

**Titre:** Évaluation du comportement hydrogéochimique des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés sous conditions climatiques naturelles  
**Title:**

**Auteur:** Marie Zogbili Teoro  
**Author:**

**Date:** 2024

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Teoro, M. Z. (2024). Évaluation du comportement hydrogéochimique des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés sous conditions climatiques naturelles  
**Citation:** [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/59431/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/59431/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Abdelkabir Maqsoud, Tikou Belem, & Mamert Mbonimpa  
**Advisors:**

**Programme:** Génie minéral  
**Program:**

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

et

L'Université du Québec en Abitibi -Témiscamingue

**Évaluation du comportement hydrogéochimique des résidus miniers densifiés,  
solidifiés et stabilisés sous conditions climatiques naturelles**

**MARIE ZOGBILI TEORO**

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie minéral

Aout 2024

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

et

L'Université du Québec en Abitibi -Témiscamingue

Ce mémoire intitulé :

## **Évaluation du comportement hydrogéochimique des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés sous conditions climatiques naturelles**

Présentée par **Marie Zogbili TEORO**

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

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

**Li Li**, président

**Abdelkabar MAQSOU**D, membre et directeur de recherche

**Tikou BELEM**, membre et codirecteur de recherche

**Mamert MBONIMPA**, membre et codirecteur de recherche

**Abderrahim LAKHOUIT**, membre externe

## DÉDICACE

*Je dédie ce mémoire*

*Au Dieu Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la vie, la santé et la protection durant toute la  
durée ce projet d'étude.*

*À mon époux et mes enfants, qui ont toujours été à mes côtés et m'ont soutenue durant ces années  
d'études. La réalisation de ce travail est le fruit de vos encouragements et votre soutien. Cette  
œuvre est également la vôtre!*

*À ma mère, ma belle-mère, à mes frères et sœurs et à toutes les personnes qui m'ont prodiguée  
des conseils et m'ont encouragée, trouvez l'expression de ma profonde gratitude!*

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet d'étude a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Abdelkabir MAQSoud, pour la confiance qu'il a placée en moi, pour la réalisation de ce projet. Je le remercie également pour sa disponibilité, son encadrement, sa patience, ses conseils avisés et sa supervision éclairée tout au long de cette recherche. Merci Directeur d'avoir peaufiné ce travail par votre rigueur scientifique.

Je remercie particulièrement mon co-directeur, le professeur Tikou BELEM, pour le temps investi pour m'orienter, répondre à mes questions et trouver des solutions. Merci professeur pour votre vigilance et votre rigueur. Vos encouragements, votre sens élevé d'écoute et d'humour ont été un grand remède en des moments de stress.

Mes sincères remerciements au professeur Mamert MBONIMPA, co-directeur pour ses encouragements et ses interventions et apports dans ce projet de recherche.

Merci à toute l'équipe pédagogique de l'UQAT et à l'équipe de URSTM, particulièrement Sylvette Awoh, Alain Perreault et Jean Christophe qui ont été d'un grand soutien pendant mes travaux au laboratoire.

Je remercie sincèrement mon cher époux, Emmanuel Foromo KALIVOGUI qui était toujours là pour moi. Merci pour ton soutien inconditionnel et ton accompagnement tout au long de cette belle expérience qui parfois était source de nuits blanches.

Enfin, un merci particulier à mes amis DJOMO BOUYEM Adrien Cabrel, NIANKE Emmanuel, MEHDAOUI Hsan Youssef, CHLAHBI Safa, SOUMAH Kadiatou pour votre soutien moral et intellectuel tout au long de cette étude. Je tiens à remercier tous ceux de près ou de loin qui ont contribué à la mise en œuvre de ce travail.

## RÉSUMÉ

L'entreposage des résidus miniers densifiés en surface est une technique prometteuse pour la gestion des résidus. Car, l'objectif est de garantir une meilleure consistance et un aspect durable des résidus afin d'optimiser les opérations minières et de minimiser les impacts environnementaux. Cependant, leur exposition sous les conditions climatiques nordiques sous des cycles de gel-dégel et de mouillage-drainage d'une part; et d'autre part, leurs compositions minéralogiques peuvent compromettre leur gestion à long terme. En effet, ces phénomènes pourraient affecter l'intégrité physique (résistance mécanique, capacité portante) des résidus miniers et entraîner des impacts au niveau de la stabilité hydrogéochimique et hydrogéologique en modifiant la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ), la capacité de rétention d'eau (CRE); en causant la désaturation des résidus miniers et la mobilité des contaminants dans l'environnement (cas des gisements sulfureux). Pour atténuer ces impacts, l'utilisation de liants hydrauliques pourrait être une alternative pertinente pour la solidification et la stabilisation des résidus miniers densifiés.

Ainsi, une étude expérimentale a été réalisée à l'aide de tests au laboratoire sur les résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés (RmD)-S/S contenant des phyllosilicates (muscovite) de la mine Meliadine. Au cours de ces tests, de faibles quantités du ciment Portland du type HE (haute résistance initiale) avec des proportions de 0, 5%, 1,5% et 2% ont été ajoutées aux résidus filtrés. Aussi, différentes proportions de muscovite (9,5%; 12,5% et 15,5 %) ont été incorporées pour former des recettes de mélanges. Au total, dix mélanges ont été préparés et curés pendant 28 jours à une température contrôlée de 18°C dans une chambre réservée à cet effet. Ces mélanges ont ensuite été soumis : aux essais de résistance à la compression uniaxiale (UCS), aux cycles de mouillage-drainage, de gel-dégel, de perméabilité ( $k_{sat}$ ), et de rétention d'eau (CRE).

Les résultats de ces essais ont montré une amélioration significative de la résistance à la compression uniaxiale, de la conductivité hydraulique saturée, de la capacité de rétention d'eau et du degré de saturation ( $S_r$ ) des résidus miniers solidifiés et stabilisés. Également la qualité des lixiviats a été améliorée, plus particulièrement pour les mélanges avec 2% de ciment HE. Cette amélioration a été surtout remarquable pour la teneur de 9,5% de muscovite. Les valeurs de l'UCS ont atteint : 493 kPa contre 79 kPa; 307,7 kPa contre 66,7 kPa et 258,7 kPa contre 61,4 kPa respectivement pour les résidus amendés de 2% et les résidus non amendés pour les teneurs de muscovite de 9,5; 12,5; et 15,5%.

Pour les essais de gel-dégel, les résultats ont montré que les cycles de gel-dégel ont engendré une augmentation d'un ordre de grandeur de la valeur de  $k_{sat}$ , passant de  $10^{-8}$  m/s à  $10^{-7}$  m/s pour tous les mélanges. Toutefois, le Mél# 3 (2% de ciment et 9,5% muscovite) est l'unique mélange qui a connu une légère augmentation de la  $k_{sat}$  tout en demeurant dans le même ordre de grandeur ( $2,33 \times 10^{-8}$  m/s à  $8,74 \times 10^{-8}$  m/s). Quant à la CRE, les résultats ont montré une augmentation des valeurs d'entrée d'air (AEV) des mélanges amendés avec 2% de ciment par rapport aux mélanges non amendés. Cette augmentation correspond à 86,7; 27, 7 & 45 % respectivement pour les Mél# 3, Mél# 6, Mél# 7, Mél# 10. La teneur en eau volumique a augmenté de 0,34 avec un degré de saturation de 91% pour les Mél# 3. Le pH, Eh et CE et les concentrations des éléments chimiques As, Fe, Cu, Ni, Pb Zn ont été améliorés et respectent les réglementations environnementales en vigueur.

Les résultats de cette étude montrent un potentiel d'utilisation de 2% de ciment HE pour une gestion adéquate des résidus miniers densifiés. Car, son emploi a permis d'améliorer les propriétés physiques, géotechniques, hydrogéochimiques et hydrogéologiques des RmD-S/S contenant des phyllosilicates destinés à l'entreposage en surface dans les conditions nordiques. L'application de cette technique permettra de disposer d'un système de gestion responsable, sécuritaire et durable des résidus miniers et de réduire les impacts environnementaux. En plus, l'utilisation de la technique S/S aux RmD permettrait de minimiser les coûts des opérations minières et de rentabiliser l'exploitation minière en fonction des scénarios d'entreposage des résidus décrits dans la méthodologie.

## ABSTRACT

Surface storage of densified mine tailings is a promising technique for tailing management. The target is to ensure better consistency and durability of tailings in order to optimize mining operations and minimize environmental impacts. However, in addition to their mineralogical composition, tailing exposure to northern climatic conditions under freeze-thaw and wetting-drainage cycles, can compromise their long-term management. These natural phenomena affect physical integrity (mechanical strength, load-bearing capacity) of tailings, hydrogeochemical and hydrogeological stability by modifying saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ). They could influence water retention capacity (WRC), desaturation of tailings and the mobility of contaminants in the environment (in the case of sulphide deposits). To mitigate these impacts, the use of hydraulic binders may be an appropriate alternative for the solidification and stabilization of densified mine tailings.

Therefore, an experimental study was carried out using laboratory tests on densified, solidified and stabilized (RmD)-S/S mine tailings containing phyllosilicates (muscovite) from the Meliadine mine. During these tests, small quantities of HE cements (0, 5%, 1.5% and 2%) were added to the filtered tailings. Also, different proportions of muscovite (9.5%, 12.5% and 15.5%) were incorporated to form blend recipes. In total, ten blends were prepared and cured for 28 days at a controlled temperature of 18°C in a dedicated space. These mixes were then subjected to: uniaxial compressive strength (UCS), wetting-draining, freeze-thaw, permeability ( $k_{sat}$ ) and water retention (CRE) tests.

The results of these tests showed a significant improvement in UCS,  $k_{sat}$ , CRE and saturation ( $S_r$ ) degree. Leachate quality was also improved, particularly for 2% HE cement mix. This improvement was particularly noticeable for 9.5% muscovite content. UCS values reached: 493 kPa vs. 79 kPa; 307.7 kPa vs. 66.7 kPa and 258.7 kPa vs. 61.4 kPa respectively for the 2% amended and unamended residues for muscovite contents of 9.5; 12.5; and 15.5%.

For the freeze-thaw trials, the results showed that the freeze-thaw cycles generated an increase of one order of magnitude in the  $k_{sat}$  value: from  $10^{-8}$  m/s to  $10^{-7}$  m/s for all mixes. However, mix 3 (2% cement and 9.5% muscovite) was the only which experience a slight increase in  $k_{sat}$ ; while remaining within the same order of magnitude (from  $2.33 \times 10^{-8}$  m/s to  $8.74 \times 10^{-8}$  m/s). As for CRE, the findings showed an increase in air entry values (AEV) for mixes amended with 2% cement



compared with unamended mixes. The degree of increase for mix 3, mix 6, mix 7, mix 10 is: 86.7; 27, 70 & 45% respectively. Volumetric water content increased by 0.34 with a degree of saturation of 91%. pH, Eh and EC and concentrations of the chemical elements As, Fe, Cu, Ni, Pb Zn have been improved and comply with current environmental regulations.

In conclusion, findings of this study showed the potential of using 2% HE cement for the proper management of densified mine tailings. The use of HE cement improved the physical, geotechnical, hydrogeochemical and hydrogeological properties of RmD-S/S containing phyllosilicates for surface storage in northern conditions. The application of this technique will provide a responsible, safe and sustainable tailings management system and reduce environmental impacts. In addition, the use of S/S in RmD will help minimize the costs of mining operations and make mining more profitable.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES .....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XX
LISTE DES ANNEXES .....	XXV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et problématique .....	1
1.2 Objectif du projet .....	3
1.3 Structure du mémoire .....	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
2.1 Méthodes de gestion des résidus miniers en surface.....	5
2.1.1 Résidus miniers en suspension (« Slurry» en anglais) .....	5
2.1.2 Résidus épaissis (thickened tailings).....	6
2.1.3 Résidus en pâte.....	7
2.1.4 Résidus filtrés «filter cake ».....	8
2.2 Remblai minier en pâte cimenté (RMPC) et Dépôt de Pâte Amendée en Surface (DPAS)	
10	
2.2.1 Conception et utilisation du remblai minier en pâte cimenté.....	12
2.2.2 Principales propriétés du remblai minier en pâte cimenté .....	12

2.3	Performance environnementale du RMPC.....	40
2.4	Minéralogie et forme feuilletée des phyllosilicates.....	42
2.4.1	Structure de base des phyllosilicates .....	43
2.4.2	Classification des phyllosilicates .....	45
2.4.3	Caractéristiques de la muscovite .....	45
2.4.4	Facteurs d'influence sur le phénomène de gonflement des phyllosilicates .....	46
2.4.5	Influence du gonflement et du retrait sur les propriétés physiques et mécaniques des phyllosilicates.....	47
2.5	Influence des conditions climatiques sur les propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers filtrés contenant des phyllosilicates.....	48
2.5.1	Influence des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique des sols.....	48
2.5.2	Influence des cycles de gel-dégel sur les propriétés mécaniques des sols .....	49
2.6	Technique de Solidification/ Stabilisation des résidus miniers contenant des phyllosilicates.....	50
2.6.1	Effet de la Solidification/Stabilisation sur les propriétés des résidus contenant des phyllosilicates.....	51
2.6.2	Effet de la Solidification/Stabilisation sur la microstructure .....	51
2.6.3	Effet de la Solidification/Stabilisation sur les propriétés mécaniques (portance et la résistance mécanique) .....	52
2.6.4	Effet de la Solidification/Stabilisation des sols sur l'action du gel-dégel.....	53
2.6.5	Effet de la composition minéralogique des résidus sur la Solidification/Stabilisation (résistance à la compression uniaxiale).....	54
2.7	Conclusion.....	56
2.8	Besoin de recherche .....	58
CHAPITRE 3	APPROCHE METHODOLOGIQUE .....	59
3.1	Matériaux utilisés et sites d'échantillonnage .....	59

3.2	Approche méthodologique .....	61
3.2.1	Protocole de traitement et caractérisation de la muscovite .....	61
3.2.2	Démarche expérimentale.....	64
3.2.3	Caractérisation des propriétés physiques des résidus miniers.....	65
3.2.4	Préparation et mise en place des mélanges .....	69
3.2.5	Caractérisation physique des mélanges .....	71
3.3	Caractérisation mécanique des mélanges .....	72
3.4	Caractérisation hydrogéotechnique des mélanges.....	74
3.4.1	Essai de perméabilité.....	74
3.4.2	Essai de gel-dégel sur les mélanges non amendés et amendés .....	76
3.4.3	Détermination des courbes de rétention d'eau (CRE).....	77
3.5	Essai de mouillage-drainage en colonne sur les mélanges non amendés et amendés ....	78
3.5.1	Analyse des paramètres physico-chimiques et chimiques .....	80
3.5.2	Mesure de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) .....	82
3.5.3	Démantèlement des colonnes .....	85
CHAPITRE 4	ARTICLE 1: SOLIDIFICATION-STABILISATION (S/S) OF DENSIFIED MINE TAILINGS CONTAINING PHYLLOSILICATES FOR SURFACE STORAGE UNDER NATURAL CLIMATIC CONDITION .....	87
4.1	Introduction .....	88
4.2	Materials and Methods .....	90
4.2.1	Materials and properties .....	90
4.2.2	Mix Preparation and placement of cemented and Uncemented layers .....	92
4.2.3	Test Performed .....	92
4.2.4	Uniaxial Compressive Strength .....	92
4.2.5	Wetting-drying columns tests.....	92

4.2.6	Water retention curve .....	93
4.2.7	Permeability and freeze-thaw tests.....	93
4.3	Results and Discussion.....	94
4.3.1	Uniaxial compressive strength .....	94
4.3.2	Physical and chemical properties of leacheate .....	95
4.3.3	Evolution of Water Retention Properties .....	97
4.3.4	Assessment of freeze-thaw effects on saturated hydraulic conductivity of cemented (CC) and uncemented (UC) tailings containing phyllosilicates (Muscovite) .....	98
4.4	Conclusion.....	99
4.5	Acknowledgements .....	99
REFERENCES.....		100
CHAPITRE 5 ARTICLE 2: ASSESSMENT OF THE HYDROCHEMICAL BEHAVIOR OF DENSIFIED, SOLIDIFIED AND STABILIZED MINE TAILINGS UNDER NATURAL CLIMATIC CONDITIONS .....		102
5.1	Introduction .....	103
5.2	Materials and Methods .....	104
5.2.1	Mixture preparations .....	104
5.2.2	Material characterization.....	105
5.2.3	Column testing of prepared mixtures .....	107
5.3	Investigation results.....	108
5.3.1	pH, Eh and EC results .....	108
5.3.2	Dissolved elements.....	111
5.4	Discussion .....	114
5.5	Conclusion .....	116
5.6	Acknowledgements .....	117

REFERENCES.....	117
CHAPITRE 6 COMPLÉMENT DE RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	120
6.1 Résultats du suivi du comportement hydrogéologique des mélanges au cours des cycles de mouillage-drainage .....	120
6.1.1 Volume d'eau récupéré .....	120
6.2 Évolution des teneurs en eau volumique.....	124
6.2.1 Mélanges avec 9,5% de muscovite .....	125
6.2.2 Mélanges avec 12,5% de muscovite .....	126
6.2.3 Mélanges avec 15,5% de muscovite .....	128
6.3 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des mélanges soumis aux cycles de gel-dégel .....	129
6.3.1 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ): Cas des mélanges sans amendement .....	130
6.3.2 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ): Cas des mélanges avec 0,5% de ciment .....	131
6.3.3 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ): Cas des mélanges avec 1,5 & 2% de ciment .....	132
6.4 Complément d'information sur les courbes de rétention d'eau (CRE).....	133
6.5 Défis rencontrés .....	137
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	139
7.1 Conclusion.....	139
7.2 Recommandations .....	141
RÉFÉRENCES.....	142
ANNEXES .....	160

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Valeurs typiques de Cu et Cc présentées selon la classification de Das, 1983 .....	14
Tableau 2.2 Caractéristique des eaux de mélange du remblai .....	21
Tableau 2.3 principaux groupes des phyllosilicates (Caner, 2011).....	45
Tableau 3.1 Paramètres granulométriques des résidus de la mine Meliadine et de la muscovite.	67
Tableau 3.2 Différents types de dopage et amendement cimentaire .....	70
Tableau 3.3 Principaux paramètres granulométriques des mélanges.....	72
Table 4.1 Physical and mineralogical properties of Meliadine mine tailing.....	90
Table 4.2 Mineralogical properties of Meliadine mine tailing.....	91
Table 4.3 Air Entry Value (AEV) for the amended tailings .....	97
Table 4.4 Variation of Permeability as function of freeze-thaw .....	98
Table 5.1 Mixes contents in muscovite and cements .....	105
Table 5.2 Mixtures contents in muscovite and cements.....	106
Table 5.3 Mineralogical tested of tailings .....	107
Tableau 6.1 Paramètre des CRE.....	135

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Alternative and Innovative Integrated Mine Waste Management Approaches in Hard Rock Mine Reclamation, page 322 (Demers et Pabst 2021).....	8
Figure 2.2 Schéma illustrant les différents composants du remblai en pâte (in Belem, 2008). ...	10
Figure 2.3 Évolution de la résistance du remblai (UCS) en fonction de la granulométrie du résidu de la mine KNA (Benzaazoua et al., 2004b).....	14
Figure 2.4 Distribution granulométrique des résidus miniers de 12 mines canadiennes(Belem & Benzaazoua, 2008a). ....	15
Figure 2.5 Photo du Pycnomètre à hélium du laboratoire de l'unité de recherche et de services en technologie minérale (URSTM) de l'IRME-UQAT) .....	16
Figure 2.6 Importance des réactions de dissolution et de précipitation du liant dans le processus de durcissement du remblai en pâte en fonction du temps (Benzaazoua et al., 2004a). ....	18
Figure 2.7 Processus d'hydratation du remblai en pâte (Belem et al, 2008) .....	19
Figure 2.8 Effet de la concentration en sulfates solubles sur la résistance mécanique (USC) du RMPC après 28 jours de cure à 4,5 % de ciment Portland (Benzaazoua et al., 2004a).....	22
Figure 2.9 Effet couplé de la température et de la teneur initiale en sulfate sur l'UCS à 28 jours du CPB avec 4,5% PCI (Fall & Pokharel, 2010b). ....	23
Figure 2.10 Effet de la proportion de liant sur la résistance au cisaillement (Belem et al., 2000)	24
Figure 2.11 Résultats des tests de résistance à la compression sans confinement sur les matériaux CPB potentiels, durcis pendant 28 et 60 jours (Hamberg et al., 2015). ....	24
Figure 2.12 Composition chimique des principaux liants (Belem, 2022).....	26
Figure 2.13 Effet de différents types de liants sur la résistance mécanique (UCS) des remblais en pâte constitués de résidus sulfurés (de la mine C) pendant le temps de durcissement(Benzaazoua et al., 2004a) .....	27
Figure 2.14 a & b Effet de la teneur en eau massique (w) sur la résistance à la compression uniaxiale (UCS) (14a) et son évolution en fonction de l'affaissement (14b) (Benzaazoua et al., 2004a) .....	27



Figure 2.15 Effet du rapport E/C sur l'UCS à 28 jours du RMPC pour différentes teneurs en liant (Fall et al., 2008) .....	28
Figure 2.16 Évolution de la conductivité hydraulique du remblai en pâte en fonction du temps de durcissement (Belem et al, 2001).....	31
Figure 2.17 Évolution de $k_{sat}$ en fonction du temps de durcissement pour les types de liant (CPFA, CPSG ) et de proportion 4,5% et 1 %.(Godbout et al., 2007). ....	33
Figure 2.18 (a) Porosité MIP totale et (b) diamètre seuil pour les échantillons de référence après 28 et 91 jours de durcissement (Deschamps et al., 2008). ....	33
Figure 2.19 Différentes CRE obtenues par l'effet d'hystérésis dans les CRE(Maqsoud et al., 2012) .....	35
Figure 2.20 Courbes de rétention d'eau expérimentales et prédictives (Maqsoud et al., 2004) ..	36
Figure 2.21 Évolution de la capacité de rétention d'eau du remblai en pâte à travers la valeur d'entrée d'air (Belem et al, 2001 .....	36
Figure 2.22 Schéma de configuration d'un test de consolidation des échantillons de RMPC (Belem et al., 2006).....	38
Figure 2.23 Effet de la température sur le développement de l'UCS du remblai en pâte cimenté avec du PCI (affaissement 18 cm ; résidus : TS) (Fall et al, 2010). ....	39
Figure 2.24 Influence de la température de dépôt du RMPC (10, 14, 20 et 25 °C) sur l'épaisseur de dégel du pergélisol (à une température initiale de -6 °C) à 365 jours (Beya, 2016). ....	40
Figure 2.25 Représentation des couches tétraèdres et octaèdres (Gautier, 2008) .....	44
Figure 2.26 Évolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux)(Melboucl, 2017). ....	53
Figure 2.27 Photos des échantillons de différents temps de cure soumis au cycle de gel-dégel. .	54
Figure 2.28 Valeurs moyennes de la UCS en fonction du temps de durcissement pour des échantillons de remblais simulés composés de diverses teneurs en talc (0, 5, 10, 15 et 25%) et de deux types de liant : PC type 10/50 50:50 et PC type 10/mélange de scories 20:80 (Benzaazoua et al., 2010). ....	55

