0% were much more influenced by the freeze-thaw phenomenon than those of the CR1-B1 mixtures for the same bentonite content (Figure 7). It can be concluded that the grain-size distribution of the crushed rock has an influence on the resistance of crushed rock-bentonite mixtures on the effects of freeze-thaw cycles.

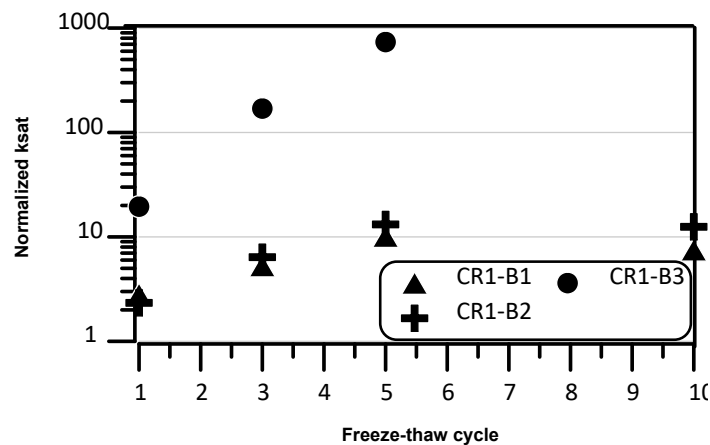


Figure 6. Normalized  $k_{sat}$  as a function of freeze-thaw for CR1-B1, CR1-B2 and CR1-B3.

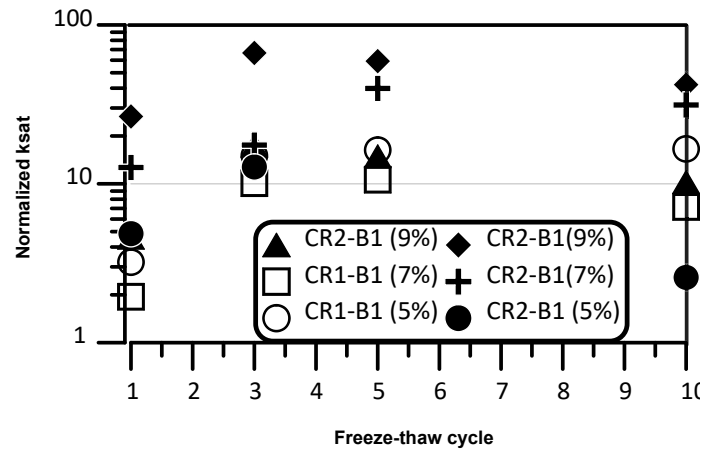


Figure 7. Normalized  $k_{sat}$  as function of freeze-thaw for CR1-B1 and CR2-B1 at bentonite contents ranging from 5.0 to 9.0%.

## PREDICTION RESULTS

Figure 8 shows that all tested predictive models provided underestimated  $k_{sat}$  values. The models of Chapuis (1990), Tripathi (2013), and Sivapullaiah (2000) are specific models used to predict the  $k_{sat}$  of sand-bentonite mixtures.

Generally, these models performed similarly and predicted  $k_{sat}$  values one to two orders of magnitude lower than measured  $k_{sat}$ . The KCM model was designed to compute the  $k_{sat}$  of plastic soil (Mbonimpa et al. 2002), therefore, the KCM model underestimated the  $k_{sat}$  of the tested crushed rock-bentonite mixtures by about five orders of magnitude. Overall, the tested models did not adequately predict the  $k_{sat}$  of the crushed rock-bentonite mixtures. This is mostly attributed to the fact that these models were not designed nor validated to predict the  $k_{sat}$  of such materials. Crushed rock-bentonite mixtures are composed of a solid crushed rock matrix filled by swelled bentonite. Such a structure results in a relatively low porosity material with a complex pore space in which water flow is governed by  $e_b$ .