Figure 2.29 Distribution des particules des trois résidus miniers utilisés pour évaluer l'impact des phyllosilicates sur les propriétés rhéologiques du RMPC (Erismann & Hansson, 2021).....	56
Figure 3.1 Photo de la mine de Meliadine dans les conditions de gel (tirée sur le site de la mine - Source: radio Canada et 201203-11MN034-NIRB 2019-20 Meliadine Monitoring Report-OT3F) .....	60
Figure 3.2 Localisation du site d'échantillonnage de la muscovite) tiré de Google Maps .....	61
Figure 3.3 Schéma du protocole de traitement de la muscovite.....	62
Figure 3.4 Analyse minéralogique quantitative de la muscovite par DRX.....	63
Figure 3.5 Schéma de l'approche méthodologique .....	65
Figure 3.6 Granulomètre à diffraction Laser Mastersizer de Malvern.....	66
Figure 3.7 Courbe granulométrique des résidus de la mine Meliadine et de la muscovite.....	67
Figure 3.8 Pycnomètre à hélium pour la détermination de la densité relative des grains .....	69
Figure 3.9 Configuration des colonnes expérimentales .....	71
Figure 3.10 Courbe granulométrique des différents mélanges et de la muscovite .....	72
Figure 3.11 a&b Malaxeur Horbart (a) utilisé pour homogénéiser les mélanges & presse mécanique (b) utilisée pour l'essai de l'UCS .....	74
Figure 3.12 Moule & échantillon dans la membrane (a) et Permeamètre à paroi flexible (b) utilisé pour les essais de conductivité hydraulique .....	76
Figure 3.13 Cellule contenant les échantillons soumis aux cycles de gel-dégel.....	77
Figure 3.14 Colonnes expérimentales utilisées dans les essais expérimentaux .....	79
Figure 3.15 Matériels utilisés pour le mouillage des couches de résidus. ....	80
Figure 3.16 Photos de l'appareil VWR Symphony pH-mètre avec les sondes Epoxy Cole Parmer Oakton, Oakton SS rings PP- .....	81
Figure 3.17 a & b Sonde EC-5 pour la mesure de la teneur en eau volumique (a) et les pesées de calibration (b) .....	83
Figure 3.18 Courbes de calibration des différents mélanges 1 à 6.....	84

Figure 3.19 Courbes de calibration des différents mélanges 7 à 10.....	85
Figure 4.1 particle size distribution of Meliadine mine tailings and muscovite. ....	91
Figure 4.2 Pressure cells (Tempe cells) used to determine the WRC of tailing mixtures .....	93
Figure 4.3 Effect of cement and muscovite on UCS development. ....	95
Figure 4.4 Evolution of physical and chemical parameters (pH, Eh, CE) as a function of % cement and number of wetting and drying cycles .....	96
Figure 4.5 Retention curve measured and fitted using van Genuchten's RETC model. ....	97
Figure 5.1 GSD of te tailings, muscovite and mixtures .....	106
Figure 5.2 pH measured values in the water flush .....	109
Figure 5.3 pH measured values in the water flush .....	109
Figure 5.4 Eh measured values in the water flush.....	110
Figure 5.5 EC measured values in the water flush.....	110
Figure 5.6 Measured As concentrations in the water flush.....	111
Figure 5.7 Measured iron concentrations in the water flush.....	112
Figure 5.8 Measured Cu concentrations in the water flush.....	112
Figure 5.9 Measured Zn concentrations in the water flush .....	113
Figure 5.10 Measured Pb concentrations in the water flush .....	113
Figure 5.11 Pourbaix diagram for Arsenic.....	114
Figure 5.12 Pourbaix diagram for Cupper .....	115
Figure 5.13 Pourbaix diagram for Iro.....	115
Figure 6.1 Volume d'eau percolé à travers les mélanges de 9,5% de muscovite non amendés et amendés de 0,5 et 2% de ciment .....	122
Figure 6.2 Volume d'eau percolé à travers les mélanges Mélange 4, Mélange 5, Mélange 6, Mélange 7 (12,5% de muscovite non amendés et amendés de 0,5 ;1,5 et 2% de ciment) ..	123

Figure 6.3 Volume d'eau percolé à travers les mélanges Mélange 8, Mélange 9, Mélange 10, Mé (15,5% de muscovite non amendés et amendés de 0,5 et 2% de ciment) .....	124
Figure 6.4 Évolution des teneurs en eau volumiques des mélanges 1,2 &3 en fonction du temps .....	126
Figure 6.5 Évolution des teneurs en eau des mélanges 4 & 6 en fonction du temps .....	127
Figure 6.6 Évolution des teneurs en eau du mélange 7 en fonction du temps .....	128
Figure 6.7 Évolution des teneurs en eau des mélanges 8,9 &10 en fonction du temps .....	129
Figure 6.8 Évolutions de la $k_{sat}$ des Mélange 1, des mélange 2, mélange 3 en fonction du nombre de cycles et de la teneur en muscovite (9,5;12 et 15,5%) de 0.0% de ciment HE .....	131
Figure 6.9 Évolutions de la $k_{sat}$ des Mélange 2, Mélange 5 et Mélange 8 en fonction du nombre de cycles & de la teneur en muscovite (9,5;12 et 15,5%) et 0.5% de ciment HE.....	132
Figure 6.10 Évolutions de la $k_{sat}$ des Mélange 3, 6, 7 & 10 en fonction du nombre de cycles & de la teneur en muscovite (9,5;12 et 15,5%) et 1, 0.5% de ciment HE.....	133
Figure 6.11 pH measured values in the water flush .....	134
Figure 6.12 Évolution des CRE des Mélange 4, Mélange 6 & Mélange 7 .....	136
Figure 6.13 Évolution des CRE des Mélange 8 & Mélange 10 .....	136

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire de la section de l'échantillon
AAB	Composites de type AAB
a	aire de la burette
AEV	Air Entry value ou pression d'entrée d'air
Ag <sup>+</sup>	Ion argent
Al <sup>3+</sup>	Ion aluminium
AMD	Acid-Mine Drainage
As	Arsenic
ASTM	American Society for Testing Materials
B <sub>w</sub>	Pourcentage du liant
CBR	Indice de portance
Cc	Coefficient de courbure
CC	Couches cimentée
CE	Conductivité électrique
CEC	Capacité d'échange cationique
CNC	Couche non cimentée
Cr	Indice de recompression
CRE	Courbe de rétention d'eau
C-S-H	Silicates de calcium hydratés
CU	Coefficient d'uniformité
Cu	Cuivre
Cv	Concentration volumique
Cw	Pourcentage solide des grains

D	Diamètre
D <sub>10</sub>	Diamètre des particules du 10% passants sur la courbe granulométrique
D <sub>50</sub>	Diamètre des particules du 50% passants sur la courbe granulométrique
D <sub>80</sub>	Diamètre des particules du 80% passants sur la courbe granulométrique
D <sub>90</sub>	Diamètre des particules du 90% passants sur la courbe granulométrique
De	Coefficient de diffusion effectif
DMA	Drainage minier acide
DPAS	Dépôt de pâte amendée en surface
Dr	Densité relative des grains
DRX	Diffraction de rayon X
e	Indice des vides
E/C	Rapport eau-ciment
EA	Énergie d'attraction des molécules d'eau
EC	Énergie de cohésion inter couche
ECHO	Logiciel Utility de Decagon Devices
Eh	Potentiel d'oxydo-réduction
FD	Fully-drained (entièrement drainé)
Fe <sup>2</sup>	Ion ferreux
Fe <sup>3</sup>	Ion ferrique
Fe	Fer
GGBS	Laitier granulé de haut fourneau broyé activé par le ciment Portland
Gs	Densité relative des grains
GU	General Use (ciment à usage général)
h1 et h2	Pertes de charge à travers l'échantillon aux temps t1 et t2

HD	Half-drained (semi-drainé)
HE	High early-strength hydraulic cement (Ciment à haute résistance initiale)
HS	High sulfate-resistant hydraulic cement (Ciment à haute résistance aux sulfates)
HSF	High silice fume
ICP-AES	Spectroscopie d'émission atomique à plasma couplé par induction et la Chromatographie
IRME	Institut de Recherche en Mines et Environnement
k	Coefficient de perméabilité intrinsèque
K <sup>+</sup>	Ion potassium
kPa	Kilopascal
k <sub>sat</sub>	Conductivité hydraulique saturée
L	Longueur de l'échantillon en cm
LH	Low heat of hydration hydraulic cement (Ciment à faible chaleur d'hydratation)
Li <sup>+</sup>	Ion Lithium
Me	Masse d'eau
Mg <sup>2+</sup>	Ion Magnésium
Mh	Masse humide de l'échantillon
MH	Moderate heat of hydration hydraulic cement (Ciment à chaleur d'hydratation modérée)
Ms	Masse des solides
MS	Moderate sulfate-resistant hydraulic cement (ciment à résistance aux sulfates modérée)
M <sub>w</sub>	Masse d'eau
n	Porosité totale
Na <sup>+</sup>	Ion sodium
Ni	Nickel
nm	Nombre de molécules de gaz

$O^{2-}$	Ion oxygène
$OH^-$	Ion hydroxyde
OPC	Ciment Portland Ordinaire
OS	Objectifs spécifiques
OS1	Objectif spécifique 1
OS2	Objectif spécifique 2
Pb	Plomb
pH	Potentiel hydrogène
PIM	Prosimètre par instruction de mercure
RmD	Résidus miniers densifiés
RmD-S/S	Résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés
RMPC	Remblai en pâte cimentée
S	Surface spécifique des grains
S/S	Solidification-Stabilisation
$Si^{4+}$	Ion Silicium
sm	Surface d'une molécule de gaz (généralement connue)
Sr	Degré de saturation
St	Surface totale de l'échantillon
TEV	Teneur en eau volumique
UCS	Resistance à la compression uniaxiale
UD	Échantillon non drainé
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale
$v_m$	Volume absorbé en monocouche



$V_s$	Volume du solide
$V_T$	Volume total de l'échantillon
$V_v$	Volume des vides
$w\%$	Teneur en eau en massique
WRC	Water Retention Curve
Zn	Zinc
$V_w$	Densité de l'eau
$\theta$	Teneur en eau volumique
$\theta_r$	Teneur en eau volumique résiduelle
$\theta_s$	Teneur en eau volumique à saturation
$\rho_s$	Masse volumique des grains
$\rho_w$	Masse volumique de l'eau
X	Constante
$\psi_a$	Valeur d'entrée d'air
$\psi_r$	Succion résiduelle

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A composition mineralogique et chimique des residus miniers .....	160
ANNEXE B détermination de la teneur en eau volumique Par cycle (c1-c10) de mouillage-drainage .....	169

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Contexte et problématique

La gestion de grandes quantités de résidus miniers produits au cours de l'exploitation minière est un défi réel auquel sont confrontées les entreprises minières. En effet, les minerais extraits pendant l'exploitation minière doivent subir un processus de traitement à l'usine, afin d'obtenir un concentré de valeur économique. Dans ce processus, une grande quantité de rejets de concentrateur (ou résidus miniers) est générée et doit être adéquatement gérée par les promoteurs. Cependant, seulement une partie (environ 60%) de ces résidus est retournée sous terre, sous forme de remblai pour servir de remblayage et de piliers afin d'assurer la stabilité des chantiers (Belem & Benzaazoua, 2008b; Benzaazoua et al., 2003; Benzaazoua et al., 2004a; Newman et al., 2001; Ouellet et al., 2006). L'autre partie est habituellement stockée en surface dans les aires d'entreposage ceinturées de digues de retenue appelées parcs à résidus. Toutefois, la composition minéralogique (présence des sulfures) et la granulométrie de ces résidus font que leur gestion à long terme demeure une véritable source d'instabilité chimique (génération du DMA) et physique (rupture de la digue)(Aubertin et al., 2002b; Bussière, 2007; Marques et al., 2020).

Une autre alternative de gestion des résidus miniers consiste à les épaissir et à les filtrer pour produire des résidus miniers en pâtes autoportants de densité ( $p$ ) comprise entre 70% et 85%; ou des « gâteaux de filtration » de forte densité de pulpe ( $p$ ) supérieure à 85% (Bussière, 2007; Fränkle et al., 2022). Aussi, la réduction considérable de la quantité d'eau favorise une meilleure gestion des résidus miniers et limite les risques d'instabilité physique et chimique (Aubertin et al., 2002; Jewell, 2010). Ce procédé est utilisé par plusieurs entreprises minières pour une gestion intégrée des résidus miniers. Il permet de conférer une meilleure résistance aux résidus miniers.

Cependant, cette technique peut être moins performante pour la gestion des résidus miniers en surface, en raison de la présence des phyllosilicates et de l'effet des sollicitations climatiques (gel-dégel, mouillage-séchage) dans les régions nordiques (Létourneau, 2012; Ma et al., 2022; Ren et al., 2019). En effet, les phyllosilicates peuvent ralentir le processus de drainage de l'eau dans les résidus miniers filtrés et affecter le phénomène de consolidation. Cet effet peut être dû à la capacité qu'ont les phyllosilicates à retenir l'eau dans la structure de leurs feuillets. Ainsi, l'accumulation

d'eau peut augmenter la porosité dans la matrice des matériaux fins et entraîner une réduction de leur stabilité physique (Mehenni, 2015; Melboucl, 2017).

Dans les régions nordiques, les résidus densifiés gèlent en hiver et dégèlent au printemps. Ils se déforment généralement avec le retrait de l'eau accompagné de l'apparition des fissures de dessiccations sous l'effet du tassement causé par l'action des cycles de gel-dégel. Les cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage peuvent induire ainsi une forte augmentation de la teneur en eau dans les résidus miniers renfermant des phyllosilicates pendant les saisons printanières; occasionnant ainsi une détérioration de la structure des résidus miniers densifiés. Cette destruction peut se traduire par la création des fissures et des pores, par l'augmentation de la conductivité hydraulique et l'affaiblissement progressif de la performance mécanique des résidus miniers. De plus, du printemps à l'été, la traficabilité et la circulation des engins de transport et de mise en place des résidus miniers densifiés (RmD) dans les chantiers miniers sont considérablement impactées par la fonte de neige et les pluies qui rendent les résidus densifiés mous et affaiblis (Bui et al., 2014; Chamberlain & Gow, 1979; Qi et al., 2006; Sterpi, 2015). Ces changements physiques des résidus densifiés entraînent des risques opérationnels (coûts, réduction de la productivité) et environnementaux (libération, solubilité et mobilité des contaminants). Par la suite, ils engendrent une instabilité chimique et provoquent un risque pour les eaux superficielles, les nappes souterraines et les organismes vivants (Benzaazoua, Fall, et al., 2004; Coussy, 2011).

Dans ce cas, l'utilisation de la technique de Solidification-Stabilisation (S/S) des résidus miniers densifiés (RmD) à l'aide du ciment devient une alternative efficace, pour augmenter leur performance mécanique, leur durabilité et leur stabilité hydrogéochimique. Cette technique consiste en l'ajout d'une faible quantité de liant hydraulique aux RmD pour les solidifier et les stabiliser (Deschamps, 2009; Elghali et al., 2019). Elle favorise la production des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés (RmD-S/S). L'utilisation du ciment dans les résidus miniers permet de modifier leur texture et de les transformer en matrice monolithique. Pour ce faire, le ciment assure la cohésion entre les grains et réduit la porosité et la perméabilité à travers la formation de minéraux hydratés par le processus de cimentation (Belem et al., 2000; Deschamps et al., 2009; Deschamps et al., 2008; Elghali et al., 2019; Godbout et al., 2007; Ichrak et al., 2016). Il permet également de tamponner le pH des lixiviats, d'augmenter le pouvoir de neutralisation et de stabiliser les contaminants.

La technique de Solidification-Stabilisation (S/S) est devenue une pratique courante en raison des réglementations environnementales qui deviennent de plus en plus exigeantes pour l'élimination des déchets dangereux (Paria & Yuet, 2006) en général, et des résidus miniers en particulier (Barast et al., 2014; Deschamps, 2009; Ichrak et al., 2016). Toutefois, l'application de cette technique aux résidus miniers contenant des phyllosilicates requiert d'autres défis par rapport à leur impact négatif sur le développement de la résistance à la compression uniaxiale des matériaux cimentaires (Cepuritis et al., 2014; Kornmann et al., 2005; Miskovsky, 2004). Cet impact pourrait affecter les propriétés géotechniques et hydrogéochimiques des résidus miniers. C'est pourquoi, il est nécessaire d'entreprendre une étude expérimentale pour évaluer le comportement hydrogéochimique des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés contenant des phyllosilicates entreposés en surface dans les conditions climatiques naturelles.

## 1.2 Objectif du projet

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer à travers des essais de laboratoire, le comportement hydrogéochimique des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés destinés à l'entreposage en surface dans les conditions nordiques.

De cet objectif principal découlent deux objectifs spécifiques (OS) :

- OS1: Évaluer l'effet de l'amendement cimentaire en matière de solidification et stabilisation chimique des résidus densifiés, solidifiés et stabilisés (Rmd-S/S) de la mine Meliadine en incorporant différentes teneurs de phyllosilicates (muscovite) sous conditions climatiques tempérées;
- OS2: Évaluer le comportement hydrogéologique (CRE, ksat avec et sans cycles gel-dégel) des Rmd-S/S en incorporant différentes teneurs de phyllosilicates (muscovite).

## 1.3 Structure du mémoire

Ce mémoire de maîtrise est divisé en six (6) chapitres.

- Le chapitre 1 représente l'introduction qui décrit la problématique, le contexte et le besoin de recherche; ainsi que les objectifs du projet.
- Le chapitre 2 correspond à une revue de littérature qui présente et décrit les principales méthodes de gestion des résidus miniers entreposés en surface, les progrès accomplis, les similarités, les disparités, les limitations et les défis liés à l'application de la technique

d'amendement cimentaire des résidus mineurs en général et plus particulièrement sous les conditions nordiques. Ce chapitre donne également un aperçu sur les principales caractéristiques des phyllosilicates (muscovite) et leurs interattractions avec la pâte cimentaire. Il examine l'impact de et l'effet du gel-dégel sur les propriétés physiques et hydrogéochimiques des résidus miniers solidifiés et stabilisés à l'aide du ciment Portland destinés à l'entreposage en surface dans les conditions climatiques nordique

- Le chapitre 3 présente les méthodes et les matériels utilisés pour la réalisation de ce projet.
- Les chapitres 4 et 5 correspondent aux principales contributions scientifiques à travers la rédaction de deux articles de conférences qui présentent les résultats de la caractérisation mécanique, géotechnique et géochimique. Le premier article a été présenté à la conférence Minefill 2024 et le second est soumis et accepté à la conférence GéoMontréal 2024.
- Le chapitre 6 est un complément des résultats et se termine par une discussion.
- Enfin, le chapitre 7 comprend les principales conclusions des résultats obtenus, ainsi que les recommandations.

## **CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTERATURE**

Ce chapitre vise à élaborer une synthèse bibliographique sur les travaux de recherche antérieurs dans le domaine de la gestion des résidus miniers. Il favorise une meilleure compréhension des principales méthodes et techniques utilisées pour la gestion des résidus en surface. Les différentes études réalisées contribuent à mieux cerner les connaissances récentes, les progrès accomplis, les similarités, les disparités, les limitations et les défis liés à l'application de la technique d'amendement (solidification et stabilisation) des résidus à base de liant hydraulique en général et plus particulièrement sous les conditions nordiques. Il aide également à mieux comprendre les principales caractéristiques des phyllosilicates (muscovite) et leurs interattractions avec la pâte cimentaire. Ce chapitre permet d'appréhender l'impact des phyllosilicates et l'effet du gel-dégel sur la performance physique et hydrogéochimique des résidus solidifiés et stabilisés à l'aide du ciment Portland destinés à l'entreposage en surface dans les conditions climatiques tempérées.

### **2.1 Méthodes de gestion des résidus miniers en surface**

Il existe plusieurs techniques de déposition en surface des résidus miniers qui sont classées en quatre catégories en fonction de la teneur en eau et de la fraction solide (Bussière, 2007; Crowder, 2004; Deschamps, 2009; Martin et al., 2006; Martin et al., 2005; E. Robinsky, 1999). Il s'agit des résidus en suspension, des résidus épaissis; des résidus en pâte et des résidus filtrés (Figure 2.1). Les trois derniers sont regroupés dans la catégorie des résidus densifiés. Néanmoins, selon Filton et Sedon (2013), il n'aurait pas de différence entre les résidus miniers épaissis et pâteux à cause de la capacité limitée des épaississeurs à atteindre la densité de pulpe souhaitée (Fitton & Seddon, 2013b).

Afin de mieux cerner les avantages et les limites liés aux différentes méthodes classiques de dépositions, il est nécessaire de les décrire en détail.

#### **2.1.1 Résidus miniers en suspension (« Slurry» en anglais)**

La déposition des résidus sous forme de pulpe en surface est une méthode classique utilisée pour confiner les résidus miniers dans les parcs à résidus entièrement entourés de digues (Bussière, 2007; Deschamps, 2009; Martin et al., 2005). Dans ces conditions, la pulpe a un faible pourcentage solide (25 à 45%) (Bussière, 2007) et contient une forte teneur en eau (120% et 230%) (Martin et al. 2005) avec une concentration volumique ( $C_v$ ) inférieure à 40% (Pollum, 2007). L'écoulement

de la pulpe se fait du haut vers le bas des installations de confinement, accompagné d'un phénomène de ségrégation. Les particules grossières hautement compressées se déposent progressivement par le processus de sédimentation lorsque la vitesse d'écoulement critique est atteinte. Les particules fines, quant à elles, sont transportées par l'eau et déposées plus loin du point de déversement (Bussière, 2007; Crowder, 2004; Martin et al., 2005). Cette grande mobilité des particules fines fortement saturées peut parfois induire une forte pression interstitielle de l'eau dans le parc à résidus; provoquant ainsi des problèmes d'instabilités des digues de retenue (débordement des bassins),(Aubertin et al., 2002b). Le transport des résidus classiques se fait par pompage (Berger, 2017).