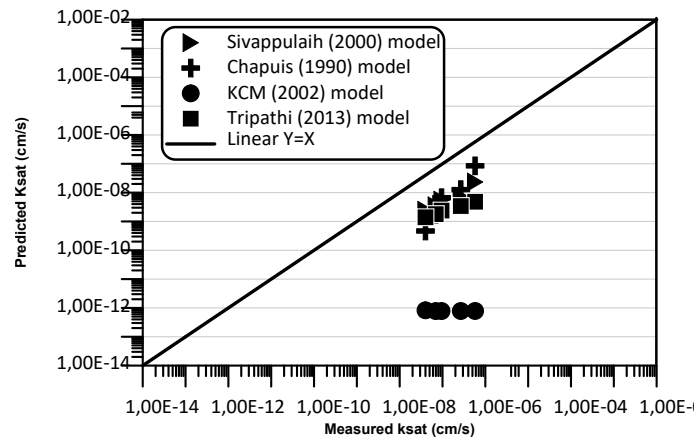


Figure 8. Predicted saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) as a function of measured saturated hydraulic conductivity.

## DISCUSSION

The results of this study indicate that the higher the bentonite content and the higher the uniformity coefficient, the lower the  $k_{sat}$ . Such findings align with the results obtained by Renken (2006) and Boulanger-Martel (2015). This decrease in  $k_{sat}$  values is explained by the increase in the proportion of soil occupied by bentonite. It indicates that the higher the uniformity coefficient, the lower the  $k_{sat}$ ; these results are supported by several other studies (e.g., Chapuis 1981; 1990a; Lundgren 1981).

The results also demonstrated that the types of bentonites tested in this study did not affect  $k_{sat}$ . However, compared to B1 and B2, B3 was shown to be significantly affected by freeze-thaw cycles. This is mostly attributed to the swelling properties of bentonites and differences in mineralogy (Boulanger-Martel et al. 2016).

The use of crushed rock-bentonite mixtures as low permeability materials in mine waste confinement structures requires globally low  $k_{sat}$  materials ( $k_{sat} \leq 10^{-7}$  cm; Aubertin et al., 1995, 2002a). In terms of  $k_{sat}$ , the results of this study suggest that most of the tested crushed rock-bentonite mixtures represent promising construction materials for mine waste confinement structures. However, for the overall purpose of optimizing the hydraulic properties of crushed-rock bentonite mixtures for potential use as construction materials in mine wastes confinement structures, the CR1-B1 materials (and CR1-B2, to some extent) provided lower  $k_{sat}$  values than the CR2-B1 mixtures at similar bentonite contents. The

CR1-B1 and CR1-B2 mixtures were less impacted by freeze-thaw cycles than CR1-B3 and CR2-B1. Such results, suggest that, globally, CR1-B1 or CR1-B2 would represent better construction materials in cold climatic conditions.

With the constantly increasing costs of powdered bentonite, optimizing the hydraulic properties of crushed rock-bentonite mixtures, and especially minimizing the bentonite content required to achieve a specific  $k_{sat}$  is paramount for the use of such materials. In this respect, predictive  $k_{sat}$  models are useful tools to help designers optimize the hydraulic properties of such materials. Several existing models for predicting the  $k_{sat}$  of soil-bentonite mixtures and plastic soils have inconclusively been tested for crushed rock-bentonite mixtures. Based on the results of this study, predictive  $k_{sat}$  models should consider the specific properties of crushed rock-bentonite mixtures – the properties of the solid matrix and the flow-controlling pore space occupied by bentonite. One prospective avenue to such development could be the introduction of a material function describing the void ratio of bentonite ( $e_b$ ) within crushed rock-bentonite mixtures in the KCM model (Mbonimpa et al., 2002).