### **2.1.2 Résidus épaissis (thickened tailings)**

Contrairement aux résidus classiques, selon Robinsky, la technique d'épaississement des résidus consiste à déshydrater les résidus pour réduire la quantité d'eau à gérer et augmenter le pourcentage solide ( $C_w$  %) jusqu'à 45 % à 70 %. Cette technique permet d'améliorer les propriétés géotechniques et d'obtenir des résidus autoportants (Robinsky, 1975). La technique d'épaississement consiste à séparer la fraction solide de la fraction liquide des résidus classiques en les soumettant à une décantation (Gravel, 2015; E. I. Robinsky, 1999). Le degré de déshydratation dépend du type d'épaississeur, de la technologie utilisée et de la nature physique de la boue de résidus (Vietti, 2021). Bien que les résidus épaissis contiennent une faible teneur en eau, ils présentent encore une vitesse d'écoulement critique, mais sans séparation des particules (grossières et fines). Aussi, une fois déposés en surface, l'eau de suintement s'écoule de ces résidus (Barbour et al., 1993).

Sofrà et Boger (2002) ont également décrit la déposition des résidus épaissis par empilement à sec, comme le dépôt des couches de résidus déshydratés dans une zone de séchage tout en laissant les premières couches se drainer. Ce dépôt se fait par progression à partir d'un point de décharge qui peut être déplacé lorsque l'épaisseur souhaitée est atteinte. Cela permet aux couches fraîchement déposées de sécher par évaporation et de se consolider. Le cycle de dépôt peut alors reprendre, lorsque toutes les zones recouvertes sont complètement asséchées (Sofrá & Boger, 2002).

Le transport des résidus épaissis se fait à l'aide d'une pompe centrifuge (Fourie, 2012; Jewell, 2010; Li et al., 2009). La mine Kidd en Ontario est le site de référence pour l'application de la technique de gestion des résidus épaissis en surface pour la première fois en 1973 par Robinsky



(Crowder, 2004; Oxenford & Lord, 2006). De nos jours, cette technique est largement utilisée dans les usines d'alumine pour l'épaississement des boues rouges (Gravel, 2015) et dans plusieurs autres mines de commodités différentes telles que: Line Creek, en Colombie britannique (Canada); (Cluff Lake, à Saskatchewan (Canada); Muskeg Rive Mine, en Alberta au Canada. (Oxenford & Lord, 2006).

### **2.1.3 Résidus en pâte**

La technique d'épaississement des résidus continue de se développer et de s'améliorer (Boger, 2012) avec le temps et les exigences environnementales. Le dépôt des résidus en pâte a été proposé dans les années 1990 sur la base du remblai en pâte souterrain afin de donner une meilleure résistance aux résidus miniers contrairement à la méthode conventionnelle. Cette technique peut être considérée comme avantageuse pour la gestion des résidus miniers (Vargas & Pulido, 2022). L'objectif de cette technique est d'extraire le maximum d'eau des résidus pour modifier et améliorer les propriétés hydriques permettant ainsi d'obtenir une pâte plus consistante (Grosso et al., 2021). Les résidus en pâte sont produits à une densité de pulpe plus élevée ( $p$ ) comprise entre 70 % et 85 % (Boger, 2012; Martin et al., 2005; Yilmaz et al., 2014a).

Les résidus en pâte n'adoptent pas un comportement de ségrégation ni de sédimentation pendant l'écoulement, mais s'étalent plutôt de manière adéquate pour former des pentes plus raides dans un intervalle de 2% à 6%. Ils présentent un suintement minimal après leur dépôt en surface (Crowder, 2004; Li et al., 2009; Lopes et al., 2013; Oxenford & Lord, 2006). L'humidité élevée et la non-ségrégation des particules des résidus en pâte permettent d'empêcher leur oxydation en profondeur (Verburg et al. 2009). Cette l'hypothèse a été vérifiée par Lopes et al., (2013) à l'aide des essais de lixiviation (pH) réalisés sur un échantillon d'un gisement pyriteux d'un mètre. Les résultats de ces essais ont montré que seulement 50 mm de la couche supérieure étaient oxydés avec un  $pH=6$  (Lopes et al., 2013) dans un intervalle d'une semaine. Afin d'obtenir une dessiccation optimale et une meilleure solidification, l'épaisseur des dépôts de couches de résidus en pâte recommandée est de 30 cm (Therault et al., 2003). En 2005, Somincor Life of Mine (LOM) a adopté un plan de déposition des résidus en pâte pour de couches de 30 à 50 cm d'épaisseur afin d'augmenter la capacité de son parc à résidus et de prolonger la durée de vie de la mine (Lopes et al., 2013). Le transport des résidus en pâte peut être assuré par des pompes volumétriques (Jewell, 2010).

### 2.1.4 Résidus filtrés «filter cake»

Les résidus filtrés sont aussi appelés résidus empilés (Furnell et al., 2022). Selon (Gravel, 2015), la filtration est la séparation solide/liquide pour obtenir une haute fraction solide. Dans ce cas, les résidus filtrés sont produits par épaississement successif à l'aide du filtre à presse et à disque. Cette technique favorise l'obtention des résidus non ségrégués à forte densité de pulpe ( $p$ ) supérieure à 85 % avec une teneur en eau ( $w$ ) de 20 % (Bussière, 2007; Fränkle et al., 2022). Les résidus obtenus par filtration sont appelés gâteau « filter cake ». Ils peuvent être transportés par convoyeur ou par camion et empilés par dépôt de couches minces sur des pentes relativement raides comprises entre 2% et 10 % (Gravel, 2015; Jewell, 2010; Li et al., 2009; Martin et al., 2005; Oxenford & Lord, 2006). Demers et Pabst ont donné plus de détail sur les différentes techniques, les avantages, les limitations et les mines qui utilisent cette technique (Demers & Pabst, 2021). Parmi ces mines on peut citer: la mine de Green Creeks (Alaska, États-Unis), la mine de Casposo (Argentine), la mine d'Éléonore (Argentine), la mine Éléonore (Québec, Canada), les mines Raglan et Meliadine (Éthier, 2011; Kalonji, 2016).

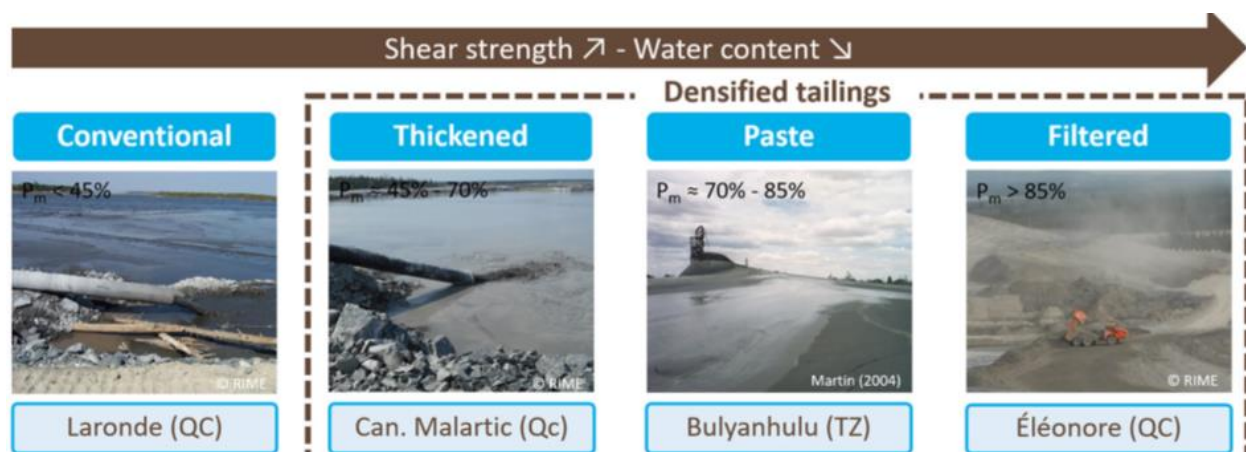


Figure 2.1 Alternative and Innovative Integrated Mine Waste Management Approaches in Hard Rock Mine Reclamation, page 322 (Demers et Pabst 2021).

Certains auteurs ont dégagé plusieurs avantages liés à l'utilisation des résidus densifiés par rapport aux résidus conventionnels (Demers & Pabst, 2021; Fitton & Roshdieh, 2013a; Gravel, 2015; Jewell, 2010; Lara et al., 2013; Li et al., 2009; E. I. Robinsky, 1999; Sofrá & Boger, 2002; Theriault et al., 2003; Vargas & Pulido, 2022) :

- Récupération et réutilisation d'une grande quantité d'eau à l'usine de traitement (dans les climats secs et tempérés, comme le Grand Nord où l'utilisation des lacs est délicate);
- Élimination de grands ouvrages de retenue de résidus (réduction des coûts de construction des installations de confinement (Cao et al., 2021);
- Réduction considérable des risques de rupture de digues et de liquéfaction (stabilité physique);
- Réduction de la quantité d'eau à gérer sur le site, moins d'impact environnemental;
- Réduction des besoins en terrains et des perturbations pour la gestion des résidus;
- L'acceptabilité sociale et meilleure image des sociétés minières;
- Possibilité d'une variété de choix des sites d'élimination;
- Possibilité de convertir les bassins existants des résidus conventionnels en une zone d'élimination à sec;
- Réductions des coûts d'entretien des installations de confinement;
- Réductions du volume de résidus à gérer et prolongation de la durée de vie de la mine;
- Possible restauration des sites.

Malgré les avantages que présentent ces techniques de déposition plusieurs auteurs (Arredondo et al., 2020; Demers & Pabst, 2021; Vietti, 2021; Yilmaz et al., 2014a) ont soulevé certains éléments et qui méritent d'être explorés tels que :

- Besoin des épaisseurs de grandes capacités pour les plus grands tonnages de résidus;
- Effets de la dessiccation et de la fissuration des couches de résidus créés par évaporation (des écoulements préférentiels de l'eau et de l'oxygène) sur l'oxydation des résidus et la génération du DMA pour les résidus sulfureux;
- Effet des changements climatiques sur le bilan hydrique;
- Effet des cycles de gel-dégel sur les couches exposées; Érosion à long terme pour les zones dont la pente est relativement élevée (supérieur à 4 %);
- Génération possible de poussière due à l'assèchement des couches déposées.

En raison de toutes ces limitations que présentent les techniques de déposition décrites ci-dessus, il est important de faire appel à d'autres techniques alternatives plus adéquates qui permettent une meilleure gestion de résidus tout en améliorant les conditions environnementales, sociales et

économiques de l'exploitation minière (Edraki et al., 2014). Parmi ces techniques on trouve celle du dépôt de pâte amendée en surface (DPAS).

## 2.2 Remblai minier en pâte cimenté (RMPC) et Dépôt de Pâte Amendée en Surface (DPAS)

Le dépôt de pâte amendée en surface (DPAS) est une pratique récente dans l'industrie minière, mais qui a été inspirée de la technique des remblais miniers en pâte cimentés. Cette dernière est couramment utilisée et a connu des progrès remarquables durant ces dernières années dans le domaine de l'exploitation minière souterraine et du traitement des déchets industriels.

Le remblai minier en pâte cimenté (RMPC) se définit comme un mélange de résidus filtrés ou épaissis entre 70 à 85 % de pourcentage solide contenant une certaine proportion de particules fines ( $d < 20 \mu\text{m}$ ) auquel est ajouté du ciment (3% à 7 %) et de l'eau (15 à 30%). Ce pourcentage solide correspond à l'affaissement au cône d'Abrams compris entre 6 et 10 pouces (15,24 et 25,40 cm, respectivement) ce qui permet d'obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques requises (Belem & Benzaazoua, 2008b; Belem et al., 2000; Belem et al., 2003; Benzaazoua et al., 2003; Grice, 1998; Yilmaz et al., 2015a; Yilmaz & Guresci, 2017b).

La figure 2.2 illustre les différentes composantes d'un mélange de remblai en pâte cimenté.

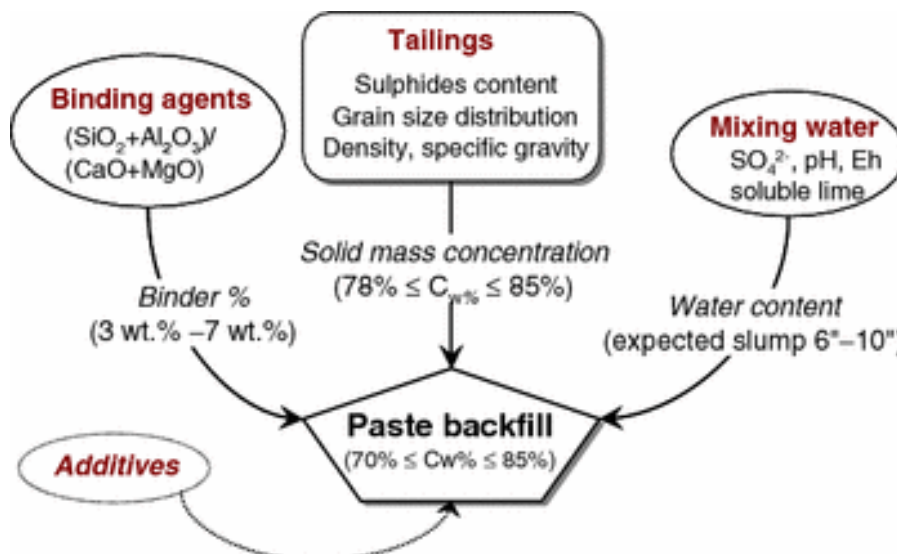


Figure 2.2 Schéma illustrant les différents composants du remblai en pâte (in Belem, 2008).

Plusieurs avantages sont associés à l'utilisation de la technique du remblai minier en pâte cimenté. En effet, l'exploitation souterraine crée des vides d'excavations et laisse des piliers primaires pour

servir de soutènement; ce qui peut considérablement réduire le taux de récupération du minerai et affecter la rentabilité de la mine. Dans ces conditions, le remblayage est d'une importance capitale pour :

1. Servir de support secondaire afin d'assurer la stabilité des excavations, de renforcer les planchers de travail, de diminuer la dilution du minerai et d'augmenter la rentabilité de l'exploitation minière (Belem & Benzaazoua, 2008b; Belem et al., 2003; Belem et al., 2002; Deb et al., 2017; Edraki et al., 2014; Ercikdi et al., 2017; Fall et al., 2010; Santana et al., 2020);
2. Éliminer d'importantes quantités de résidus à entreposer en surface, contribuant ainsi à la réduction des problèmes environnementaux liés la génération du drainage minier acide (DMA) et la rupture des digues (Edraki et al., 2014; Lu et al., 2018; Qi & Fourie, 2019);
3. Réduire les aires d'entreposage des résidus ainsi que le coût de restauration des sites (Jewell, 2010; Li et al., 2009);
4. L'ajout du ciment au remblai lui confère une meilleure résistance mécanique, réduit la perméabilité et la porosité et augmente le pouvoir de neutralisation de l'acide et la capacité de rétention d'eau. Cela contribue à limiter les infiltrations de l'eau et par conséquent, la génération du DMA (Belem et al., 2002; Benzaazoua et al., 2004a; Chen et al., 2021; Deschamps, 2009; Deschamps et al., 2009; Godbout, 2005; Yilmaz et al., 2015a).

Afin de faire un usage adéquat du remblai en pâte cimenté, plusieurs travaux de recherches incluant les études expérimentales et les modélisations physiques et numériques ont été réalisés afin de comprendre les aspects suivants :

- Son mode de conception et d'utilisation ( Khaldoun et al., 2018; Belem & Benzaazoua, 2008b; Grice, 1998; Li, 2014; Sadrossadat et al., 2020; Veenstra & Grobler, 2021; Yilmaz & Guresci, 2017b);
- Ses propriétés mécaniques et minéralogiques (Belem et al., 2000; Benzaazoua et al., 2004d; Mitchell et al., 1982; Niroshan et al., 2018; Porathur et al., 2022; Rankine et al., 2007; Sari et al., 2022; Tan et al., 2020; Veenstra & Grobler, 2021);
- Ses propriétés rhéologiques (Kalonji, 2016; Xue et al., 2020; Zhao et al., 2020), hydrogéochimiques (Belem et al., 2007; Benzaazoua et al., 2002; Fang & Fall, 2019;

Hadimi, 2014); ses propriétés hydrogéotechniques (Belem et al., 2007; Belem et al., 2006; Godbout, 2005; Hane et al., 2017; Yilmaz et al., 2014b; Zhang et al., 2017) et thermiques (Fang et al., 2021) ; et son comportement environnemental (Benzaazoua et al., 2008; Dorricott & Grice, 2002; Qi & Fourie, 2019).

### **2.2.1 Conception et utilisation du remblai minier en pâte cimenté**

Les trois principaux composants utilisés dans la fabrication du remblai minier sont le ciment, les résidus et l'eau. Le mélange de ces composants dans des proportions bien définies permet d'obtenir un remblai possédant des propriétés (rhéologiques et de résistance) requises (Belem & Benzaazoua, 2008b; Belem et al., 2000; Belem et al., 2003; Grice, 1998; Yilmaz & Guresci, 2017b). Ces propriétés dépendent de plusieurs facteurs tels que : la granulométrie, la densité relative des grains et le pourcentage solide ( $C_w$  %). Outre ces facteurs, il est à noter que d'autres paramètres peuvent également affecter la performance du remblai en pâte cimenté à savoir :

- La composition chimique du liant;
- Les caractéristiques des résidus (distribution granulométrique, gravité spécifique, minéralogie);
- La chimie de l'eau de gâchage (Concentration en sulfate);
- La qualité de l'eau (pH, Eh, conductivité électrique);
- Le type et la proportion du liant ( Khaldoun et al., 2018; Belem & Benzaazoua, 2008b; Belem et al., 2002; Belem et al., 2001; Benzaazoua et al., 2002; Benzaazoua et al., 2004a; Benzaazoua et al., 2004b; Deng et al., 2018).

La prise en compte de chaque paramètre est essentielle pour l'obtention d'un remblai en pâte qui répond parfaitement aux exigences rhéologiques (transport et livraison), de performance mécanique et de rigidité (résistance mécanique à court, moyen et long terme) requises (Behera et al., 2021; Benzaazoua et al., 2002).

### **2.2.2 Principales propriétés du remblai minier en pâte cimenté**

Les propriétés physicochimiques et minéralogiques influencent de façon considérable la performance des RMPC (transportabilité, résistance mécanique etc.) (Benzaazoua et al., 2004a; Fall et al., 2004; Wu et al., 2021). Une bonne compréhension de ces propriétés est une étape

indispensable pour une caractérisation adéquate des RMPC. Parmi les facteurs incluant les propriétés du RMPC, on peut énumérer : les propriétés physico-chimiques et géotechniques

Les propriétés physiques des remblais en pâte cimentés impliquent, la distribution granulométrique, la densité relative ( $G_s$ ), le pourcentage solide ( $C_w$  % ou  $P$ ) (Benzaazoua et al., 2002; Benzaazoua et al., 2003; Fall et al., 2004). Elles jouent un rôle fondamental dans la détermination des propriétés mécaniques, hydriques et environnementales des remblais en pâte cimenté (Kesimal et al., 2005).

### **2.2.2.1 Influence de la granulométrie sur la résistance mécanique du RPMC**

La distribution granulométrique d'un matériau a une influence sur l'indice des vides, la densité relative, la résistance mécanique et la perméabilité des remblais en pâte cimentés. Par conséquent, elle affecte significativement les propriétés hydriques, mécaniques et rhéologiques du matériau. La réduction de la granulométrie peut également influencer les propriétés d'écoulement des remblais (Benzaazoua et al., 2004a; Qiu et al., 2020; Safarizadeh & Taheri, 2021).

En général, les diamètres  $D_{10}$  (diamètre correspondant à 10 % du passant),  $D_{30}$  (diamètre correspondant à 30 % du passant),  $D_{50}$  (diamètre correspondant à 50 % du passant) et  $D_{60}$  (diamètre correspondant à 60 % du passant) sont les plus utilisés pour caractériser la courbe granulométrique.

Les  $D_{10}$ ,  $D_{60}$  et  $D_{30}$  permettent de déterminer le coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) et le coefficient de courbure ( $C_c$ ) qui sont les deux paramètres utilisés pour caractériser la distribution granulométrique.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{et} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.1)$$

Où

$D_{10}$  : est le diamètre effectif des particules correspondant à 10 % du passant;

$D_{30}$  : est le diamètre effectif des particules correspondant à 30 % du passant;

$D_{60}$  : est le diamètre effectif des particules correspondant à 60 % du passant;

Ces paramètres peuvent être utilisés pour la classification des matériaux (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Valeurs typiques de  $C_u$  et  $C_c$  présentées selon la classification de Das, 1983

Plage des valeurs de $C_u$	Types de granulométrie
$C_u \leq 2$	Granulométrie très serrée (uniforme)
$2 < C_u \leq 5$	Granulométrie serrée (uniforme)
$5 < C_u \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 < C_u \leq 200$	Granulométrie étalée
$200 < C_u$	Granulométrie très étalée

Benzaazouaa et al. (2004) ont établi des corrélations entre la résistance à la compression uniaxiale des RMPC et la granulométrie ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  et  $D_{90}$  et du  $C_u$ ). Ces auteurs ont montré que la valeur optimale de l'UCS du RMPC est obtenue pour des  $D_{10}$  compris entre 2 et 3  $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  entre 12 et 32  $\mu\text{m}$  et  $D_{90}$  entre 115 et 190  $\mu\text{m}$ . Il est important de mentionner que les particules fines des résidus (de tailles inférieures à 20  $\mu\text{m}$ ) influencent significativement la résistance mécanique des remblais en pâte cimentés. Les meilleures résistances à la compression uniaxiale (UCS) sont obtenues pour les mélanges de remblais fabriqués avec des résidus grossiers et moyens, ayant une proportion des particules dont la taille est inférieure à 20  $\mu\text{m}$  situées entre 35-60% (figure 2.3) et 30-68 % (Benzaazoua et al., 2004b).