## CONCLUSION

This study aimed to characterize and optimize the hydraulic properties of crushed-rock bentonite mixtures for potential use as construction materials in mine wastes confinement structures. A series of permeability tests were conducted to evaluate how the type of bentonite, its proportion in the mixture, the grain size distribution of the crushed rock, and the effects of freeze-thaw cycles impact the saturated hydraulic conductivity of crushed rock-bentonite mixtures. The results showed that, in general, crushed rock-bentonite mixtures that contained higher quantities of bentonite and had higher uniformity coefficients exhibited lower measured  $k_{sat}$ . The effects of freeze-thaw cycles on the  $k_{sat}$  of the tested mixtures were minimal. Overall, the results suggest that crushed rock-bentonite mixtures are a promising alternative to natural fine-grained soils for the construction of mine wastes confinement structures.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)-UQAT Industrial Research Chair on Mine Site Reclamation and by the Research Institute on Mines and the Environment (RIME UQAT-Polytechnique; <http://www.irme.ca>) and its industrial partners. The authors would also like to thank Justine Cheminal for her help during the preliminary steps of this work.

## REFERENCES

- Aubertin, M., Bussiere, B., & Chapuis, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 470-482.
- ASTM, D. (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils.
- Boulanger-Martel, V. (2015). Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques, [École Polytechnique de Montréal].
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2021). Resistance of a soapstone waste rock to freeze-thaw and wet-dry cycles: implications for use in a reclamation cover in the Canadian Arctic. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 41-54
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., Côté, J., & Mbonimpa, M. (2016). Influence of freeze–thaw cycles on the performance of covers with capillary barrier effects made of crushed rock–bentonite mixtures to control oxygen migration. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(5), 753-764.
- Chapuis, R. P. (1990). Sand–bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 47-57.
- De normalisation du Québec, B. (2013). BNQ 2501-025. *Sols–Analyse granulométrique des sols inorganiques*.

- Kenney, T., Veen, W. V., Swallow, M. A., & Sungaila, M. (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite–sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 364-374.
- Komine, H. (2010). Predicting hydraulic conductivity of sand–bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes. *Engineering Geology*, 114(3-4), 123-134.
- Konrad, J.-M. (1989). Effect of freeze–thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(2), 217-226.
- 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.
- 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.
- Mitchell, J.K. (1993) Fundamentals of soil behavior. John Wiley & Sons Inc
- Ouyang, S., & Daemen, J. (1996). Performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole seals. *Sealing of boreholes and underground excavations in rock*, 65-95.
- Sällfors, G., & Öberg-Högsta, A.-L. (2002). Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical & Geological Engineering*, 20, 65-80.
- Shepherd, R. G. (1989). Correlations of permeability and grain size. *Groundwater*, 27(5), 633-638.
- Sivapullaiah, P., Sridharan, A., & Stalin, V. (2000). Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Canadian geotechnical journal*, 37(2), 406-413.
- Soil, A. C. D.-o., & Rock. (2010). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. ASTM International.

- Standard, A. (2006). D2434-68, 2006. *Standard test method for permeability of granular soils (Constant Head)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi, 10, D0422.
- Studds, P.G., Stewart, D.I., Cousens, T.W. (1998) The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures. *Clay Minerals* 33, 651-660.
- Tong, S., & Shackelford, C. (2016). Standardized hydraulic conductivity testing of compacted sand-bentonite mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 39(6), 1015-1029.
- Tripathi, K. (2013). Hydraulic conductivity prediction of saturated sand-bentonite mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 581-591.
- Wong, L. C., & Haug, M. D. (1991). Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 784-793

## ANNEXE D RÉSULTATS DE PRÉDICTION

### Application des modèles existés

Modèle de Chapuis (1990)

	Teneur en bentonite	m <sub>b</sub> en g	m <sub>s</sub> en g	V <sub>b</sub> en cm <sup>3</sup>	V <sub>s</sub> en cm <sup>3</sup>	S <sub>r</sub> (%)	n*	k <sub>sat</sub> prédite (cm/s)	k <sub>sat</sub> mesurée (cm/s)
CR1- B1	5.0	150	2850	61.8	963.2	91.8	0.20	7.2×10 <sup>-6</sup>	5.8×10 <sup>-7</sup>
	6.5	195	2805	80.5	947.9	91.3	0.15	9.9×10 <sup>-7</sup>	2.9×10 <sup>-7</sup>
	7.0	210	2790	86.7	942.9	90.5	0.13	4.6×10 <sup>-7</sup>	9.5×10 <sup>-8</sup>
	8.0	240	2760	99.0	932.7	92.0	0.11	1.6×10 <sup>-7</sup>	7.0×10 <sup>-8</sup>
	9.0	270	2730	111.0	922.6	90.6	0.07	3.3×10 <sup>-8</sup>	4.0×10 <sup>-8</sup>
CR2- B1	5.0	150	2850	61.7	1025.2	92.9	0.18	3.9×10 <sup>-6</sup>	7.7×10 <sup>-6</sup>
	7.0	210	2790	86.3	1003.6	97.7	0.13	3.6×10 <sup>-7</sup>	6.9×10 <sup>-7</sup>
	9.0	270	2730	111.0	982.0	95.4	0.073	3.0×10 <sup>-8</sup>	3.7×10 <sup>-7</sup>
S-B1	5.0	150	2850	61.7	1075.5	97.3	0.23	3.3×10 <sup>-5</sup>	2.3×10 <sup>-6</sup>
	7.0	210	2790	86.3	1052.8	96.2	0.17	2.9×10 <sup>-6</sup>	5.9×10 <sup>-7</sup>
	9.0	270	2730	111.0	1030.2	95.6	0.12	2.4×10 <sup>-7</sup>	2.1×10 <sup>-7</sup>
T-B1	5.0	150	2850	61.7	1059.5	100.	0.26	1.8×10 <sup>-4</sup>	2.3×10 <sup>-6</sup>
	7.0	210	2790	86.3	1037.2	94.8	0.23	4.7×10 <sup>-5</sup>	5.9×10 <sup>-7</sup>
	9.0	270	2730	111.0	1014.9	100.	0.18	4.2×10 <sup>-6</sup>	2.1×10 <sup>-7</sup>

## Modèle Sivapullaiah et al (2000)

Mélange	Teneur en bentonite	$e_b$ (-)	LL (%)	Log $k_{sat}$	$k_{sat}$ prédite (cm/s)	$k_{sat}$ mesurée (cm/s)
CR1-B1	5.0	5.52	352.55	-7.53	$2.9 \times 10^{-8}$	$5.8 \times 10^{-7}$
	6.5	4.26	352.55	-8.04	$9.1 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-7}$
	7.0	3.96	352.55	-8.16	$6.9 \times 10^{-9}$	$9.5 \times 10^{-8}$
	8.0	3.47	352.55	-8.36	$4.4 \times 10^{-9}$	$7.0 \times 10^{-8}$
	9.0	3.09	352.55	-8.51	$3.1 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-8}$
CR2-B1	5.0	5.85	352.55	-7.40	$4.0 \times 10^{-8}$	$7.7 \times 10^{-6}$
	7.0	4.19	352.55	-8.07	$8.5 \times 10^{-9}$	$6.9 \times 10^{-7}$
	9.0	3.27	352.55	-8.44	$3.6 \times 10^{-9}$	$3.7 \times 10^{-7}$
S-B1	5.0	7.86	352.55	-6.59	$2.6 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	5.63	352.55	-7.49	$3.2 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-7}$
	9.0	4.38	352.55	-7.99	$1.0 \times 10^{-8}$	$2.1 \times 10^{-7}$
T-B1	5.0	7.76	352.55	-6.62	$2.4 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	5.56	352.55	-7.58	$3.0 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-7}$
	9.0	4.33	352.55	-8.01	$9.7 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-7}$

Modèle de KCM (Mbomimpa et al., 2002)