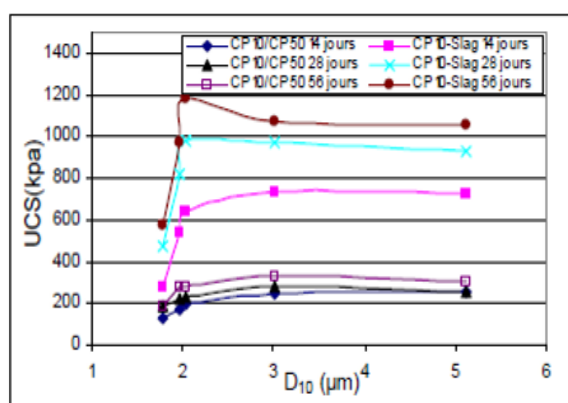
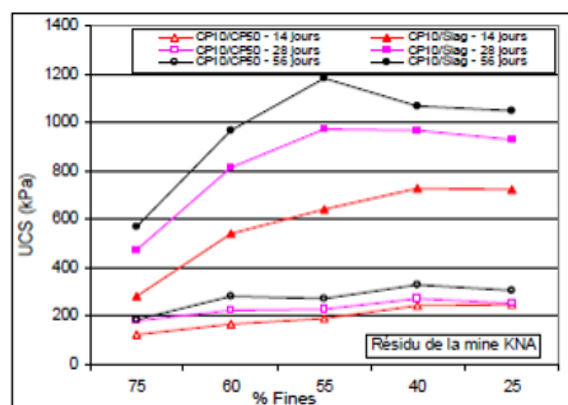
a- Évolution de l'UCS en fonction du  $D_{10}$ b- Évolution de l'UCS en fonction du % de fines (<20 $\mu\text{m}$ )

Figure 2.3 Évolution de la résistance du remblai (UCS) en fonction de la granulométrie du résidu de la mine KNA (Benzaazoua et al., 2004b).



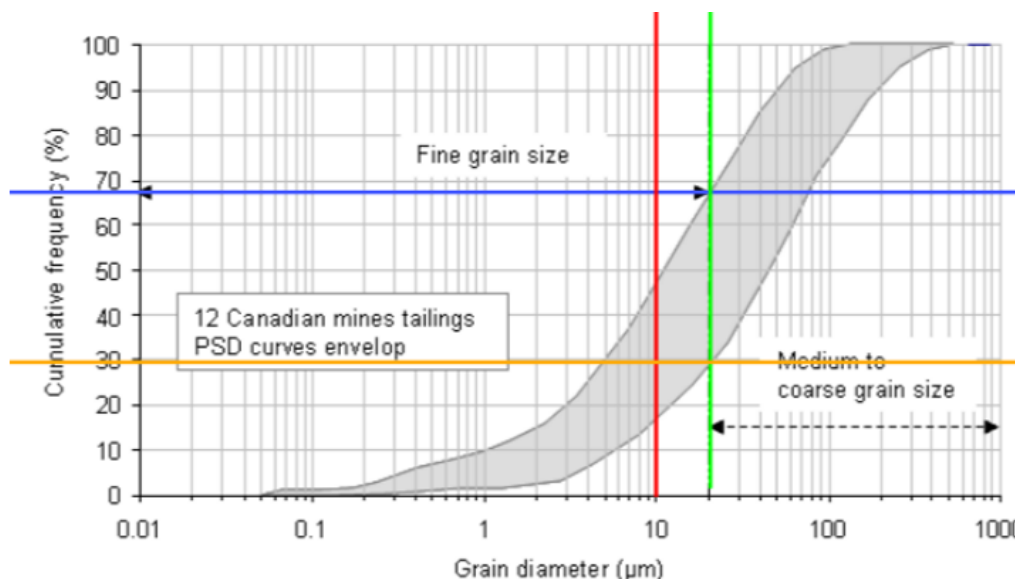


Figure 2.4 Distribution granulométrique des résidus miniers de 12 mines canadiennes(Belem & Benzaazoua, 2008a).

Les résultats des études de Fall et al (2004; 2005) ont montré que les proportions des particules fines  $d < 20 \mu\text{m}$  des résidus et la densité des grains impactent significativement la porosité totale, la distribution de la taille des pores, la capacité de drainage de l'eau, qui à leur tour influencent le développement de la résistance à la compression uniaxiale du remblai (Fall et al., 2004; Fall et al., 2005a).

La porosité totale des remblais augmente avec la croissance des particules fines des résidus, dont la proportion des particules fines ( $d < 20 \mu\text{m}$  (Eker & Bascetin, 2022). D'autres chercheurs ont également rapporté l'influence de la granulométrie des résidus sur la performance des RMPC (Benzaazoua et al., 2004a; Guo et al., 2021; Hane et al., 2017; Qiu et al., 2020; Reiffsteck & Pham, 2005; Yilmaz et al., 2011).

Les résidus miniers utilisés dans la préparation du remblai souterrain devraient contenir au minimum 15 % de particules fines  $d < 20 \mu\text{m}$  afin de faciliter leur l'écoulement en pipeline (Landriault et al., 1997).

### 2.2.2.2 Influence de la densité relative sur la résistance mécanique du RPMC

La densité relative ( $G_s$ ) ou  $D_r$  des grains est le paramètre qui permet de qualifier un échantillon de remblai comme meuble (avec un indice des vides ( $e$ ) élevé); ou dense avec (un indice des vides

faible). Elle intervient dans le dosage des mélanges et le calcul des paramètres géotechniques (Benzaazoua et al., 2004b).

La masse volume spécifique des grains solides est définie par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.2)$$

Où

$M_s$ : masse des grains solides

$V_s$ : Volume des grains solides

La densité relative est également définie comme le rapport entre la masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ) et la masse volumique de l'eau  $\rho_w$ .

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2.3)$$

La densité relative se détermine au laboratoire à l'aide du pycnomètre à hélium (voir photo ci-dessous).



Figure 2.5 Photo du Pycnomètre à hélium du laboratoire de l'unité de recherche et de services en technologie minérale (URSTM) de l'IRME-UQAT)

### 2.2.2.3 Influence du pourcentage solide sur la résistance mécanique du RPMC

Le pourcentage solide ( $C_w$  %) est l'une des variables à considérer dans la fabrication du remblai qui conditionnent non seulement l'obtention de la résistance cible, mais également la réduction de la quantité de ciment à utiliser. L'augmentation du pourcentage solide améliore la résistance

mécanique du remblai à court et à long terme (Belem & Benzaazoua, 2008b; Sadrossadat et al., 2020). Selon Safariza et Taheri (20021), la détermination du pourcentage solide ( $C_w \%$ ) et de la proportion du liant ( $B_w \%$ ) est d'une importance capitale pour atteindre les caractéristiques d'écoulements adéquats et d'éliminations maximales des résidus miniers (Safarizadeh & Taheri, 2021).

Le pourcentage solide est déterminé par la relation suivante :

$$C_w \% = \frac{100 \times M_{solides}}{M_{eau} + M_{solides}} \quad (2.4)$$

Où

$M_{solide} = M_{dry-residus} + M_{dry-liant}$  ; ainsi on aura :

$$C_w \% = \frac{100 \times (M_{dry residus} + M_{dry liant})}{M_{eau} + M_{dry residus} + M_{dry liant}} \quad (2.5)$$

#### **2.2.2.4 Influence de l'hydratation sur le développement de la résistance mécanique RPMC**

L'hydratation est un ensemble de processus chimiques accours desquels de nouveaux produits appelés hydrates se forment lorsque les constituants (anhydres) du ciment entrent en contact avec l'eau (Janadi et al., 2021; Pigeot et al., 2022). Ce processus se déroule principalement en deux phases :

- Une phase de dissolution et d'hydratation dans laquelle les processus de dissolution et d'hydratation sont les plus dominants;
- Une phase d'hydratation et de précipitation, caractérisée par les réactions d'hydratation et de précipitation directes des agents de liaison (voir figure 2.6), (Benzaazoua et al., 2004a),

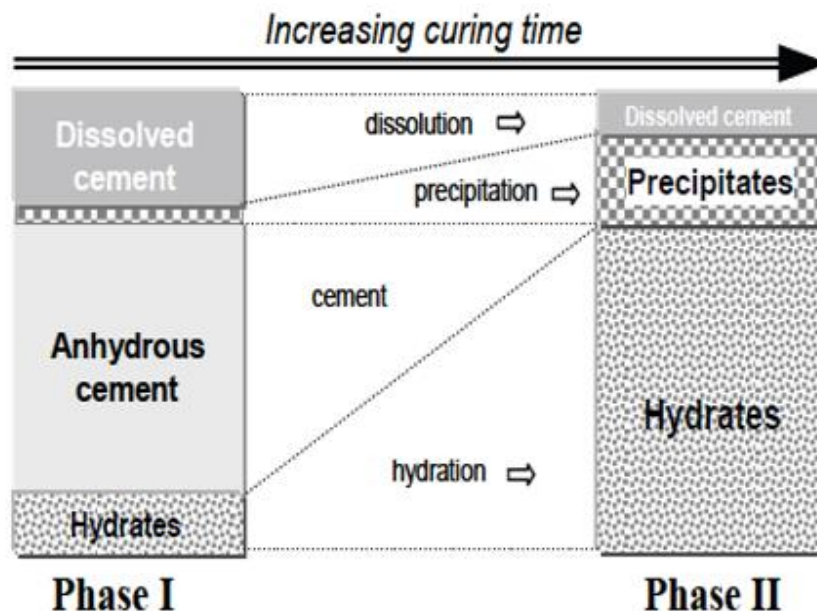


Figure 2.6 Importance des réactions de dissolution et de précipitation du liant dans le processus de durcissement du remblai en pâte en fonction du temps (Benzaazoua et al., 2004a).

Belem et Benzaazoua (2008) ont montré que dans un mélange de remblais en pâte cimenté contenant des sulfures, le pH est tamponné entre 12 et 13 par les ions  $\text{OH}^-$  dès les premiers âges du mélange. Dans ce cas, le processus de dissolution et d'hydratation et celui d'hydratation et de précipitation se succèdent. Ceci favorise la formation d'ettringite primaire et de la portlandite par la suite. Des phases C-S-H (silicates de calcium hydratés), peuvent se former au cours de ce processus à moyen et à long terme favorisant ainsi le développement de la résistance mécanique (Belem & Benzaazoua, 2008b). Les mêmes auteurs ont également mentionné que la portlandite formée est aussi capable de réagir avec le gypse en fonction de la teneur initiale en sulfate, figure 2.7.

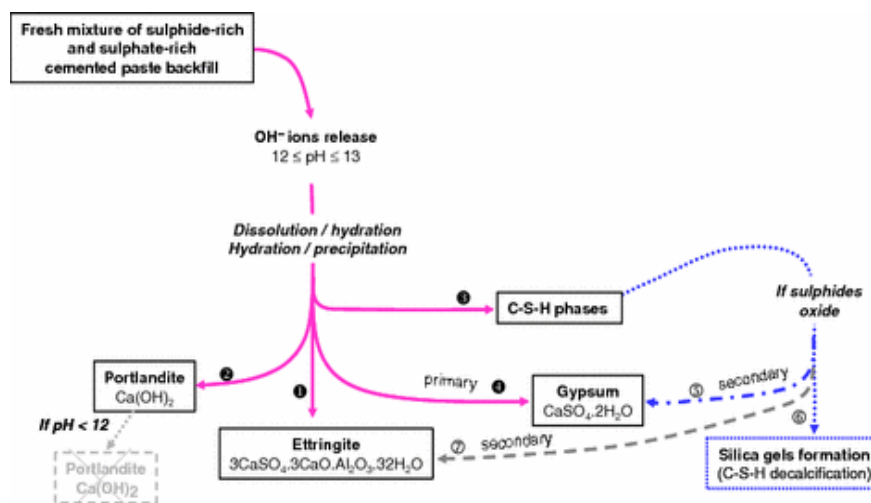


Figure 2.7 Processus d'hydratation du remblai en pâte (Belem et al, 2008)

L'hydratation est une étape cruciale et un facteur déterminant dans le développement de la résistance mécanique du remblai, car le processus de durcissement du remblai est le résultat de l'hydratation du liant utilisé et de la précipitation des différentes phases hydratées qui se produisent à partir de l'eau interstitielle du mélange (Benzaazoua et al., 2004a).

Plusieurs facteurs peuvent influencer le processus d'hydratation des matériaux de RMPC tels que le pH, le rapport eau-ciment (E/C), le pourcentage solide ( $C_w$ ), la chimie de l'eau, la proportion et le type de liant, la température, le degré d'homogénéité du mélange, la teneur en sulfate, etc.

Lorsque la teneur en sulfates du mélange dépasse 1 à 2 g par litre, il peut y avoir gonflement suite à l'apparition du gypse secondaire. Ce gonflement provoqué par les sulfates peut obstruer les pores et entraîner une fissuration dans les remblais. C'est pourquoi, le choix du type de liant est d'une grande importance pour assurer une meilleure stabilité chimique du remblai en pâte (Belem, 2022).

Les résultats des travaux de Benzaazoua et al. (2002) ont montré que les résidus sulfureux d'une teneur de 32 % de soufre, offraient une mauvaise performance mécanique aux remblais en pâte cimentés fabriqués avec du ciment à base de laitier de haut-fourneau pour un temps de cure de 180 jours ou plus. Cependant, le ciment Portland de type 10 et de type 50 a procuré de bonnes performances mécaniques pour le même mélange de remblai (Benzaazoua et al., 2002).

Selon Hane et al. (20217); Yilmaz et Guresci (2027), le rapport eau-ciment (E/C) est un facteur important dans l'accélération des réactions d'hydratation. Cet aspect est vérifié par le fait que les

valeurs de l'UCS les plus élevées ont été produites par les remblais drainés ayant un rapport (E/C) plus faible (Hane et al., 2017; Yilmaz & Guresci, 2017b). D'autres auteurs ont également constaté que le faible développement du processus de durcissement (faibles résistances mécaniques) des remblais en pâte cimenté est dû à l'altération du processus d'hydratation par les hétérogénéités dans le mélange (Dikonda et al., 2018).

La température est l'un des facteurs qui influencent significativement le processus de durcissement (hydratation) des matériaux cimentaires (Bull & Fall, 2020; Wang et al., 2016).

Selon les travaux de Cheng et al. (2020); Di et al. (2014); Wu et al. (2013) et Xu et al. (2021), la température influence d'une manière significative le degré d'hydratation, affectant ainsi les propriétés rhéologiques. Ces mêmes auteurs ont constaté que la résistance à la compression uniaxiale des échantillons s'améliore avec l'augmentation de la température de durcissement. Il existe en outre une étroite relation entre le temps de cure et les propriétés rhéologiques. La contrainte d'écoulement et la viscosité augmentent fréquemment au fur et à mesure que le temps de durcissement s'écoule (Cheng et al., 2020; Di et al., 2014; Wu et al., 2013; Xu et al., 2021). Ce phénomène occasionne une augmentation de la limite d'élasticité et de la viscosité des remblais en pâte cimenté (Xu et al., 2021).

#### **2.2.2.5 Influence de la chimie de l'eau sur la résistance mécanique du RPMC**

Le rôle de l'eau est indiscutable pour l'obtention d'une pâte de consistance requise dans la fabrication du remblai en pâte cimenté. Cependant, la composition chimique de cette eau est influencée par plusieurs phénomènes complexes tels que : la dissolution et les précipitations des éléments en raison de son pH et des concentrations des éléments qu'elle contient.

La disponibilité et la teneur des sulfates dans l'eau de mélange varient en fonction de sa provenance. Par exemple, l'analyse chimique des différentes eaux (eau de procédé, eau de robinet et eau du lac) utilisées dans les études de Benzaazoua permet de constater que pour les échantillons analysés (eau de robinet de la ville de Rouyn-Noranda) : l'eau de procédé contient la plus forte teneur en sulfate (1650,6 mg/l), probablement à cause de la présence des résidus sulfureux; suivi de celle du robinet (53,9 mg/l) et enfin l'eau du lac avec une très faible teneur (3 mg/l) (Benzaazoua et al., 2002).

Tableau 2.2 Caractéristique des eaux de mélange du remblai

Source (provenance)	Teneur des éléments	
	Sulfate (SO <sub>4</sub> ) en mg/ l	Calcium (Ca) en mg/l
Eau de procédé	1650,6	969
Eau de robinet	53,9	35,9
Eau du lac	3	21,7

Lorsque l'eau du mélange chargée de sulfates entre en contact avec les aluminates et la portlandite (ciment Portland) qui sont deux composants très sensibles aux attaques de sulfates, il se produit le phénomène d'attaque sulfatique. Ce phénomène peut détériorer le remblai et affecter sa performance mécanique (Belem, 2022; Benzaazoua et al., 2002).

Kasap et al. (2022) ont constaté une détérioration considérable de la résistance mécanique du remblai fabriqué à base des résidus sulfureux avec 5 % de ciment. Tandis que la résistance à la compression uniaxiale, le pH et la conductivité hydraulique s'amélioraient pour des remblais fabriqués avec des résidus moins riches en sulfures après 56 jours de cure (Kasap et al., 2022). Certains auteurs expliquent cette détérioration par le fait que les sulfates ralentissent le processus d'hydratation, réduisent l'alcalinité, entraînent la destruction des phases C-S-H et augmentent la porosité et la perméabilité. Ces effets affectent négativement la résistance à la compression uniaxiale du RMPC (Dashti & Nematzadeh, 2020; Dong et al., 2019; Fontes et al., 2019; H. Li et al., 2019).

La présence des sulfates solubles jusqu'à 8000 mg/l de concentration provoque un ralentissement accru du processus de durcissement dû à l'inhibition de l'hydratation du ciment en présence des sulfates. Ce retardement est causé par la présence du gypse dans les réactifs du ciment Portland et affecte significativement la résistance mécanique du remblai. Cette période correspond à la phase I du processus d'hydratation. On peut observer, une baisse de la résistance de 138 kPa (à partir de 1000 mg/l de sulfate) à 60 kPa (jusqu'à 8000 mg/l de sulfate). En suite une seconde phase (phase II) se produit (concentration supérieure à 8000 mg/l) avec la précipitation des minéraux sulfatés remplissant les espaces intergranulaires pendant le durcissement du ciment. Cette phase contribue à l'amélioration de l'UCS à 28 jours de cure voir Figure 2.8, (Benzaazoua et al., 2004a).

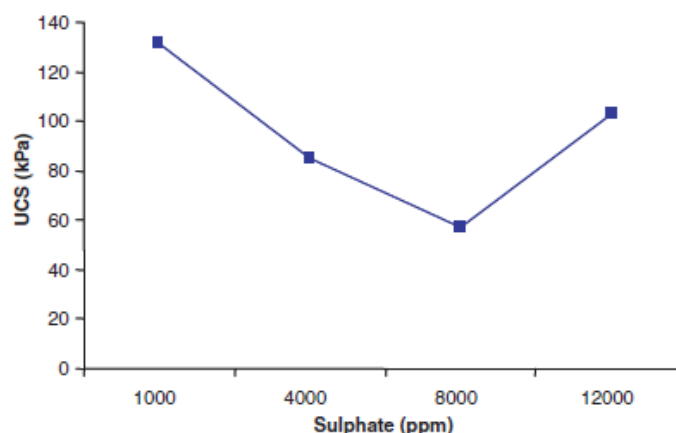


Figure 2.8 Effet de la concentration en sulfates solubles sur la résistance mécanique (USC) du RMPC après 28 jours de cure à 4,5 % de ciment Portland (Benzaazoua et al., 2004a)

Li et Fall (2016) ont rapporté que la présence des sulfates dans les mélanges de remblai peut provoquer une réduction (ralentissement de l'hydratation) ou une augmentation (précipitation des minéraux secondaires) de la résistance mécanique. Ils ont noté que l'auto-dessiccation des remblais est fonction de la concentration des sulfates, du type de liant et du temps de la cure (Li & Fall, 2016).

Fall et Pokharel (2010), ont aussi étudié l'influence des sulfates couplés avec la température sur la performance des remblais en pâte cimenté. Un total de 200 échantillons de RMPC a été utilisé à différentes teneurs initiales de sulfates variant entre 0, 5000, 15 000 et 25 000 mg/l et à des températures de curage différentes situées entre 0°C, 20°C, 25°C, 35°C et 50°C, pendant un temps de durcissement de 28, 90 et 150 jours. Les résultats de cette étude confirment que les sulfates, la température et le temps de cure ont une influence considérable sur le développement de la résistance à la compression uniaxiale des remblais. Il a été également observé que l'effet des sulfates peut augmenter ou diminuer la résistance mécanique des RMPC en fonction du temps de durcissement, de la température et de la teneur initiale en sulfate (Fall & Pokharel, 2010b)., voir figure 2.9. Cela rejoint les résultats d'autres études.



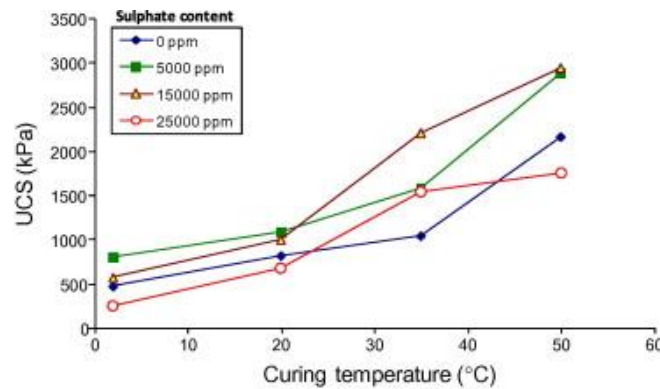


Figure 2.9 Effet couplé de la température et de la teneur initiale en sulfate sur l'UCS à 28 jours du CPB avec 4,5% PCI (Fall & Pokharel, 2010b).

Le degré de détérioration la de résistance des remblais en pâte à l'action des sulfates dépend du type et de la proportion du liant utilisé (Belem, 2022; Li & Fall, 2016).

#### 2.2.2.6 Influence du type et de la proportion du liant sur la performance mécanique du RPMC

Le rôle du liant est d'assurer la cohésion entre les grains à travers la formation de minéraux hydratés qui remplissent les pores par le processus de cimentation. Ceci confère au remblai une meilleure résistance à la compression uniaxiale. Plus le pourcentage de liant est élevé, plus la cohésion du remblai est forte et moins l'angle de frottement est grand (Belem et al., 2000).

Trois différentes teneurs (3, 4,5 et 6%) de liant ont été utilisées pour étudier l'effet de la proportion du ciment sur la performance de la cohésion du remblai. Il ressort de cette étude que la plus grande valeur de cohésion ( $c = 1595$  kPa) et le plus faible angle ( $\phi = 5^\circ$ ) ont été obtenus avec 6% de ciment, contre  $c = 994$  kPa et  $\phi = 9^\circ$  pour 4,5%. Enfin, la plus faible valeur de cohésion ( $c = 389$  kPa) et le plus grand angle de frottement ( $\phi = 15^\circ$ ) ont été obtenus avec 3% de ciment. La grande différence entre les valeurs de cohésion et d'angle de frottement est due à la vitesse d'hydratation qui est fonction de la quantité de liant ajoutée, de laquelle dépend la valeur de la cohésion voir figure 2.10 (Belem et al., 2000).