Mélange	Teneur en bentonite (%)	e (-)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$k_{sat}$ prédite (cm/s)	$k_{sat}$ mesurée (cm/s)
CR1-B1	5.0	0.33	2926.6	$7.8 \times 10^{-13}$	$5.8 \times 10^{-7}$
	6.5	0.33	2917.1	$7.8 \times 10^{-13}$	$2.9 \times 10^{-7}$
	7.0	0.33	2913.9	$7.8 \times 10^{-13}$	$9.5 \times 10^{-8}$
	8.0	0.33	2907.6	$7.8 \times 10^{-13}$	$7.0 \times 10^{-8}$
	9.0	0.33	2901.3	$8.3 \times 10^{-13}$	$4.0 \times 10^{-8}$
CR2-B1	5.0	0.33	2761.1	$8.8 \times 10^{-13}$	$7.7 \times 10^{-6}$
	7.0	0.33	2753.0	$8.9 \times 10^{-13}$	$6.9 \times 10^{-7}$
	9.0	0.33	2745.0	$8.9 \times 10^{-13}$	$3.7 \times 10^{-7}$
S-B1	5.0	0.43	2637.7	$3.3 \times 10^{-12}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	0.43	2632.7	$3.3 \times 10^{-12}$	$5.9 \times 10^{-7}$
	9.0	0.43	2627.9	$3.3 \times 10^{-12}$	$2.1 \times 10^{-7}$
T-B1	5.0	0.54	2675.3	$9.3 \times 10^{-12}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	0.54	2669.4	$9.3 \times 10^{-12}$	$5.9 \times 10^{-7}$
	9.0	0.54	2663.6	$9.4 \times 10^{-12}$	$2.1 \times 10^{-7}$



## Modèle de Tripathi (2013)

Mélange	Teneur en bentonite (%)	$G_m$ (-)	$X$ (-)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$k_{sat}$ prédite (cm/s)	$k_{sat}$ mesurée (cm/s)
CR1-B1	5.0	2.93	0.053	2.19	$4.8 \times 10^{-9}$	$5.8 \times 10^{-7}$
	6.5	2.92	0.063	2.18	$3.4 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-7}$
	7.0	2.91	0.075	2.18	$2.4 \times 10^{-9}$	$9.5 \times 10^{-8}$
	8.0	2.91	0.087	2.17	$1.8 \times 10^{-9}$	$7.0 \times 10^{-8}$
	9.0	2.90	0.099	2.17	$1.4 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-8}$
CR2-B1	5.0	2.76	0.053	2.07	$3.0 \times 10^{-11}$	$7.7 \times 10^{-6}$
	7.0	2.75	0.063	2.06	$2.1 \times 10^{-11}$	$6.9 \times 10^{-7}$
	9.0	2.74	0.075	2.06	$1.6 \times 10^{-11}$	$3.7 \times 10^{-7}$
S-B1	5.0	2.64	0.053	1.84	$7.7 \times 10^{-11}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	2.63	0.063	1.84	$3.8 \times 10^{-11}$	$5.9 \times 10^{-7}$
	9.0	2.62	0.075	1.83	$2.2 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-7}$
T-B1	5.0	2.68	0.053	1.84	$7.8 \times 10^{-11}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	2.67	0.063	1.83	$3.8 \times 10^{-11}$	$5.9 \times 10^{-7}$
	9.0	2.66	0.075	1.83	$2.2 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-7}$

Modification de l'équation  $k_p$

Proposition 1

Résultats de la comparaison entre les valeurs de  $k_{sat}$  mesurées et celles prédites.

Mélange	Teneur en Bentonite (%)	$e_b(-)$	$k_{sat}$ (cm/s) mesurées	$k_{sat}$ prédites (cm/s)								
				X=0	X=0.5	X=1	X=1.5	X=2	X=2.5	X=3	X=3.5	X=4
CR1-B1	5.0	5.52	$5.8 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-9}$	$5.5 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-8}$	$7.1 \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-6}$
	6.5	4.26	$3.5 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-9}$	$5.8 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$2.4 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^{-7}$
	7.0	3.96	$9.5 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-9}$	$2.8 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-9}$	$9.0 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$3.6 \times 10^{-8}$	$7.1 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-7}$
	8.0	3.47	$6.6 \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^{-9}$	$3.0 \times 10^{-9}$	$5.6 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$3.6 \times 10^{-8}$	$6.7 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-7}$
	9.0	3.09	$3.5 \times 10^{-8}$	$6.7 \times 10^{-10}$	$1.7 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	$3.6 \times 10^{-9}$	$6.4 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-8}$
CR2-B1	5.0	5.85	$7.7 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$5.1 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$7.3 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$4.2 \times 10^{-5}$
	7.0	4.12	$6.9 \times 10^{-7}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.6 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-7}$	$6.4 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-6}$	$5.5 \times 10^{-6}$
	9.0	3.27	$3.6 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$5.6 \times 10^{-7}$	$6.5 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-6}$
S-B1	5.0	7.86	$9.5 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-6}$	$5.2 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$4.1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$9.1 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$7.1 \times 10^{-3}$
	7.0	5.63	$4.7 \times 10^{-7}$	$9.2 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$5.2 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-4}$	$9.2 \times 10^{-3}$
	9.0	4.38	$9.0 \times 10^{-8}$	$5.4 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-5}$	$9.5 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-4}$
T-B1	5.0	7.76	$2.3 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-8}$	$8.3 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-7}$	$6.4 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^{-5}$
	7.0	5.56	$5.9 \times 10^{-7}$	$5.2 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$2.9 \times 10^{-8}$	$6.9 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-7}$	$9.2 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$
	9.0	4.33	$2.1 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$6.4 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$5.8 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$	$5.2 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-6}$

Proposition 2

Résulte de la comparaison entre les valeurs de  $k_{\text{sat}}$  mesurées et celles prédites

	Teneur en bentonite (%)	$e_b$ (-)	$k_{\text{sat}}$ mesurées (cm/s)	$k_{\text{sat}}$ prédites (cm/s)								
				X=0	X=0.5	X=1	X=1.5	X=2	X=2.5	X=3	X=3.5	X=4
CR1-B1	5.0	5.52	$5.8 \times 10^{-7}$	$7.2 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-8}$	$9.4 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-6}$	$6.7 \times 10^{-6}$
	6.5	4.26	$3.5 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$8.5 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$3.6 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-7}$	$7.2 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-6}$
	7.0	3.96	$9.5 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$7.0 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$5.6 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-7}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$8.7 \times 10^{-7}$
	8.0	3.47	$6.6 \times 10^{-8}$	$2.7 \times 10^{-9}$	$4.9 \times 10^{-9}$	$9.2 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-7}$	$4.7 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
	9.0	3.09	$3.5 \times 10^{-8}$	$2.1 \times 10^{-9}$	$3.6 \times 10^{-9}$	$6.4 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-8}$	$7.8 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-7}$
CR2-B1	5.0	5.85	$7.7 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-8}$	$6.0 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$3.5 \times 10^{-7}$	$8.5 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$
	7.0	4.12	$6.9 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$2.1 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-8}$	$8.8 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-6}$
	9.0	3.27	$3.6 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-9}$	$5.2 \times 10^{-9}$	$9.5 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	$5.6 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-7}$
S-B1	5.0	7.86	$9.5 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$9.5 \times 10^{-8}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{-7}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$4.6 \times 10^{-5}$
	7.0	5.63	$4.7 \times 10^{-7}$	$5.9 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-8}$	$7.9 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-7}$	$9.7 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$6.0 \times 10^{-6}$
	9.0	4.38	$9.0 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$7.2 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	$6.6 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$5.7 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-6}$
T-B1	5.0	7.76	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-8}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$9.9 \times 10^{-5}$
	7.0	5.56	$5.9 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-7}$	$9.7 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-5}$
	9.0	4.33	$2.1 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$7.0 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-6}$

### Développement d'une troisième équation

Dans le cadre de ce mémoire, le potentiel d'une troisième équation basé sur le modèle de Mbonimpa et al., (2002) a été évalué :