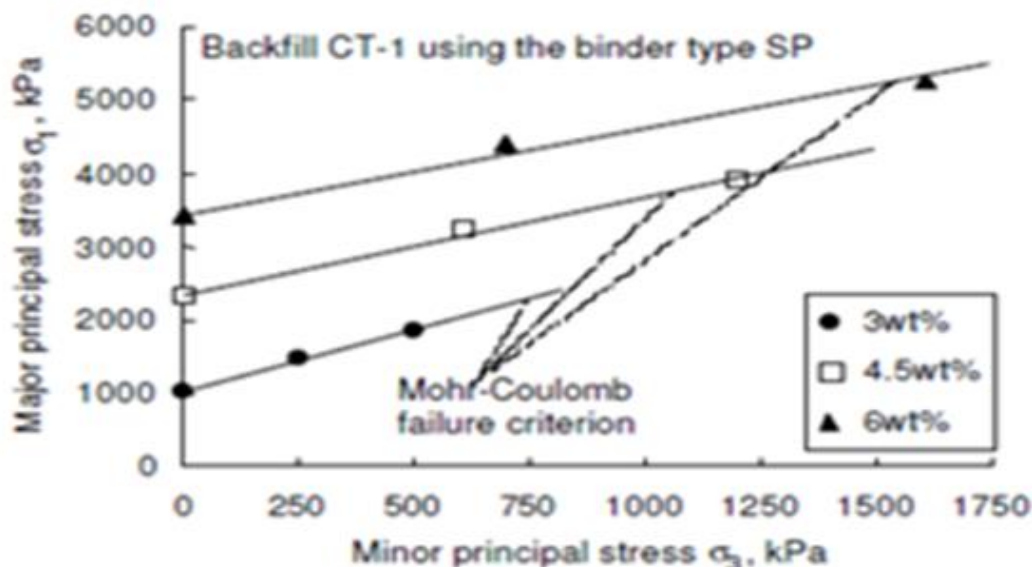


Figure 2.10 Effet de la proportion de liant sur la résistance au cisaillement (Belem et al., 2000)

Hamberg et al. (2015) ont utilisé 1 et 2 % de liant de type CE et 1% de liant de type FA dans les mélanges de remblai pour évaluer l'influence de la proportion du ciment sur la résistance à la compression uniaxiale et l'effet de lixiviation de l'arsénopyrite. Les résultats du test UCS présentés à la figure 2.11 ont montré que le liant CE de 2% a atteint la résistance à la compression la plus élevée (214 kPa) par rapport à 1% du CE (200 kPa) et 1% de FA (198 kPa) (Hamberg et al., 2015)

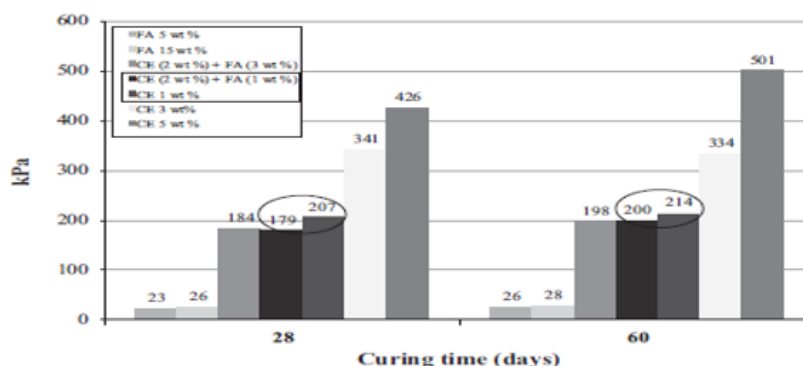


Figure 2.11 Résultats des tests de résistance à la compression sans confinement sur les matériaux CPB potentiels, durcis pendant 28 et 60 jours (Hamberg et al., 2015).

D'autres chercheurs ont aussi constaté l'effet de la proportion du liant sur la performance du remblai et des outils prédictifs et numériques ont été conçus pour la formulation des recettes de

mélanges (dosage) du remblai (Belem et al., 2010; Benzaazoua et al., 2004a; Fall et al., 2008; Sahi et al., 2015).

Le choix du type de liant est déterminant dans la formulation d'une recette de remblai. Car, le développement de la résistance mécanique des RMPC à court, moyen et long terme dépend du type de liant utilisé (Belem & Benzaazoua, 2008b; Benzaazoua et al., 2004a; Godbout, 2005; Peyronnard & Benzaazoua, 2012). Outre le développement de la résistance, le facteur coût doit être également pris en compte dans le choix du liant (coût du liant représentant environ 75% du coût total de production du remblai) (Grice, 1998). Il est donc capital de faire un choix judicieux afin de minimiser les coûts du remblayage, tout en lui fournissant une meilleure résistance mécanique. Le choix d'un liant est basé sur sa composition chimique (prise lente ou rapide), sa capacité à résister aux attaques sulfuriques, sa disponibilité et son coût sur le marché (Cao et al., 2021; Fall & Benzaazoua, 2003; Xue et al., 2019; Xue et al., 2020).

Trois principaux types de liant sont les plus utilisés dans la fabrication du remblai :

- 1) Ciments Portland : ciments Portland à usage général (GU ou type I aux États-Unis) ou à haute résistance aux sulfates (HS, type V aux États-Unis). Des mélanges de GU et HS peuvent également être utilisés;
- 2) Liants à base de laitier : constitués de 70 à 90 % de laitier granulé de haut fourneau broyé (GGBS) activé par 10 à 30 % de ciment GU Portland;
- 3) Liants à base de cendres volantes : composés de 30 à 50 % de cendres volantes de charbon (type C ou F) et de 50 à 70 % de ciment GU Portland (Peyronnard & Benzaazoua, 2012), figure 2.12.



Figure 2.12 Composition chimique des principaux liants (Belem, 2022)

L'utilisation des laitiers de hauts fourneaux procure les meilleures résistances mécaniques aux remblais fabriqués à base des résidus moyennement sulfureux. Ce comportement peut s'expliquer par l'effet pouzzolanique que possèdent les minéraux qui favorisent la formation d'un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H). Ce gel est plus résistant aux attaques sulfatiques par rapport aux portlandites. Il est généralement considéré comme le principal minéral impliqué dans l'acquisition de la résistance mécanique (Belem et al., 2000; Mun et al., 2007; Peyronnard & Benzaazoua, 2012). Toutefois, les matériaux pouzzolaniques doivent être utilisés avec un activateur d'hydratation (ciment Portland) (Buchwald & Schulz, 2005).

Les résultats des travaux de Ho et al., (2021) ont montré que les composites AAB à base de liant activé par les alcalins (FA/ GGBS) développent une meilleure performance mécanique de résistance aux cycles de gel et dégel et une bonne stabilité chimique aux premiers âges de cure. Les auteurs ont noté que l'utilisation des fibres à carbone dans le mélange a permis de garantir la durabilité du matériau (Ho et al., 2021).

Pour démontrer l'effet du type de liant, Benzaazoua et al. (2004) ont réalisé des essais sur un mélange de remblai de 5 % de ciment composés de cendres volantes de type FA et du ciment Portland de type ordinaire (T10, T50 et HSF : High silice fume). Il ressort de cette recherche que les liants contenant des cendres volantes (FA) ne procurent pas de bonnes performances de résistance au remblai en pâte cimenté. Tandis que, les liants contenant du ciment Portland (ordinaire T10, résistant aux sulfates, T50 ou enrichi en fumée de silice, HSF) permettaient

d'obtenir de bonnes valeurs de l'UCS et d'atteindre la meilleure résistance mécanique du mélange avec le laitier T10-Slag. (voir figure 2.13 - (Benzaazoua et al., 2004a).

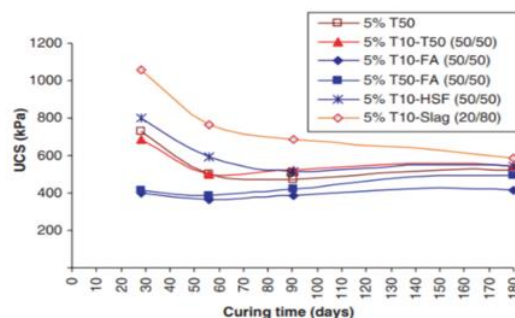


Figure 2.13 Effet de différents types de liants sur la résistance mécanique (UCS) des remblais en pâte constitués de résidus sulfurés (de la mine C) pendant le temps de durcissement (Benzaazoua et al., 2004a)

### 2.2.2.7 Influence du rapport eau-ciment (E/C) sur la résistance mécanique du remblai minier en pâte cimenté

Le rapport eau sur ciment (E/C) est un facteur essentiel dans le développement de la résistance du remblai. Car, il influence toutes les réactions d'hydratation et de précipitation dans le processus de durcissement des RMPC. Plus la teneur en eau dans le remblai augmente, plus la consistance (mesurée au cône d'Abrams) est élevée, plus l'acquisition de la résistance est faible. Cela est illustré sur la figure 2.14a & b (Benzaazoua et al., 2004a).

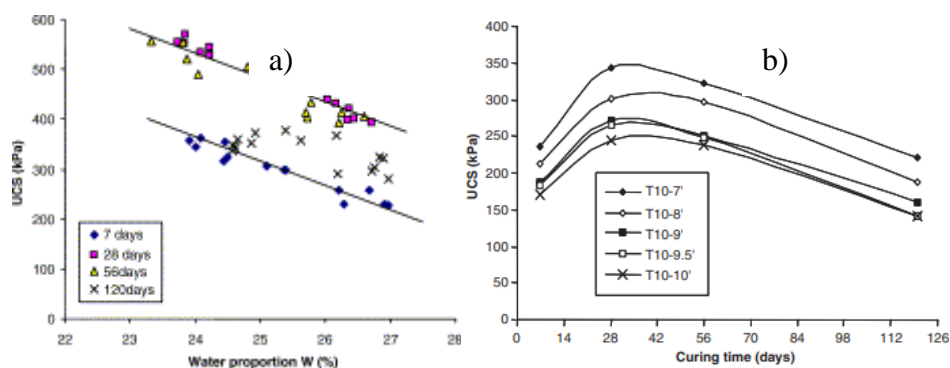


Figure 2.14 a & b Effet de la teneur en eau massique (w) sur la résistance à la compression uniaxiale (UCS) (14a) et son évolution en fonction de l'affaissement (14b) (Benzaazoua et al., 2004a)

Ouellet et al. (2007) ont constaté que l'augmentation du rapport eau/ciment entraîne le développement d'une certaine porosité dans les masses de remblais. Ce qui affecte négativement l'acquisition de la résistance à la compression uniaxiale du RMPC (Ouellet et al., 2007).

Selon les résultats de Yilmaz et al. (2011), la réduction du rapport eau/ciment et l'augmentation du temps de durcissement entraînent la diminution de la porosité totale du RMPC. Le remplissage des pores par les matériaux cimentaires, améliore les propriétés hydrogéologiques ( $CRE$ ,  $k_{sat}$ ) et engendre par conséquent, le développement d'une bonne résistance mécanique (UCS) du remblai (Yilmaz et al., 2011).

L'augmentation de la proportion de liant, appelé aussi rapport eau/ ciment dans un mélange de remblai est proportionnelle à la croissance de la résistance mécanique. Car, l'acquisition de la résistance mécanique dans le remblai en pâte dépend de l'apparition de phases hydratées qui forment des liaisons dans la matrice du ciment. Plus la teneur en eau est élevée, plus le liant est dilué et plus la résistance à la compression uniaxiale est faible (Fall et al., 2008), figure 2.15.

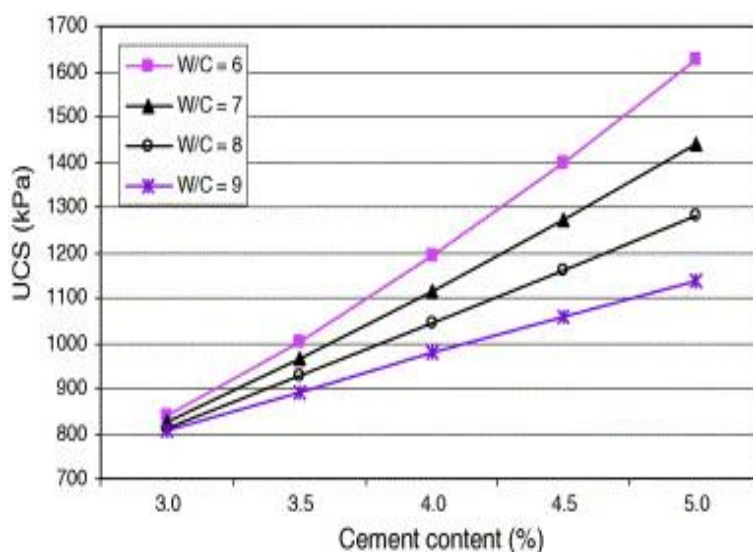


Figure 2.15 Effet du rapport E/C sur l'UCS à 28 jours du RMPC pour différentes teneurs en liant (Fall et al., 2008)

En plus de plusieurs autres propriétés, les paramètres hydrogéotechniques tels que la porosité, l'indice des vides, la teneur en eau (massique et volumique) et la conductivité hydraulique peuvent avoir un impact sur le développement de la performance mécanique du remblai minier en pâte cimenté. Cet impact est décrit pour chacun de ces paramètres.

### 2.2.2.8 Influence de la porosité & l'indice des vides sur la résistance mécanique du RMPC

La porosité ( $n$ ) représente la proportion des vides dans un volume donné. Elle se définit par le rapport entre le volume des vides et le volume total de l'échantillon.

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad ; \quad V_T = V_v + V_s \quad (2.6)$$

Où;  $V_v$  : volume des vides

$V_T$  : volume total de l'échantillon;  $V_s$  : volume du solide

La taille, la forme et la distribution des pores sont des facteurs qui influencent fortement les propriétés géotechniques et hydrogéologiques des RMPC. Le développement de la résistance et la conductivité hydraulique des RMPC sont fonction de la quantité de pores disponibles. Cette quantité dépend de la teneur en eau et des produits d'hydratation du mélange (Huang et al., 2021; Ouellet et al., 2008; Xu et al., 2018; Yilmaz et al., 2011). Les paramètres tels que, la perméabilité et la porosité dépendent également de la croissance de la précipitation des produits hydratés dans les RMPC. La diminution de la porosité totale en fonction du temps de durcissement fait accroître la résistance à la compression des RMPC (Ouellet et al., 2008). La recherche expérimentale réalisée par Sari et al.(2022) sur des échantillons de RMPC pendant une période de 28 jours de cure, a montré clairement que l'échantillon avec moins de pores (espace entre les particules remplis) développe une résistance plus élevée que ceux avec un grand nombre de pores (Sari et al., 2022).

L'indice des vides ( $e$ ) est déterminé par le rapport entre le volume des vides et le volume des grains solides.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.7)$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (2.8)$$

L'indice des vides représente la quantité de volume disponible pour le compactage d'un matériau (RMPC) et influence directement la qualité du drainage, de résistance et de rigidité des remblais. L'indice des vides dépend de la forme et de la distribution granulométrique. Son augmentation

occasionne la croissance de la perméabilité et par conséquent, la réduction de la résistance mécanique des remblais.

### **2.2.2.9 Influence de la teneur en eau massique et volumique sur la résistance mécanique du RPMC**

La teneur en eau massique ( $w$ ) d'un remblai est le rapport entre la masse d'eau ( $M_w$ ) libre contenue dans les pores et la masse sèche ( $M_d$  ou  $M_s$ ) de l'échantillon. La teneur en eau volumique ( $\theta_w$ ) représente le ratio des volumes de l'eau ( $V_w$ ) sur le volume total ( $V_T$ ).

$$w\% = \frac{M_w}{M_d} \times 100 ; \quad M_w = M_h - M_d \quad (2.9)$$

Où

$M_h$  est la masse humide de l'échantillon

La teneur en eau volumique ( $\theta_w$ ) est calculée par la formule :

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_T} = n \times S_r \quad (2.10)$$

Où

$S_r$  est le degré de saturation

La teneur en eau volumique ( $\theta_w$ ) et le degré de saturation ( $S_r$ ) représentés par le rapport eau/liant (dans le cas des remblais en pâte cimentés) sont des paramètres principaux dans le processus des réactions d'hydratation et de précipitation (Benzaazoua et al., 2004a).

### **2.2.2.10 Influence du degré de saturation sur la résistance mécanique du RPMC**

Le degré de saturation d'un échantillon de RMPC est déterminé par le rapport entre le volume de l'eau contenue dans les pores ( $V_w$ ) et le volume des vides ( $V_v$ ). Il peut également être défini comme le rapport entre la teneur volumique et la porosité. Le degré de saturation est généralement maintenu à 90 % dans le cas des remblais.  $S_r$  se calcule par la formule suivante :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad \text{ou} \quad S_r = \frac{\theta}{n} \times 100 \quad (2.11)$$



### 2.2.2.11 Influence du liant sur la conductivité hydraulique saturée et sur la performance des RPMC

La conductivité ou la perméabilité intrinsèque ( $k$ ) est l'un des paramètres importants qui permettent d'évaluer la performance environnementale et la durabilité du remblai en pâte cimenté.

La conductivité hydraulique est la facilité avec laquelle un fluide (ex. l'eau, l'air) peut s'écouler à travers les vides dans un RMPC. Elle dépend de la taille de grains, de l'indice des vides et du degré de saturation du RMPC (Fall et al., 2009; Pokharel & Fall, 2013).

Une faible conductivité hydraulique permet de limiter les conditions d'écoulement dans le remblai; afin de garantir sa durabilité et d'empêcher le lessivage et la migration des contaminants (DMA) vers les eaux superficielles et souterraines (Bussière et al., 2005; Deb et al., 2017; Newman et al., 2001). Newman et al.(2001) ont trouvé des valeurs de conductivité hydraulique situées entre  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  m/s lorsque le % de ciment utilisé correspond à 1 (Newman et al., 2001).

Les résultats des travaux de Belem et al. (2001) ont montré l'influence du ciment sur la perméabilité du remblai en pâte après 28 jours de cure. En effet, l'ajout de 5 % de ciment à la pâte de remblai a entraîné une modification de la structure des pores initiaux due à leur remplissage par les hydrates formés. Ceci a conduit à une diminution rapide de la perméabilité au cours des 7 jours de cure (Belem et al., 2001) (voir Figure 2.16).

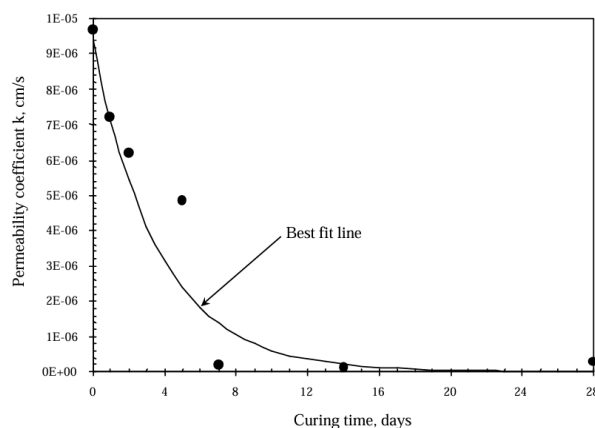


Figure 2.16 Évolution de la conductivité hydraulique du remblai en pâte en fonction du temps de durcissement (Belem et al, 2001).

L'allure de la courbe indique une diminution rapide de la conductivité hydraulique de la pâte pendant les 7 premiers jours de cure. Après 7 jours tout changements de la conductivité hydraulique

avec une valeur proche  $10^{-10}$  m/s serait moins remarquable. Cela pourrait être attribué au remplissage des pores initiaux par les hydrates formés.

Une autre étude a montré que la capacité de drainage, la conductivité hydraulique et la consolidation sont des paramètres fortement dépendants. L'ajout de ciment à la pâte de remblai réduit considérablement l'indice des vides, la perméabilité ( $k_{sat}$ ) et augmente la résistance mécanique. Toutefois, ce comportement dépend du type et de la proportion du liant utilisé (Yilmaz et al., 2015a).

La perméabilité est une fonction du temps. Plus le temps de curage d'un échantillon de remblai augmente, plus la conductivité hydraulique diminue. Elle peut également être affectée par d'autres paramètres tels que : la proportion du liant, le rapport eau - ciment, la granulométrie des résidus. La conductivité hydraulique diminue aussi avec la diminution du rapport E/C ou l'augmentation de la teneur du liant (Godbout, 2005). Dans les travaux de Fall et al. (2009), la perméabilité la plus faible a été obtenue dans les remblais fabriqués à base de résidus fins avec 45 % de particules fines (Fall et al., 2009). Ceci démontre l'influence de la granulométrie sur l'évolution de la perméabilité du RMPC.

La conductivité hydraulique des remblais sulfatés augmente avec une température froide de durcissement égale à 2°C et une concentration de sulfate supérieure à 15000 mg/l. Cette détérioration est due à la modification de la structure poreuse (grossissement) par l'inhibition de l'hydratation du liant à basse température. Les conditions de durcissement à basse température affectent la performance du RMPC (Pokharel & Fall, 2013).

Outre les autres composantes d'influence, l'augmentation du nombre de cycles de mouillage-drainage entraîne une augmentation de la porosité et de la perméabilité des RMPC. Ces variations peuvent causer une dégradation de la résistance à la compression uniaxiale en raison du changement périodique de la teneur en eau (X. Li et al., 2019; Ma et al., 2021). Cependant, l'utilisation du liant permet de réduire l'influence du nombre de cycles de mouillage-drainage sur la porosité et la perméabilité. Cela favorise la solidification et l'augmentation de la résistance à la compression uniaxiale des remblais en pâte cimenté (Ma et al., 2021).

Selon Godbout et al. (2005; 2007), l'ajout de ciment au remblai en pâte cimenté peut réduire la porosité et la perméabilité ( $k_{sat}$ ) et améliorer la capacité de rétention d'eau (CRE). Toutefois, l'ampleur des réactions du processus dépend du type et de la proportion du liant utilisé. Par exemple

l'utilisation de 4,5 % de CPFA a réduit la  $k_{sat}$  de  $2.3 \times 10^{-5}$  cm/s à  $1.5 \times 10^{-5}$  cm/s après 7 jours de cure et s'est stabilisé par la suite à une valeur de  $7.8 \times 10^{-6}$  cm/s après 28 jours de durcissement. Tandis qu'avec 1 % du même type de ciment CPFA, le  $k_{sat}$  a connu une légère diminution inférieure à ½ ordres de grandeur. En utilisant deux types de liant (CPFA, CPSG), avec les mêmes quantités de 1%, le constat est que le CPSG permet une meilleure réduction du  $k_{sat}$  par rapport au CPFA (Godbout, 2005; Godbout et al., 2007) (Voir figure 2.17 a & b).