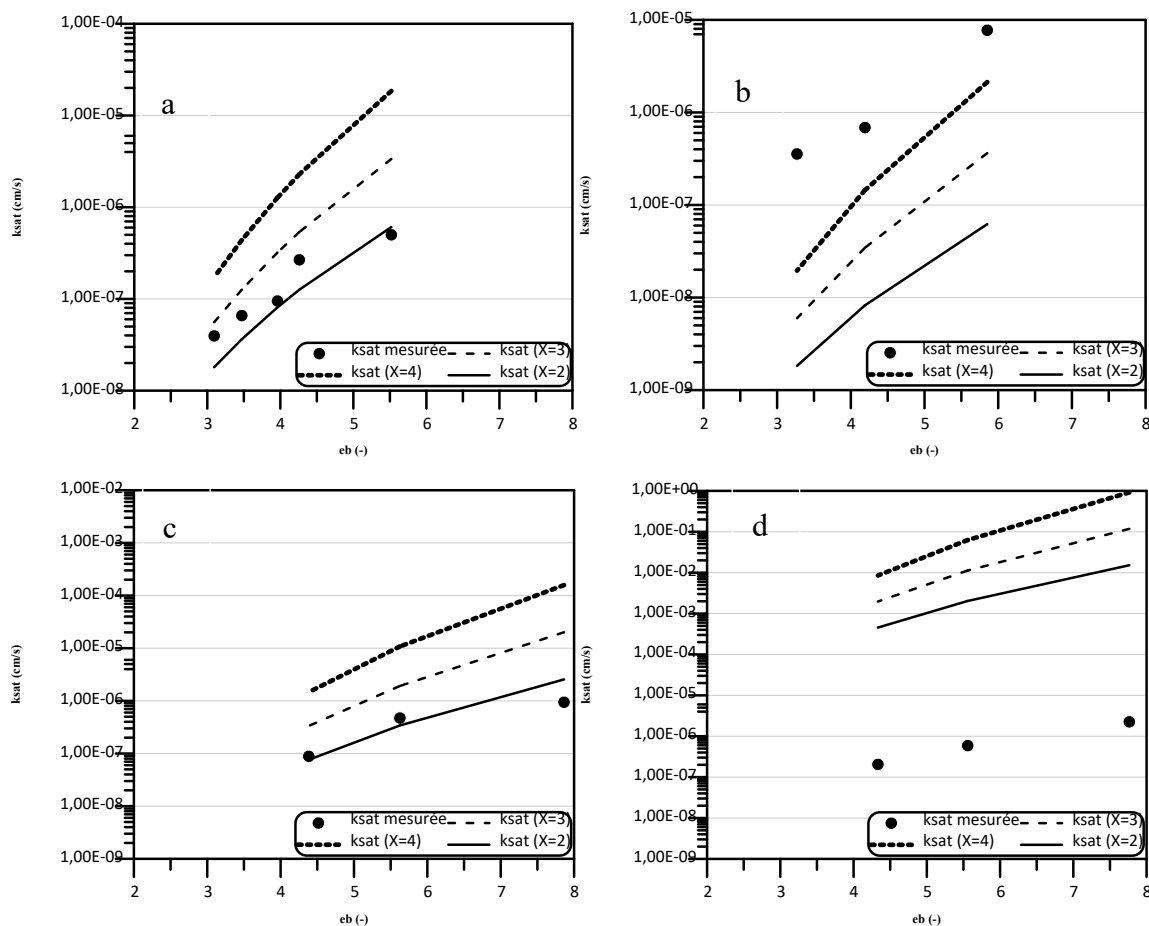
$$K_{sat} = \frac{\gamma_w}{\mu_w} \times C_e \frac{e_b^{3+X}}{1+e_b} \times \frac{1}{B^2 \times (\rho_{sb}^2 \times WL^2 \times \lambda^2)} \times \frac{1}{S^2 \times \left( \rho_{ss}^2 \times Cu^{\frac{1}{3}} \times D_{10}^2 \times C_d^{1/3} \right)}$$

où B et S sont les proportions respectives de bentonite et de sol dans le mélange.

Comme pour les autres équations présentées dans le chapitre précédant, une proposition de modification a été faite pour la fonction tenant compte de l'indice des vides, ainsi que pour la fonction prenant en considération la surface spécifique. La principale différence entre la proposition (3.20) et cette proposition réside dans la formulation de la fonction liée à la surface spécifique. Dans ce cas, la fonction de surface est décomposée en deux sous fonctions: l'une caractéristique de la bentonite (matériau plastique) et l'autre du matériau de base (matériau granulaire non plastique). La figure et le tableau ci dessous montrent que l'application de cette équation représente correctement les  $k_{sat}$  des mélanges CR1-B1 pour  $x = 3$ . Des valeurs de  $x = 2$  semblent être adéquates pour S-B1, tandis que pour les mélanges CR2-B1 et T-B1, cette équation ne prédit pas bien  $k_{sat}$  avec tous les coefficients de tortuosité proposés (2, 3, 3.5 et 4).

Les résultats de la prédiction de  $k_{\text{sat}}$  des mélanges sol-bentonite testés.

Mélange	Teneur en bentonite (%)	eb (-)	$k_{\text{sat}}$ mesurée (cm/s)	$k_{\text{sat}}$ prédite (cm/s)				
				X=1	X=2	X=3	X=3.5	X=4
CR1-B1	5.0	5.52	$5.8 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-7}$	$3.4 \times 10^{-6}$	$7.89 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-5}$
	6.5	4.26	$3.5 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$5.4 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$
	7.0	3.96	$9.5 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-7}$	$6.4 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-6}$
	8.0	3.47	$6.6 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$3.6 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^{-7}$
	9.0	3.09	$3.5 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$5.6 \times 10^{-8}$	$9.8 \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-7}$
CR1-B1	6.5	4.65	$4.0 \times 10^{-8}$	$9.9 \times 10^{-8}$	$4.6 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$4.6 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
CR2-B1	5.0	5.85	$7.7 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$6.2 \times 10^{-8}$	$3.6 \times 10^{-7}$	$8.8 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-6}$
	7.0	4.2	$6.7 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-9}$	$8.2 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-8}$	$7.1 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$
	9.0	3.27	$3.6 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$6.0 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-8}$
S-B1	5.0	7.86	$9.5 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-4}$
	7.0	5.63	$4.7 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-6}$	$4.6 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$
	9.0	4.38	$9.0 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-8}$	$7.6 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$7.0 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-6}$
R-B1	5.0	7.76	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-1}$	$3.3 \times 10^{-1}$	$9.2 \times 10^{-1}$
	7.0	5.56	$5.9 \times 10^{-7}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-2}$	$6.3 \times 10^{-2}$
	9.0	4.33	$2.1 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$4.1 \times 10^{-3}$	$8.5 \times 10^{-3}$



Les valeurs  $k_{sat}$  calculées par l'équation 5.1 représentées en fonction de  $e_b$  pour CR1-B1 (a), CR2-B1 (b), S-B1 (c) et R-B1 (d).

Cette équation ne permet donc pas de bien estimer les valeurs de  $k_{sat}$  des différents mélanges du sol-bentonite testés. En comparant les valeurs de l'écart quadratique moyen (RMSE) des trois équations proposées, on remarque que seules les Équations (3.20) et (3.21) permettent d'obtenir de bonnes performances de prédiction pour les mélanges testés.

Une équation semi-empirique est appropriée pour les mélanges composés d'un matériau de base présentant une granulométrie étalée, tandis qu'une autre équation s'applique aux mélanges comportant un matériau de base à granulométrie uniforme. Pour les mélanges sol-bentonite utilisés dans la construction des structures d'entreposage, l'équation (3.20) est recommandée.

L'écart quadratique moyen (RMSE) de différents cas testés.

	L'écart quadratique moyen (RMSE)		
	Eq (3.20)	Eq (3.21)	Eq (3)
Mélange			
CR1-B1	$1.12 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-6}$	$1.26 \times 10^{-6}$
CR2-B1	$4.80 \times 10^{-7}$	$3.79 \times 10^{-6}$	$4.27 \times 10^{-6}$
S-B1	$5.3 \times 10^{-4}$	$1.95 \times 10^{-7}$	$1.11 \times 10^{-5}$
T-B1	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.47 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-3}$