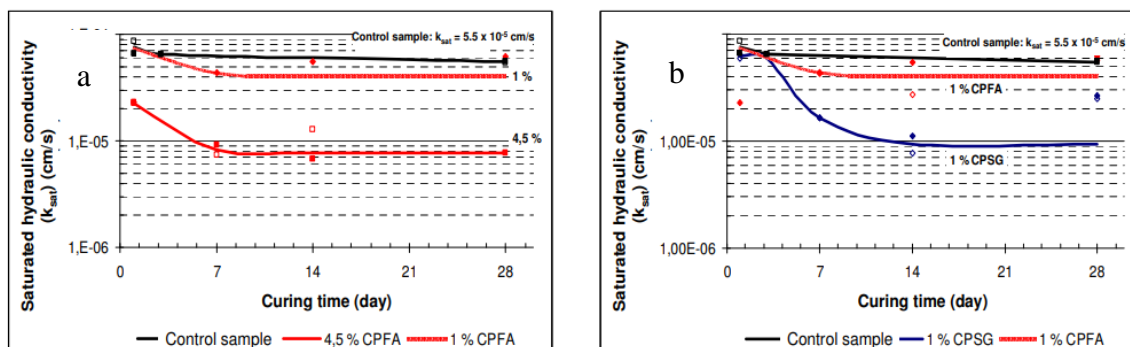


Figure 2.17 Évolution de  $k_{sat}$  en fonction du temps de durcissement pour les types de liant (CPFA, CPSG) et de proportion 4,5% et 1 %.(Godbout et al., 2007).

Curieusement, les résultats de Deschamps et al. (2008, 2009) montrent que l'utilisation d'une faible quantité de 2% de ciment a entraîné l'augmentation de la porosité. Selon l'auteur, l'ajout de 2 % et moins de ciment réduit considérablement le tassement, mais n'est pas capable de remplir les pores de la pâte (Deschamps, 2009; Deschamps et al., 2008). La figure 2.18 (a&b) illustre ces résultats.

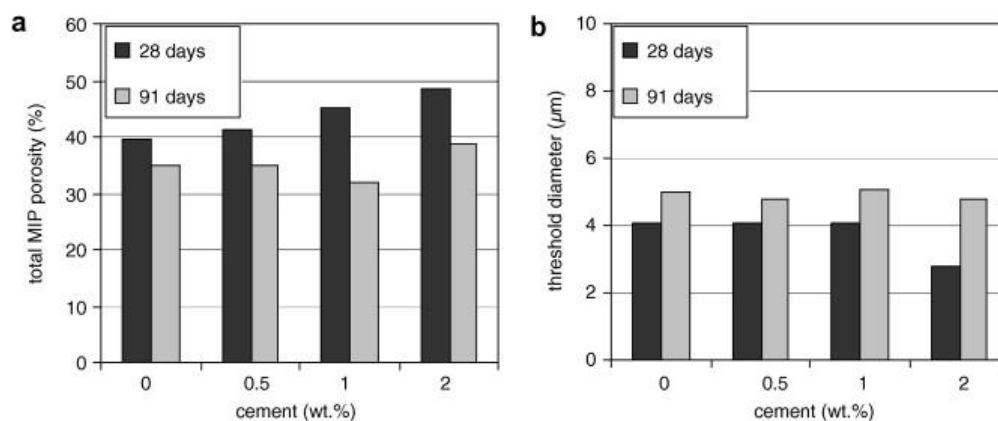


Figure 2.18 (a) Porosité MIP totale et (b) diamètre seuil pour les échantillons de référence après 28 et 91 jours de durcissement (Deschamps et al., 2008).

### **2.2.2.12 Influence du liant sur la capacité de rétention d'eau et la sur la performance des RPMC**

La courbe de rétention d'eau (CRE) est l'un des plus importants paramètres qui permettent de qualifier et quantifier la capacité d'un sol à retenir l'eau. Elle permet de décrire l'écoulement de l'eau et la migration des contaminants dans les dépôts en surface sous forme de remblai ou d'amendement cimentaire (Bussière et al., 2005; Deb et al., 2017).

Dans le cas du remblai cimenté en pâte, les changements des propriétés hydriques sont généralement causés par la formation des minéraux primaires et secondaires résultant des réactions d'hydratation du liant hydraulique. Ces minéraux entraînent des modifications de la structure des pores (taille, connectivité, fissuration, etc.) dans la matrice du remblai en fonction de la chimie de ses composantes (Belem et al., 2001; Ouellet et al., 2004; Pokharel & Fall, 2013).

La pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) ou AEV ou Air Entry Value et la pression résiduelle ( $\psi_r$ ), sont les deux paramètres qui caractérisent la CRE. Ces paramètres correspondent respectivement à la pression au début de la désaturation et la pression qui peut s'exercer sur la teneur résiduelle de l'eau ( $\theta_r$ ) (Aubertin et al., 1998).

Dans un cycle de mouillage-drainage, la différence entre les CRE trouvées en mouillage et en drainage est due au phénomène d'hystérésis et dépend du sens d'écoulements d'eau. Car, les teneurs en eau volumique obtenues en drainage sont usuellement supérieures à celles obtenues en mouillage pour une pression donnée (Maqsoud et al., 2012; Maqsoud & Aubertin, 2002). Ce phénomène est attribué à plusieurs facteurs, dont l'angle de contact qui est plus grand en mouillage qu'en drainage. La figure 2.19 illustre plusieurs courbes de rétention d'eau obtenues en mouillage et en drainage.

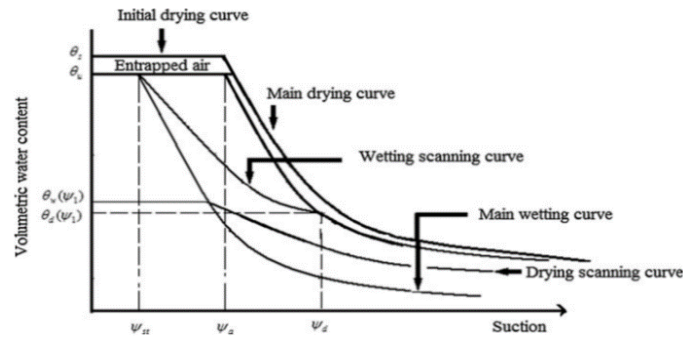


Figure 2.19 Différentes CRE obtenues par l'effet d'hystérésis dans les CRE (Maqsoud et al., 2012)

D'après cette figure :

- La courbe limite de drainage-mouillage correspond à la première courbe obtenue par drainage progressif d'un sol à saturation ( $\theta_s = n$ ). Le premier cycle de drainage-mouillage favorise la diffusion de l'air dans les pores du sol. La présence de l'air constitue un obstacle pour l'écoulement de l'eau et empêche la reproduction de cette courbe.
- La courbe limite de mouillage s'obtient en passant de l'état sec d'un sol à un état de saturation maximale ( $\theta_s$ ) par le processus de mouillage.
- Contrairement aux courbes de limites, les courbes de mouillage-drainage principales peuvent être reproduites expérimentalement. Elles sont obtenues après les courbes de limites de drainage par suite de plusieurs cycles de mouillages et de drainage. Ces courbes peuvent être utilisées pour des fins de modélisation du phénomène d'hystérésis dans les courbes de rétention d'eau;
- Les courbes de drainage ou mouillage primaire s'obtiennent à travers le processus inverse de drainage-mouillage que subit le sol. Elles se forment à partir des courbes principales;
- Les courbes de mouillage-drainage secondaires, quant à elles, prennent leur source à partir des courbes primaires et sont également obtenues par le processus inverse auquel le sol est soumis.

La détermination de la courbe de rétention d'eau est principalement basée sur des méthodes de mesures au laboratoire (Maqsoud et al., 2004), sur des modèles descriptifs (Fredlund et al., 1994; Van Genuchten, 1980), et sur des modèles prédictifs (Aubertin et al., 2003; Mbonimpa et al.,

2006a). La CRE peut aussi être déterminée par des méthodes de mesures du terrain (Bussière et al., 2007).

La figure 2.20 présente deux CRE déterminées par différentes méthodes (laboratoire & prédictive), avec une concordance entre les résultats de la courbe mesurée et ceux de la CRE prédite. Cependant, il faut noter que ces résultats ne sont pas toujours concordants dans tous les cas.

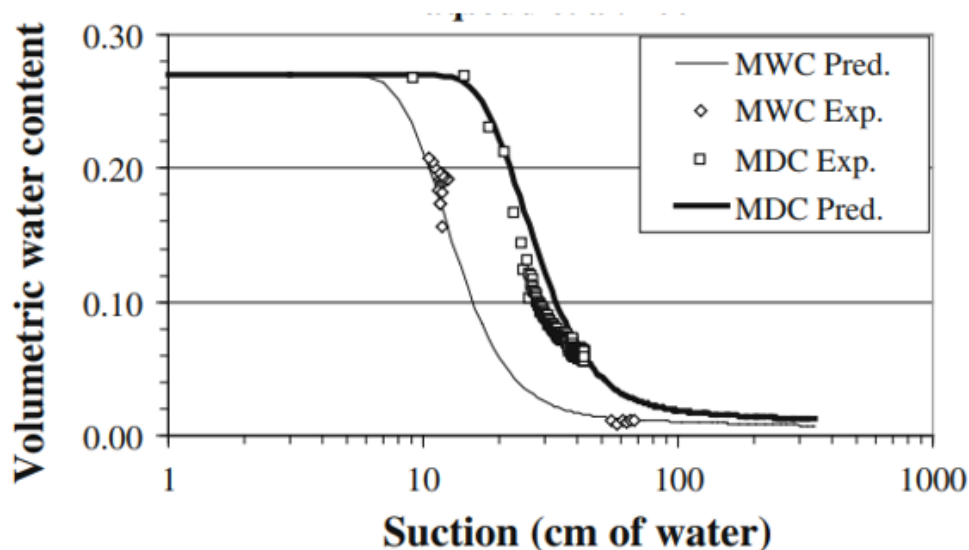


Figure 2.20 Courbes de rétention d'eau expérimentales et prédictives (Maqsoud et al., 2004)

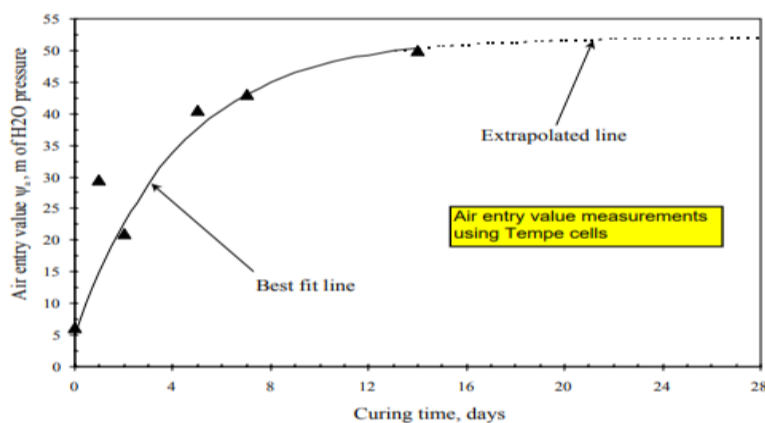


Figure 2.21 Évolution de la capacité de rétention d'eau du remblai en pâte à travers la valeur d'entrée d'air (Belem et al, 2001)

La figure 2.21 indique que la valeur de la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) est passée rapidement de 6,5 cm d'eau au jour 0 de cure à 20 et 30 m de hauteur d'eau en moins de deux jours de durcissement.

Ceci démontre l'influence de l'ajout de liant à la pâte de remblai sur la capacité de rétention d'eau. Après cet âge précoce de cure, l'augmentation de la succion devient progressive jusqu'à atteindre un plateau de 50 m qui correspond probablement à la valeur maximale de durcissement après 14 jours de cure (Belem et al., 2001).

Afin d'évaluer l'influence de l'ajout de liant sur les propriétés de rétention d'eau du remblai en pâte cimenté, Godbout (2005) a utilisé trois proportions différentes (4,5%; 2% et 1%) de ciment du même type (CPSG) dans un mélange de remblai. Il a constaté que les courbes de rétention de ces trois mélanges évoluaient en fonction du temps de cure avec une tendance semblable pendant les 7 et 14 premiers jours de durcissement. Cependant, les 4,5% offraient la plus grande capacité de rétention d'eau; passant de 28 kPa à 620 kPa après 28 jours de cure, contre 345 kPa pour 2 % et 175 kPa pour les 1% (Godbout, 2005).

### **2.2.2.13 Influence des propriétés de consolidation sur le développement de la résistance mécanique du RPMC**

La consolidation et le tassement du RMPC est la capacité de drainage ou la réduction du volume des vides d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte (poids propre, charges externes, ouvrages, etc.). En plus des conditions de durcissement, la consolidation est également un autre facteur qui influence le développement de la résistance à la compression du remblai (Belem et al., 2006). Cette propriété est caractérisée par le coefficient de consolidation ( $C_v$ ), l'indice de compression ( $C_c$ ) et l'indice de recompression ( $C_r$ ) (Yilmaz et al., 2008).

La consolidation d'un matériau dépend de plusieurs facteurs tels que, l'indice des vides ( $e$ ); perméabilité ou conductivité hydraulique ( $k_{sat}$ ); le taux de chargement et les propriétés de compressibilité du remblai.

Belem et al. (2006) ont rapporté que lors des essais de résistance à la compression uniaxiale, la valeur la plus élevée de l'UCS du RMPC était obtenue avec les échantillons entièrement drainés (Fully-drained : FD) et les échantillons semi-drainés (Half-drained : HD) avec des valeurs respectivement :  $UCS > 2.9$  MPa et ( $UCSC > 2,7$  MPa). Ces valeurs démontrent l'importance du drainage sur le processus de développement de la résistance à la compression du RMPC (voir figure 2.22 - (Belem et al., 2006).

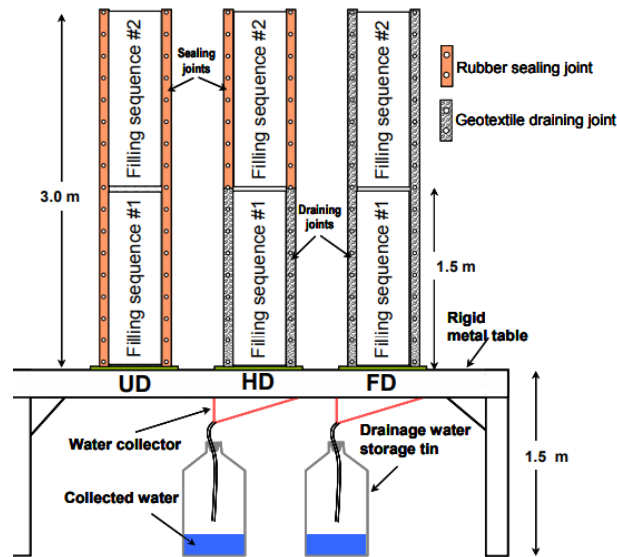


Figure 2.22 Schéma de configuration d'un test de consolidation des échantillons de RMPC  
(Belem et al., 2006)

#### 2.2.2.14 Influence de la température sur la performance mécanique du RPMC

La température est un facteur d'influence de la cinétique d'hydratation du ciment. Plus la température est élevée, plus la vitesse d'hydratation du ciment augmente. Les résultats des travaux réalisés sur différents types d'échantillons, à différents temps et différentes températures (2, 20, 35 et 50°C), ont montré que les propriétés mécaniques des remblais en pâte cimentés sont significativement influencées par la température de durcissement. Cette influence dépend de plusieurs facteurs entre autres : le type de liant, le rapport E/C, le type de résidu et le temps de durcissement. L'augmentation de la température de durcissement entraîne une augmentation de l'UCS à court et long terme (Fall et al., 2010a), figure 2.23.



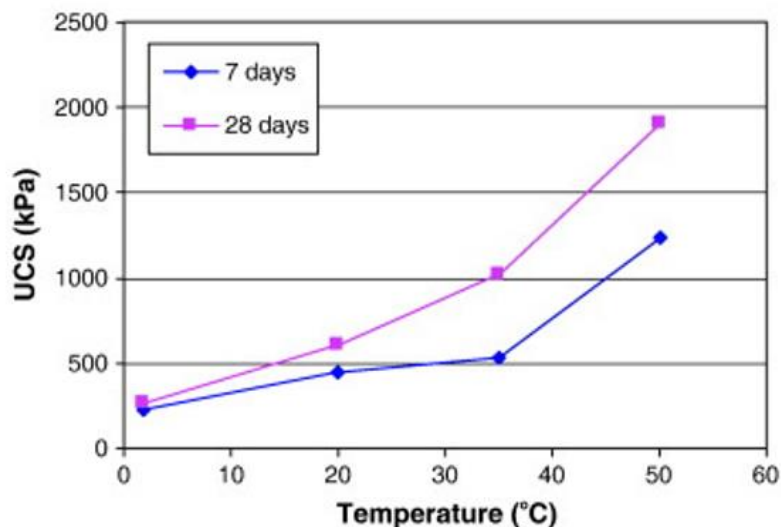


Figure 2.23 Effet de la température sur le développement de l'UCS du remblai en pâte cimenté avec du PCI (affaissement 18 cm ; résidus : TS) (Fall et al, 2010).

La température initiale du remblai a une influence considérable non seulement sur la température de durcissement, mais aussi sur le développement de sa résistance et sur son autodessiccation (H. Jiang et al., 2022; Wang et al., 2004; Wang et al., 2016).

Les résultats des travaux de Beya et al. (2015, 2016) ont révélé que, les paramètres tels que la température positive (22 °C), la proportion du liant ( $B_w = 5\%$ ) et la salinité (0 à 10 g/L) de l'eau de mélange avaient une influence négligeable sur l'évolution des propriétés mécaniques des RMPC en fonction du temps de cure. Cependant, les basses températures (0 à -8°C gel) influençaient significativement ces propriétés. Les résultats des essais ont montré que le gel des remblais induit une augmentation notable des propriétés thermiques des RMPC (22 %) et une diminution de la capacité thermique (12 %) (Beya, 2016; Beya et al., 2015) (Voir les figures 2.24).

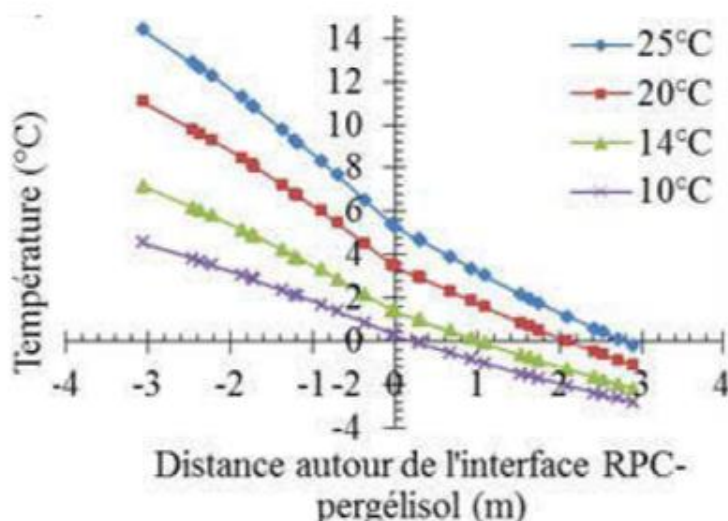


Figure 2.24 Influence de la température de déposition du RMPC (10, 14, 20 et 25 °C) sur l'épaisseur de dégel du pergélisol (à une température initiale de -6 °C) à 365 jours (Beya, 2016).

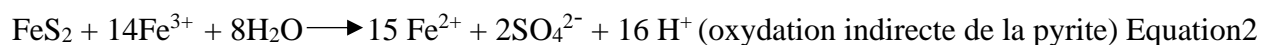
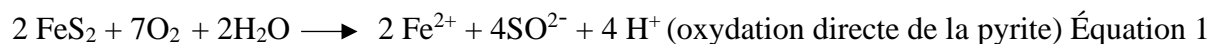
Il ressort de ces différentes études que plusieurs facteurs physicochimiques peuvent influencer certaines propriétés du remblai. Cependant, l'utilisation du remblai en pâte cimenté est considérée comme une solution fiable pour la gestion des résidus miniers et sa performance environnementale a été démontrée par de nombreux chercheurs.

### 2.3 Performance environnementale du RMPC

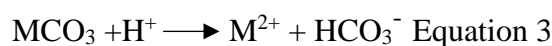
La performance environnementale du RMPC réside dans la réduction considérable de la quantité de résidus (60 %) à entreposer en surface, la limitation des problèmes de drainage minier acide et la stabilité des chantiers remblayés (Belem & Benzaazoua, 2008b; Benzaazoua et al., 2003; Benzaazoua et al., 2004a; Newman et al., 2001; Ouellet et al., 2006).

En effet, chimiquement, les problèmes environnementaux sont liés à la présence des contaminants tels que l'arsénique, la pyrite, la pyrrhotite, etc. Ces minéraux sont généralement présents dans les résidus des gisements sulfureux et représentent un risque majeur pour l'environnement. Lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau et l'air, il se produit un phénomène appelé drainage minier acide (DMA) (Bussière et al., 2005). Par exemple, l'As est une substance particulièrement dangereuse à cause de sa grande solubilité et mobilité. Il génère des oxydes d'arsenic, des métaux solubles qui augmentent l'acidité. La migration de cette acidité peut contaminer les eaux de surfaces ainsi que les eaux souterraines et impacter dangereusement la faune et la flore (Benzaazoua, Marion, et al., 2004; Coussy, 2011).

La réaction d'oxydation générale des sulfures (DMA) se traduit par les équations suivantes (Aubertin et al., 2002) :



Lorsque les minéraux carbonatés tels que la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la dolomite (Ca, Mg) et la magnésite ( $\text{MgCO}_3$ ) sont en présence de l'acide, ils se dissolvent et tamponnent l'acidité produite. L'équation de neutralisation se présente comme suit :



Du point de vue physique, les problèmes d'instabilité environnementaux sont en général liés à la rupture des digues à cause de la pression interstitielle de l'eau dans le parc à résidus (Aubertin et al., 2002b). Toutefois, l'ajout d'un liant dans les résidus permet de leur conférer une stabilité chimique et physique. Les agents liants ont la capacité de maintenir chimiquement stables les contaminants et de les encapsuler dans la matrice cimentaire. Dans ce cas, les métaux lourds sont précipités sous forme insoluble, ou sont en interaction avec les produits d'hydratation. L'ajout de faibles quantités (1 à 2 %) de ciment dans les mélanges de remblai permet d'améliorer les propriétés hydriques en réduisant la porosité et la perméabilité; et en augmentant la capacité de rétention des matériaux. Cet amendement cimentaire permet de réduire le taux de lixiviation des contaminants et d'augmenter le pouvoir de neutralisation de l'acidité produite par les sulfures (Deschamps et al., 2009; Elghali et al., 2019; Godbout, 2005; Q. Jiang et al., 2022). L'effet du ciment sur les propriétés de rétention procure au remblai un haut degré de saturation (supérieur à 85 %). Les résultats des études de Barast et al. (2014) ont révélé que l'ajout de 2% de ciment Portland aux couches de 10 cm de résidus, a permis de maintenir un degré élevé de saturation entre 85 à 95% dans les couches sous-jantes et de réduire les concentrations d'As, de Ni et de Pb et maintenir le pH à 6 d'environ (valeurs réglementaires) (Barast et al., 2014). Cette saturation empêche la diffusion de l'oxygène et par conséquent, limite l'oxydation des sulfures (Jouini et al., 2022; Ouellet et al., 2003).

Les résultats des essais de lixiviation ont montré que l'As est resté stabilisé par le ciment enrichi en chaux malgré l'augmentation de la porosité par la dissolution de la portlandite à la périphérie des échantillons lessivés (Benzaazoua, Marion, et al., 2004). Il a été également constaté que l'encapsulation ou le revêtement des particules de résidus avec les produits d'hydratation du ciment

a contribué à la réduction de la réactivité des sulfures dans les remblais (Aldhafeeri & Fall, 2016; Ouellet et al., 2006). Selon Deschamps et al.(2008), l'emploi de 2% de ciment Portland dans les résidus a amélioré les propriétés environnementales en maintenant le pH supérieur à 8 (Deschamps et al., 2008). Lorsque les hydrates sont formés, ils remplissent les pores et lient les particules du remblai pour créer un matériau plus stable et solide avec une meilleure performance mécanique (Belem et al., 2000; Benzaazoua et al., 2004a; Benzaazoua, Marion, et al., 2004). Les résultats des études de Deschamps (2009) et Hadimi et al. (2016) sur l'amendement par intercalation de couches, ont montré que l'ajout de 2 % de ciment aux couches de résidus permettait de solidifier les couches cimentées. Celles-ci peuvent servir de couches de protection pour celles non cimentées et aider à limiter le taux de lixiviation (Deschamps, 2009; Hadimi et al., 2016).

Dans la littérature, le pouvoir neutralisant, la forte capacité de rétention d'eau, la bonne performance mécanique, la faible perméabilité, la faible porosité et la durabilité font du RMPC une technique de meilleure performance environnementale pour la gestion des résidus miniers.

Toutefois, un autre aspect soulevé par certains auteurs est celui lié à la présence des phyllosilicates (talc & muscovite) dans les résidus miniers. Les phyllosilicates peuvent ralentir le processus de drainage de l'eau dans le remblai et affecter les phénomènes de consolidation. Cet effet peut être dû à la capacité des phyllosilicates de retenir l'eau dans la structure de leurs feuillets. Cette accumulation d'eau augmente la porosité dans la matrice cimentaire et une réduction de la résistance mécanique (Benzaazoua et al., 2010; Kornmann et al., 2005).

Afin de mieux comprendre les principales caractéristiques des phyllosilicates, la section suivante sera consacrée à l'étude de leurs propriétés, leur structure et leur classification.

## **2.4 Minéralogie et forme feuilletée des phyllosilicates**

Les phyllosilicates sont issus de l'altération des roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires. Ils constituent les composants essentiels des sols et sont généralement très abondants dans les zones superficielles de la croûte terrestre (95%) où les conditions climatiques sont favorables pour la dégradation des roches primaires. Les phyllosilicates forment un vaste groupe de phases minérales dans lequel sont classés des minéraux primaires de type micas et des argiles secondaires de structure, de texture et de morphologie variées (Guillemot, 1986), Pomerol et al., 1995, (Djellal, 2019).

En effet, l'altération d'une roche est l'ensemble des processus de transformation physique, chimique et biologique qu'elle peut subir pour aboutir à la formation d'un sol soit par destruction (roche mère) ou par consolidation (roches meubles) (BI, 2010).

Les phyllosilicates forment des empilements de feuillets silicatés composés de plusieurs couches de granulométrie fine, de structures cristallines désordonnées et de compositions chimiques très variables. Ces structures sont essentiellement constituées de couches tétraédriques de silice (**T**) et de couches octaédriques d'aluminium (**O**) (Árkai, 2002).

En raison de leur proportion et leur variabilité dans les sols, les minéraux argileux sont une composante essentielle dans la gestion des sols. Une bonne compréhension de la réactivité des minéraux argileux et de leur influence sur les propriétés physico-chimique et hydromécanique des sols est indispensable dans une perspective de gestion durable des sols (Caner, 2011).

### 2.4.1 Structure de base des phyllosilicates

Selon les travaux de Baldeyrou-Bailly (2003) et Caner (2011), les phyllosilicates se présentent sous forme de cristaux aplatis, caractérisés par :

- Un clivage parfait dans un plan (001);
- Trois oxygènes en commun au sommet et le quatrième oxygène pointe vers l'intérieur du feuillet;
- Une structure en feuillet et une charge structurale (positive, négative, neutre);
- Des phénomènes de gonflement dû aux forces d'attraction entre les ions et les feuillets (charges ou énergies);
- une structure cristalline qui résulte de l'empilement des couches composées de couches octaédriques et tétraédriques et des substitutions tétraédriques de cation  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  (Baldeyrou-Bailly, 2003; Caner, 2011);

L'élément structural des phyllosilicates est le feuillet. Les feuillets sont séparés les uns des autres par des espaces inter foliaires. La structure des phyllosilicates est basée sur une combinaison entre les ions  $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$  pour former les couches tétraèdres (**T**) et octaèdres (**O**). Ces anions  $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$  occupent les sommets des couches tétraèdres et octaèdres et laissent les espaces inter foliaires vides. Afin de combler les vides, les cations ( $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) occupent les cavités pour compenser le déficit de charge, voir figure 2.25 (Caillère, 1982; Comparon, 2005).

La couche tétraèdre (T) : est formée de silice tétraédrique constituée de quatre atomes d'oxygène au sommet autour d'un seul atome de silicium. Les tétraèdres partagent leurs trois oxygènes pour former un plan basal de feuillets. Le quatrième oxygène se dirige vers l'intérieur du feuillet pour former un réseau pseudo hexagonal qui constitue la base de la couche. L'épaisseur des feuillets tétraédriques est de  $3\text{\AA}$ . Chaque feuillet est formé d'un cation  $\text{Si}^{4+}$  et de trois anions  $\text{O}^{2-}$ , et un quatrième anion  $\text{O}^{2-}$  non partagé. Les charges positives et négatives ne se compensent pas dans cette couche.

La couche octaèdre (O) est constituée de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyde  $\text{OH}^-$  qui entourent un atome d'aluminium  $\text{Al}^{3+}$  et de magnésium  $\text{Mg}^{2+}$ . L'épaisseur des feuillets est de  $4\text{\AA}$ . Le bilan des charges dans ces feuillets est de (+3) pour un cation  $\text{Al}^{3+}$  et de (-1) pour l'ion hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ). Cette couche est appelée di-octaédrique parce que seulement deux cavités sur trois sont occupées par les cations  $\text{Al}^{3+}$ .

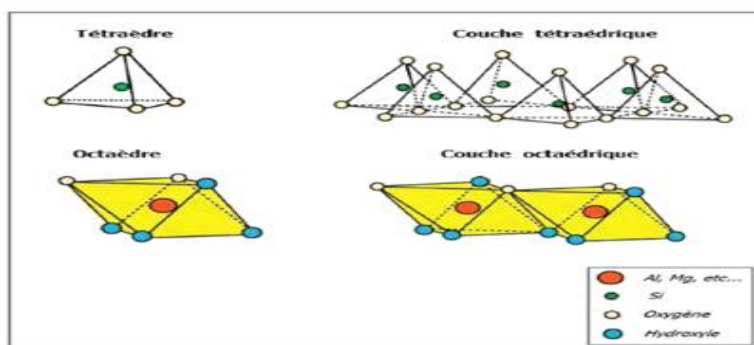


Figure 2.25 Représentation des couches tétraèdres et octaèdres (Gautier, 2008)

L'association des feuillets tétraédriques et octaédriques donne naissance à trois types de feuillets (TO, TOT et TOTO).

Feuillet de type TO (1:1) : est formé d'une couche tétraédrique superposée à une couche octaédrique d'une épaisseur de  $7\text{\AA}$ . Sa formule est :  $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{OH}_2\text{M}_{12}+\text{OH}_6$ .

Feuillet de type TOT (2:1): est formé d'une couche octaédrique disposée entre deux couches tétraédriques. Son épaisseur est de  $10\text{\AA}$ . Sa formule structurale est représentée par :  $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{OH}_2\text{M}_6^{3-2}$ .

Feuillet de type TOTO (2:1 :1): est constitué d'une couche octaédrique libre qui s'associe à un feuillet TOT. L'épaisseur de l'ensemble des unités est de  $14\text{\AA}$ . Sa formule est:

$(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{OH}_2\text{M}_6+2-3-\text{Mg}_3(\text{OH}_6)$

Les phyllosilicates sont classés en fonction du type de feuillet (TO, TOT, TOTO), de leur épaisseur (7Å; 10Å et 14Å), du taux de substitution; de la nature des liaisons interfoliaires et de l'occupation des couches octaédriques (Benchabane, 2006; Pédro, 1994).

## 2.4.2 Classification des phyllosilicates

Les principaux groupes de phyllosilicates sont représentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 principaux groupes des phyllosilicates (Caner, 2011)

Type de feuillets	Groupe	Sous-groupe	Espèces
1/1	Kaolinite/ Serpentine	Kaolinite	Kaolinite, Dickite, Nacrite, Halloysite
		Serpentine	Chrysotile, Lizardite
2/1	Pyrophyllite/ Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite
		Talc	Talc
	Mica	Mica dioctaédrique	Muscovite, paragonite, Illite
		Mica trioctaédrique	Phlogopite, Biotite
	Smectites	Smectite dioctaédrique	Beidellite, Montmorillonite
		Smectite trioctaédrique	Saponite, Hectorite
2/1/1	Chlorites	Chlorite dioctaédrique	Donbassite Chlinochlore (Mg)
		Chlorite trioctaédrique	Chamosite (Fe) Sudoite

Les micas sont principalement représentés par la paragonite, les illites et la muscovite. Parmi ces minéraux, les caractéristiques de la muscovite seront présentées dans la section suivante.

## 2.4.3 Caractéristiques de la muscovite

La muscovite, de formule chimique  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$  un phyllosilicate dioctaédrique de type 2:1. Chaque feuillet de la muscovite est composé de deux couches tétraédriques liées entre elles par une couche octaédrique (Guillemot, 1986). La muscovite possède une faible capacité d'échange cationique et présente une haute charge globale négative du feuillet créé par la substitution isomorphe de  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$ . Cette charge est compensée par le cation potassium ( $\text{K}^+$ ) qui occupe les espaces intercouches afin de combler le déficit de charges entre les feuillets. Les feuillets possèdent un arrangement ordonné et sont séparés les uns des autres par des espaces

inter foliaires. Ces espaces constituent généralement des zones d'accumulation des molécules d'eau et des ions. Cependant, la présence des ions potassium ( $K^+$ ) dans ces espaces occasionne une diminution de l'hydratation de l'espace inter foliaire (El Ouahabi, 2013; Jozja, 2003). En effet, lorsque le déficit de charge est compensé par des cations anhydres (ex.  $K^+$ ) dans l'espace inter foliaire, ces cations procurent une liaison rigide entre les feuillets. Ils réduisent l'hydratation et la déformation des feuillets, limitant ainsi le phénomène de gonflement ( $K^+$ ) (El Ouahabi, 2013; Jozja, 2003). (Deramne, 2021; Faisandier, 1997; Mering, 1971; Norrish, 1954; Pons et al., 1981, 1982).

#### **2.4.4 Facteurs d'influence sur le phénomène de gonflement des phyllosilicates**

Le phénomène de gonflement est lié à l'affinité et la force de liaison qu'entretiennent les phyllosilicates avec l'eau. Leur degré d'affinité dépend de la densité de charge de surface, du type de charge et de la nature des ions de remplissage des espaces inter foliaires qui assurent les liaisons entre les feuillets des minéraux. Le processus d'attraction des molécules et de rétention d'eau des phyllosilicates est essentiellement lié à leur fine granulométrie et serait le résultat des forces capillaires (Jozja, 2003). En général, les phyllosilicates ont une propriété gonflante en présence de l'eau en raison de la non-neutralité de leur capacité d'échange cationique (CEC). La capacité d'échange cationique est le pouvoir qu'un sol possède et lui permet de retenir et d'échanger des cations. Pour Célini (2004), la CEC est le nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour équilibrer la charge électrique de 100 grammes de minéral calciné. Elle est exprimée en milliéquivalent/100g d'argile calcinée (Célini, 2004).

L'intercalation des molécules d'eau dans les espaces inter foliaires crée une dispersion des particules et un écartement des feuillets. Ce phénomène augmente le volume et induit une pression de gonflement. Toutefois, la pression de gonflement dépend d'une part de l'espace inter foliaire qui sépare les feuillets et d'autre part, de la nature du cation compensateur (Egloffstein, 1997). Parmi les cations présents dans les feuillets, il existe les cations compensateurs,  $Na^+$ ,  $Li^+$ ,  $H^+$  et  $Ag^+$  qui assurent une dispersion maximum de tous les phyllosilicates susceptibles d'être hydratés et gonflés en présence de l'eau (par exemple, les montmorillonites, les smectites, etc. (Faisandier, 1997; Touret et al., 1990). Une autre catégorie de cation est celle des cations  $Cs^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$  qui procurent une hydratation et un gonflement limité des phyllosilicates. Quant au cation potassium ( $K^+$ ), sa présence favorise la formation de deux feuillets de nature différente à l'intérieur



d'une même particule. Il s'agit d'un feuillet hydraté et gonflant (la smectite) et un feuillet peu hydraté et non gonflant (illite, muscovite). Ce dernier est généralement responsable des effondrements des sols (Faisandier, 1997).

Le rôle des cations compensateurs est essentiel dans le phénomène d'hydratation et de gonflement des phyllosilicates. Le gonflement ne peut se produire que lorsque les cations compensateurs fournissent une liaison inter foliaire assez faible pour permettre aux molécules d'eau de pénétrer entre les feuillets (Faisandier, 1997).

Les travaux de Mamy (1968) ont montré que le gonflement des sols dépend de deux sources principales d'énergie :

- L'énergie d'attraction des molécules d'eau (EA) qui correspond à l'ensemble des interactions entre eau-cations, eau-feuillets;
- L'énergie de cohésion (EC) inter couche qui est fonction de la nature des cations de remplissage des espaces inter foliaires, de l'origine de la charge du feuillet et du mode d'empilement des feuillets.

Faisandier (1997), explique que plus la cohésion est forte, moins les molécules d'eau sont attirées et moins les couches sont hydratées. Inversement, lorsque la force d'attraction est plus élevée que celle de la cohésion interfeuillets ( $EA > EC$ ), les espaces inter foliaires sont facilement accessibles par les molécules, favorisant ainsi l'hydratation et le gonflement (Mamy, 1968).

L'énergie de l'ion OH (+1) étant plus petite que celle de l'ion OH (+3) du fait que la densité de charge de surface de l'ion OH (+1) est plus faible que celle de l'ion OH (+3), ce dernier sera capable d'attirer beaucoup plus de molécules d'eau par rapport à l'ion OH (+1) (Schmitz, 2018).

#### **2.4.5 Influence du gonflement et du retrait sur les propriétés physiques et mécaniques des phyllosilicates**

Le phénomène de gonflement et de retrait peut créer une désorganisation au sein de la structure des sols fins. Ce désordre qui se produit dans la structure provoque l'apparition des fissures de dessiccation; des déformations à la surface du sol (tassement); la perte de la portance qui se traduit par l'affaissement de certaines parties. Les phyllosilicates sont en général de propriété gonflante à saturation et se rétractent lorsque la teneur en eau est réduite. En effet, lorsqu'ils sont soumis à des contraintes environnementales, ils subissent des changements d'ordre hydrique et hydromécanique

(Tessier, 1978). Ce phénomène est attribué à la variation de la teneur en eau dans le sol sous l'effet des conditions climatiques naturelles. Les cycles de gel-dégel, les précipitations et les évaporations sont des facteurs qui alimentent le phénomène de gonflement et de retrait des phyllosilicates.

## **2.5 Influence des conditions climatiques sur les propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers filtrés contenant des phyllosilicates**

Le climat nordique très rigoureux peut être soumis à de basses températures variant entre  $-15^{\circ}\text{C}$  et  $-50^{\circ}\text{C}$  en période hivernale. Durant cette période, le sol gèle pendant plus de 4 mois à des profondeurs allant de 1,2 à 3 m. De fortes précipitations annuelles sont également associées à ce climat tempéré. Le phénomène du gel-dégel a pour conséquence la réduction du niveau opérationnel des infrastructures et de la capacité portante du sol (Roy et al., 1992).

Selon Mbonimpa et al. (2006), la perte d'eau favorise le phénomène de retrait volumique. Cette perte d'eau survient lorsque les résidus contenant les minéraux argileux (tels que les phyllosilicates) sont soumis à de fortes suctions ( $\psi$ ) et des contraintes effectives ( $\sigma'$ ) sous l'influence des cycles de gel dégel, précipitation, évaporation (mouillage-séchage). La diminution de la teneur en eau massique ( $w$ ) provoque l'augmentation de la succion dans le sol, causant ainsi la formation des fissures de dessiccation et des déformations (tassement) à la surface des résidus (Mbonimpa et al., 2006).

La stabilité des sols (résidus) dépend de leur susceptibilité au gel et qui est fonction de la granulométrie, de la minéralogie, de la conductivité hydraulique, de la température externe et de la quantité d'eau disponible. Le cycle de gel-dégel a un impact significatif sur les propriétés géotechniques et hydromécaniques des sols. Cet impact se traduit par plusieurs dommages associés aux déformations à l'affaiblissement progressif des sols (des résidus, des remblais) à l'augmentation de la teneur en eau et à la formation des lentilles de glace pendant le gel. Tous ces phénomènes favorisent la création des fissures et des pores dans les sols. Ces derniers contribuent à la perte progressive de la résistance au cisaillement (Ding et al., 2020; Hohmann-Porebska, 2002).

### **2.5.1 Influence des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique des sols**

Les cycles de gel-dégel créent des fissures et des joints dans le sol fin et causent de plus fortes détériorations à la surface (Eigenbrod, 1996; Létourneau, 2012). Ceci entraîne une augmentation de la conductivité hydraulique. L'augmentation de la conductivité hydraulique des sols argileux

est attribuée à la formation des réseaux de fissures verticales et à la réduction du volume des fines dans la fraction grossière (Chamberlain & Gow, 1979). Ces auteurs expliquent également que le changement de la phase eau-glace entraîne de grandes ouvertures des pores qui favorisent l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'eau dans les sols. Les expériences menées sur des sols cohésifs par Dalla Santa et al. (2019) ont montré que les cycles de gel-dégel peuvent provoquer une augmentation significative de la perméabilité verticale.

Benson et Othman (1993) ont observé une augmentation de la conductivité hydraulique de 1,5 à 2 ordres de grandeur dans les parties superficielles des échantillons d'argile compactée où l'effet du gel-dégel était plus prononcé (Benson & Othman, 1993). Les résultats des essais au perméamètre à paroi flexible conduits par Sterpi (2015), ont confirmé que les nombreuses fissures de dessiccation verticales induites par l'action du gel- dégel constituent les voies préférentielles d'écoulement de l'eau. Ces fissures sont la cause de l'augmentation de la conductivité hydraulique des sols. Le développement des fissurations et les changements de la conductivité hydraulique causés par le gel- dégel peuvent affecter l'intégrité des sols et compromettre la sécurité environnementale (Sterpi, 2015).

### **2.5.2 Influence des cycles de gel-dégel sur les propriétés mécaniques des sols**

Les cycles de gel-dégel affectent la stabilité des sols (Qi et al., 2006). Son effet sur la résistance des sols dépend particulièrement des variations de la teneur en eau sous l'action de la consolidation. L'effet du gel-dégel peut occasionner une augmentation significative de la teneur en eau dans les sols pendant le dégel, causer des dommages à la structure et affecter leur performance mécanique (Alkire & Jashimuddin, 1984; Bui et al., 2014; Traoré et al., 2021). Le changement de volume induit dans les sols est souvent accompagné par une perte de capacité portante durant le dégel (Padilla & Villeneuve, 1989). Les résultats d'une étude sur de l'argile soumise à des cycles de gel-dégel ont également confirmé la perte de volume de 30% en fonction de la teneur en eau, de la plasticité de l'argile et de l'intensité du gel (Eigenbrod, 1996). L'auteur a constaté une corrélation entre le changement de volume et l'indice des vides. Le développement des fissures dans les sols est dû aux vides créés par la fonte de neige au printemps (Bui et al., 2014). Ces fissures modifient leur structure et affaiblissent leurs propriétés mécaniques (Chamberlain & Gow, 1979; Qi et al., 2006; Sterpi, 2015). Toutefois, il est possible d'augmenter la performance et la durabilité de ces

sols à travers la technique d'amendement (solidification, stabilisation) (Bui et al., 2014; Mehenni, 2015).

## **2.6 Technique de Solidification/ Stabilisation des résidus miniers contenant des phyllosilicates**

La technique de solidification/stabilisation (S/S) est utilisée dans le traitement des sols fins (argileux, limoneux, marneux, etc.) qui ne répondent pas aux exigences de performance mécanique et environnementale (déchets potentiellement polluants et sols à faible capacité portante,) (Mehenni, 2015; Melboucl, 2017). La S/S est devenue une pratique courante en raison des réglementations environnementales qui deviennent de plus en plus exigeantes pour l'élimination des déchets dangereux (Paria & Yuet, 2006).

L'ajout d'un produit d'amendement aux déchets potentiellement polluants et aux sols à faible capacité portante, réduit la mobilité et le risque de lessivage des métaux lourds; limitant ainsi leur migration dans l'environnement. Il permet également de neutraliser la toxicité et créer une forme solide plus résistante à l'effet des contraintes climatiques (Benzaazoua, Marion, et al., 2004; Chen et al., 2019; Hadimi, 2014; Hadimi et al., 2016; Kumpiene et al., 2008; Lwin et al., 2018; Segui et al., 2023; Tyagi & Annachhatre, 2023).

Le liant hydraulique est principalement utilisé dans la solidification et la stabilisation des résidus miniers en raison de sa disponibilité, mais également à cause de la résistance élevée, de la faible perméabilité et de la meilleure durabilité qu'il procure aux sols stabilisés (Saeed et al., 2012). Parmi les liants hydrauliques, le ciment Portland ordinaire (OPC) est le plus largement utilisé en raison de sa disponibilité, sa rentabilité et ses multiples domaines d'application (Spence & Shi, 2004).

Il existe plusieurs types de ciment Portland qui sont désignés selon la norme CSA A3001-03 ou ASTM C 1157 :

- MS : (Moderate sulfate-resistant hydraulic cement) (ciment à résistance aux sulfates modérée)
- MH : Moderate heat of hydration hydraulic cement (Ciment à chaleur d'hydratation modérée)
- HE : High early-strength hydraulic cement (Ciment à haute résistance initiale)
- LH : Low heat of hydration hydraulic cement (Ciment à faible chaleur d'hydratation)

- HS : High sulfate-resistant hydraulic cement (Ciment à haute résistance aux sulfates)

### **2.6.1 Effet de la Solidification/ Stabilisation sur les propriétés des résidus contenant des phyllosilicates**

L'emploi du liant dans les sols fins permet de réduire leur teneur en eau, de les assécher le plus que possible, d'améliorer leurs propriétés géotechniques, hydrauliques et mécaniques (Deschamps et al., 2008; Hadimi et al., 2016; Melboucl, 2017; Saussaye, 2012). Il s'agit essentiellement de la portance; la perméabilité, la microstructure; la résistance mécanique; l'action du gel et la sensibilité à l'eau et la compressibilité.

Du fait de ses capacités (propriétés) de stabilisation, le liant hydraulique réduit considérablement l'influence de ces phénomènes sur les sols fins. En effet, l'utilisation du ciment permet d'agglomérer les fines des sols en particules plus grossières. Le liant neutralise les fines qui sont plus sensibles à l'eau, réduit leur surface spécifique, leur sensibilité au gonflement et à l'action du gel. Il fournit une cohésion, une résistance mécanique, une stabilité à l'eau et au gel (Deschamps et al., 2008; Melboucl, 2017).

### **2.6.2 Effet de la Solidification/Stabilisation sur la microstructure**

Le traitement à l'aide du liant hydraulique entraîne une modification et une évolution structurale et physico-chimique des sols. Cette évolution de la pâte de ciment se produit essentiellement pendant les jeunes âges à compter de la fin du gâchage en fonction de la température. Au cours de cette modification structurale, plusieurs réactions entrent en jeu et créent des forces d'attraction entre les particules de ciment. Néanmoins, l'hydratation continue et se poursuit pendant plusieurs années. Ce qui explique d'ailleurs le caractère évolutif de la porosité et sa redistribution porosimétrique dans la matrice cimentaire (Bentz et al., 2008; Lidstrom & Westerberg, 2003; Melboucl, 2017; Nachbaur, 1997; Saussaye, 2012). Ces produits d'hydratation permettent non seulement d'améliorer les forces de liaison cohésives entre les particules des résidus, mais favorisent également l'affinement de l'espace des pores et créent une microstructure plus dense du remblai (Belem et al., 2001; Boustingorry & Herisson, 2021; H. Jiang et al., 2022; Sari et al., 2022). Ce processus est fonction du temps de cure (> 28 jours), de la quantité du liant, du pourcentage solide et de la réduction du rapport eau/ciment.

Dans les études de Deschamps et al. (2008), les résultats de porosimétrie par instruction de mercure (PIM) ont montré que les couches amendées de 2% de ciment Portland présentait une faible porosité. Contribuant ainsi, au faible taux de percolation et au haut degré de saturation de la couche cimentée dans les colonnes de lixiviation. Il a observé également qu'après 28 jours de cure, les diamètres seuils étaient quasi identiques pour les échantillons contenant 0, 0,5, 1, et 1,5 % de liant avec une valeur de 4,1  $\mu\text{m}$  contre 2,8  $\mu\text{m}$  pour les échantillons qui contiennent 2 % de liant (Deschamps et al., 2008).

### **2.6.3 Effet de la Solidification/ Stabilisation sur les propriétés mécaniques (portance et la résistance mécanique)**

Les résultats des études de Melboucl (2017) ont montré que la portance des sols marneux traités avec 2% de ciment a été considérablement améliorée. L'auteur a constaté que l'indice de portance ( $I_{\text{CBR}}$ ) obtenu à travers les essais était de 4 à 10 fois plus élevé que celui d'un sol non traité. Il confirme que l'ajout de ciment dans les marnes a donné de meilleurs résultats de l'indice de portance dépassant la valeur minimale requise du CBR pour les couches de plateformes des autoroutes ( $I_{\text{CBR}} > 10$ ) (Melboucl, 2017), figure 2.26.

Dans la littérature, de nombreuses études ont mis en évidence le potentiel de la technique de solidification-stabilisation à base de ciment dans l'amélioration des propriétés mécaniques des sols. Il a été constaté que l'ajout du ciment à un sol, permet l'acquisition d'une meilleure résistance à la compression uniaxiale, à travers le phénomène de consolidation des liaisons cohésives de l'ensemble de la matrice cimentaire (Elghali et al., 2022; Khoshand et al., 2022; Wiles, 1987).

L'étude comparative de la structure des pores, du degré d'hydratation et de la résistance à la compression uniaxiale, a montré que la résistance à la compression dépend de la qualité de la structure poreuse des matériaux à base de ciment qui à son tour dépend de la nature et de la quantité des constituants formant cette structure (produits d'hydratation du ciment et produits de réaction avec les adjuvants) (Malviya & Chaudhary, 2006; Zivica, 1997). D'autres chercheurs ont également montré la relation entre la microstructure et la résistance à la compression uniaxiale (Behera et al., 2020; Belem et al., 2001; Boustingorry & Herisson, 2021; Jiang & Guan, 1999; Melboucl, 2017; Ouellet et al., 2007; Ouellet et al., 2006; Wang et al., 2021; Xu et al., 2018; Yilmaz, 2010).

Le traitement d'un sol au liant hydraulique mène à une augmentation de la résistance à la compression simple du sol. Néanmoins, le degré d'acquisition de cette résistance après traitement est fonction du temps de cure, du dosage et du type de liant utilisé (Le Borgne, 2010).

La durabilité des performances mécaniques d'un sol traité (S/S) est fortement liée à sa perméabilité (Le Runigo, 2008). La perte de performance mécanique due à la percolation de l'eau pourrait être fonction du temps de cure (De Bel et al., 2005; Le Borgne, 2010). Une faible perméabilité permet de pérenniser l'intégrité du matériau cimentaire. Cette intégrité dépend de la quantité du liant et des conditions de compactage (Le Runigo, 2008). Au cours des essais de mouillage-drainage, la teneur en eau volumique a augmenté dans les couches cimentées d'une valeur supérieure à 43% contre 28% à 33% dans celles non cimentées (Hadimi, 2014). Les travaux de Deschamps et al. (2009) ont également confirmé que l'ajout de 2% de ciment au résidu contribue à réduire le taux de percolation d'eau et de maintenir une teneur en eau volumique élevée en raison de la faible porosité. La réduction de la porosité des résidus miniers par l'effet du ciment leur confère une meilleure résistance à la compression uniaxiale (UCS) (Deschamps, 2009; Deschamps et al., 2009)

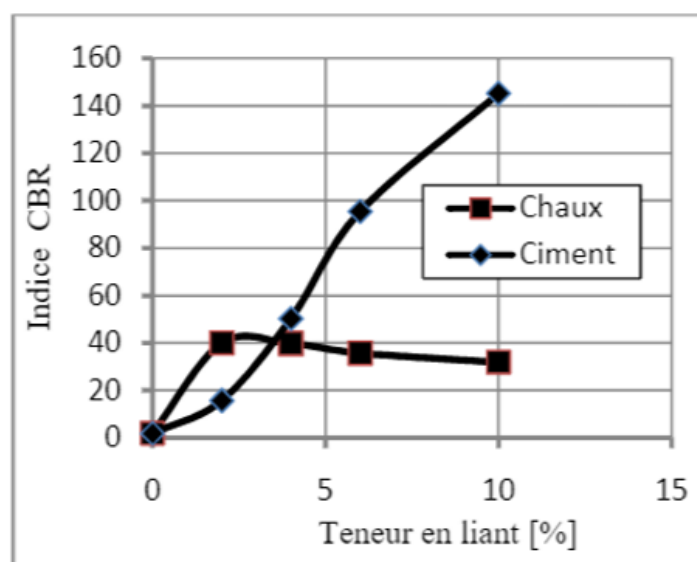


Figure 2.26 Évolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur des liants (ciment et chaux)(Melboucl, 2017).

#### 2.6.4 Effet de la Solidification/Stabilisation des sols sur l'action du gel-dégel

L'utilisation du ciment dans la technique de la solidification et la stabilisation des sols à faible résistance concourt à atténuer les dommages induits par les cycles de gel-dégel dans les régions

froides. Le ciment favorise l'obtention d'une meilleure résistance et durabilité des sols; ainsi que les infrastructures qui y sont construites contre l'action du gel-dégel (Jumassultan et al., 2021). La résistance à la compression uniaxiale est l'un des paramètres les plus utilisés pour évaluer la durabilité des sols stabilisés à la chaux et au ciment exposés aux cycles de gel-dégel. (Dempsey & Thompson, 1967; Shihata & Baghdadi, 2001; Xu et al., 2020).

Pour étudier l'effet du ciment sur les résidus miniers destinés à l'entreposage en surface et soumis à l'action du gel-dégel, Xu et al. (2020) ont utilisé des échantillons de résidus cimentés à des proportions de 10% à 25% du ciment Portland ordinaire (OPC). Ces échantillons ont été préparés à différents temps de durcissement et soumis au cycle de gel-dégel (5, 10, 15 et 20 cycles). Les résultats de cette expérience ont montré que l'apparition des fissures et la réduction de la résistance à la compression uniaxiale dues aux cycles de gel-dégel étaient fonction du temps de cure, de la quantité de liant et du nombre de cycles (Xu et al., 2020), figure 2.27.

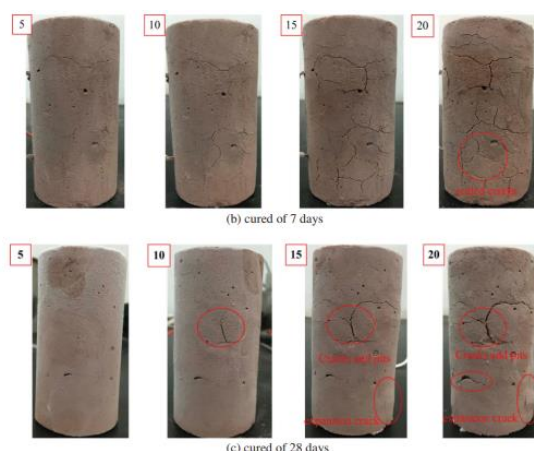


Figure 2.27 Photos des échantillons de différents temps de cure soumis au cycle de gel-dégel.

### **2.6.5 Effet de la composition minéralogique des résidus sur la Solidification / Stabilisation (résistance à la compression uniaxiale)**

La présence des minéraux argileux tels que les phyllosilicates (le talc, le chlorite ou la séricine, muscovite, etc.) dans les remblais peut avoir des effets pernicieux sur l'ouvrabilité, la maniabilité et sur l'acquisition de la résistance mécanique (Benzaazoua et al., 2010; Kornmann et al., 2005; Lagerblad et al., 2014; Ouffa, 2019; Tugrul et al., 2015). Cet effet non souhaité des phyllosilicates est attribué à la forte demande en eau supplémentaire pendant la préparation du mélange. Selon, Benzaazoua et al. (2003; 2010) et Horta (2011), plus le résidu est fin, plus sa demande en eau est



importante pour acquérir la consistance requise. La figure 2.28 illustre que, la résistance du remblai avec 0% de phyllosilicates (talc) est supérieure à celle du remblai contenant des proportions de talc. L'UCS varie en fonction de la teneur du talc (5 % à 25 %) (Benzaazoua et al., 2003; Benzaazoua et al., 2010; Horta, 2011).

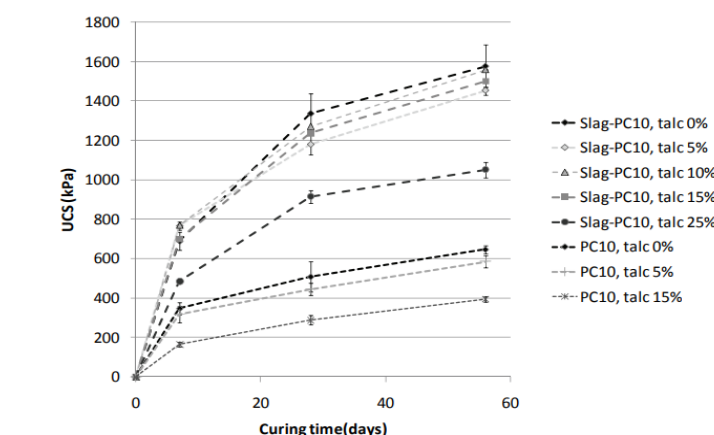


Figure 2.28 Valeurs moyennes de la UCS en fonction du temps de durcissement pour des échantillons de remblais simulés composés de diverses teneurs en talc (0, 5, 10, 15 et 25%) et de deux types de liant : PC type 10/50 50:50 et PC type 10/mélange de scories 20:80 (Benzaazoua et al., 2010).

La résistance mécanique des remblais peut diminuer entre 33 et 38% avec une teneur de talc située entre 5 % à 25 % (Benzaazoua et al., 2010; Ouffa, 2019; Tugrul et al., 2015).

La muscovite réduit la plasticité, favorise le feuilletage et entraîne un effet néfaste sur les propriétés de performance du remblai (Kornmann et al., 2005). Il a été rapporté que la présence de la muscovite d'une teneur de 3-15% dans les matériaux cimentaires provoque une baisse considérable de 39 à 75% de la résistance mécanique et de 81 à 93% de l'affaissement du cône d'Abrams (Cepuritis et al., 2014; Loorents et al., 2007; Miskovsky, 2004), figure 2.29.

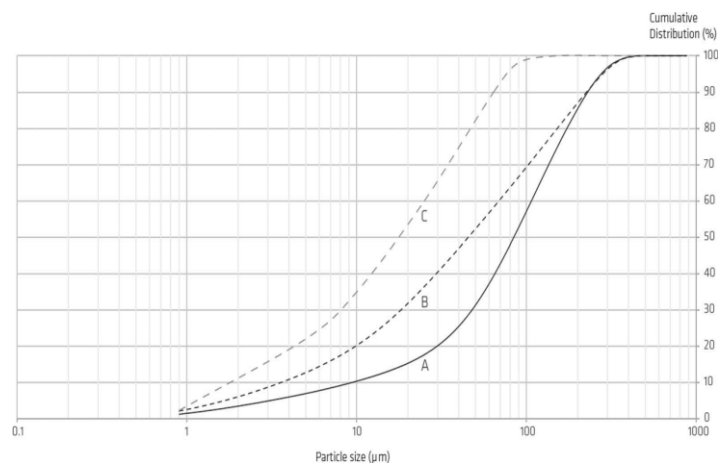


Figure 2.29 Distribution des particules des trois résidus miniers utilisés pour évaluer l'impact des phyllosilicates sur les propriétés rhéologiques du RMPC (Erismann & Hansson, 2021).

Said et al. (2009) ont évalué l'impact de la teneur en mica sur la sensibilité à l'eau des mélanges soumis à des cycles de gel-dégel et sur les mesures du module de rigidité avec des proportions de 4,8% de bitume et 4% de muscovite. Les résultats de cette étude ont montré que la présence de la muscovite dans les matériaux cimentaires (bitume), exerçait une influence négative sur la résistance à la sensibilité à l'eau et aux cycles de gel- dégel. Ceci s'est traduit par la diminution du module de rigidité après chaque cycle de gel-dégel en fonction de la teneur en mica (Said et al., 2009). Miskovsky (2004) a conclu que la dégradation de la performance mécanique des bitumes était probablement due au fait que les feuillets du mica ont la capacité de consommer le bitume et de créer des zones de faiblesses (Miskovsky, 2004). Kalonji (2016) a constaté que le mélange amendé de ciment à base des résidus de la mine Goldex était plus constante que celle de la mine Meliadine (Kalonji, 2016). L'auteur a supposé que cette différence serait probablement due à la présence de 14,6% de muscovite dans la composition minéralogique des résidus de Meliadine contre 0,4% pour ceux de Goldex. (Erismann & Hansson, 2021).

## 2.7 Conclusion

Nous pouvons constater que la présence des phyllosilicates (micas) a été évoquée comme problématique de plusieurs travaux de génie civil (Horta 2011. Lagerblad et al, 2014, Miskovsky, 2004). Pour démêler cette problématique, Horta (2011) rapporte que l'optimisation de la granulométrie et l'utilisation des superplastifiants pourraient permettre d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton contenant des micas. Une autre alternative envisagée est

d'éviter le maximum possible de micas dans la préparation des matériaux cimentaires en raison de leur structure feuilletée. Pour faciliter la maniabilité et procurer une bonne performance mécanique, les particules dans le mélange doivent être de forme cubique (Lagerblad et al., 2014). Cependant, cette alternative n'est applicable qu'à la fabrication des bétons qui offre une possibilité de choix des types de granulats à utiliser. Cette solution serait difficilement applicable au remblai préparé à base de résidus miniers qui constituent un tout-venant de l'usine de traitement (concentrateur). Cependant, il serait possible d'exploiter l'option du choix du type de liant, du dosage, de la température de cure et du temps de cure dans la fabrication du remblai minier.

Pour démontrer l'importance du choix du type de liant en fonction du matériau à traiter, Chopier (2007) a expérimenté le traitement de trois matériaux (micaschistes sericiteux) avec trois différents types de liant hydraulique à 7% de proposition (Chopier, 2007). Il ressort de cette expérience que seul le liant hydraulique routier à base de clinker a donné un résultat satisfaisant (sur les trois liants utilisés) pour le traitement du micaschiste. Benzaazoua et al.(2010) ont également constaté que dans un remblai, le ciment de type (GU-Slag) était plus performant que celui de type PC à proportion égale (5% de ciment; 5% et 15 % de talc) (Benzaazoua et al., 2010). C'est pourquoi Shi et Spence (2004) ont déclaré que l'emploi d'un liant dans la technique de solidification et de stabilisation doit tenir compte :

- De la compatibilité entre le liant (ciment) et les déchets (sols, résidus);
- De la fixation chimique et l'encapsulation physique des déchets et sols contaminés;
- De la durabilité des déchets ou du sol traité de la lixiviation des contaminants des déchets ou du sol traités; Et en fin de la rentabilité de la technique (Shi & Spence, 2004).

Dans le cadre de la présente étude expérimentale portant sur des résidus miniers contenant des proportions importantes de phyllosilicates (muscovite) dans les régions froides, le choix du type de liant est porté sur le ciment HE (High early-strength hydraulic cement. Ce type de ciment offre une prise rapide et une haute résistance initiale en raison de sa finesse et de sa grande surface spécifique ( $S_m = 5480 \text{ cm}^2 / \text{g}$ ) avec 0.0014 cm de diamètre moyen des particules (Belem, 2022). Le ciment HE confère une meilleure résistance à la compression uniaxiale dans les conditions de basse température de durcissement (Mbonimpa et al., 2019).

Ce tour d'horizon montre que la technique de solidification/stabilisation à base de liant hydraulique est largement connue et utilisée avec succès dans plusieurs domaines de l'ingénierie. Cependant, à

notre connaissance, aucune étude n'a encore appliqué cette technique aux résidus miniers contenant des phyllosilicates (muscovite) et évaluer leur comportement hydrogéochimique. En plus, son application aux résidus miniers reste toujours un défi majeur à cause des impacts négatifs que pourrait avoir la muscovite sur le développement de la résistance à la compression uniaxiale. C'est en cela que découle la nécessité d'un projet de recherche expérimentale.

## **2.8 Besoin de recherche**

Afin de disposer d'un système de gestion responsable et sécuritaire de l'environnement minier, les résidus miniers sont asséchés pour produire des résidus filtrés capables de résister à l'effet des sollicitations physiques, hydriques et chimiques (Cao et al., 2021; Demers & Pabst, 2021; Jewell, 2010; E. I. Robinsky, 1999; Vargas & Pulido, 2022). Cependant, les intempéries dues aux cycles répétés de gel-dégel et de mouillage-séchage affectent considérablement l'intégrité physique et chimique de ces résidus lorsqu'ils sont composés de certains minéraux argileux tels que les phyllosilicates (muscovite). Dans ce cas, la question d'amendement avec de faibles quantités de liant devient une nécessité afin d'obtenir des opérations minières plus efficaces, sécuritaires et durables. Ainsi, le besoin de recherche consiste à améliorer les propriétés physiques et hydrogéochimiques des résidus miniers contenant des phyllosilicates (la muscovite) destinés à l'entreposage en surface à l'aide de la technique de Solidification-Stabilisation par l'ajout de faibles quantités de ciment HE. C'est dans cette perspective que ce projet d'étude tire sa particularité et son originalité.

## **CHAPITRE 3 APPROCHE METHODOLOGIQUE**

Ce chapitre présente dans un premier temps les matériaux utilisés pour la réalisation de cette étude. Ensuite, l'approche méthodologique adoptée pour le traitement et la caractérisation des propriétés physiques de la muscovite. Enfin, les différentes méthodes utilisées pour la caractérisation des propriétés mécaniques, minéralogiques, hydriques et géochimiques des échantillons solides et liquides (eaux de lixiviation) des différents mélanges préparés seront présentées.

### **3.1 Matériaux utilisés et sites d'échantillonnage**

Les résidus miniers filtrés, le ciment Portland HE et la muscovite ont été les trois matériaux utilisés dans la réalisation de cette étude expérimentale.

Les résidus miniers ont été échantillonnés sur le site de la mine Meliadine et transportés au laboratoire de l'URSTM de l'UQAT dans des barils de 200 kg. Ces résidus ont été homogénéisés et placés dans des chaudières de 20 kg afin de les utiliser dans la préparation des différents types de mélanges utilisés au cours des essais expérimentaux.

La mine Meliadine est une mine d'Or, située au Grand Nord dans la région de Kivalliq, au Nunavut près de la rive ouest de la Baie d'Hudson à environ 25 kilomètres au Nord du hameau de Rankin Inlet et à 290 kilomètres au sud-est de la mine Meadowbank. La mine Meliadine est très éloignée et opère dans des conditions climatiques extrêmement froides. Winnipeg (au Manitoba) est la plus grande ville canadienne la plus grande proche du site minier qui est située à environ 1500 kilomètres au sud de la mine Meliadine (figure 3.1).

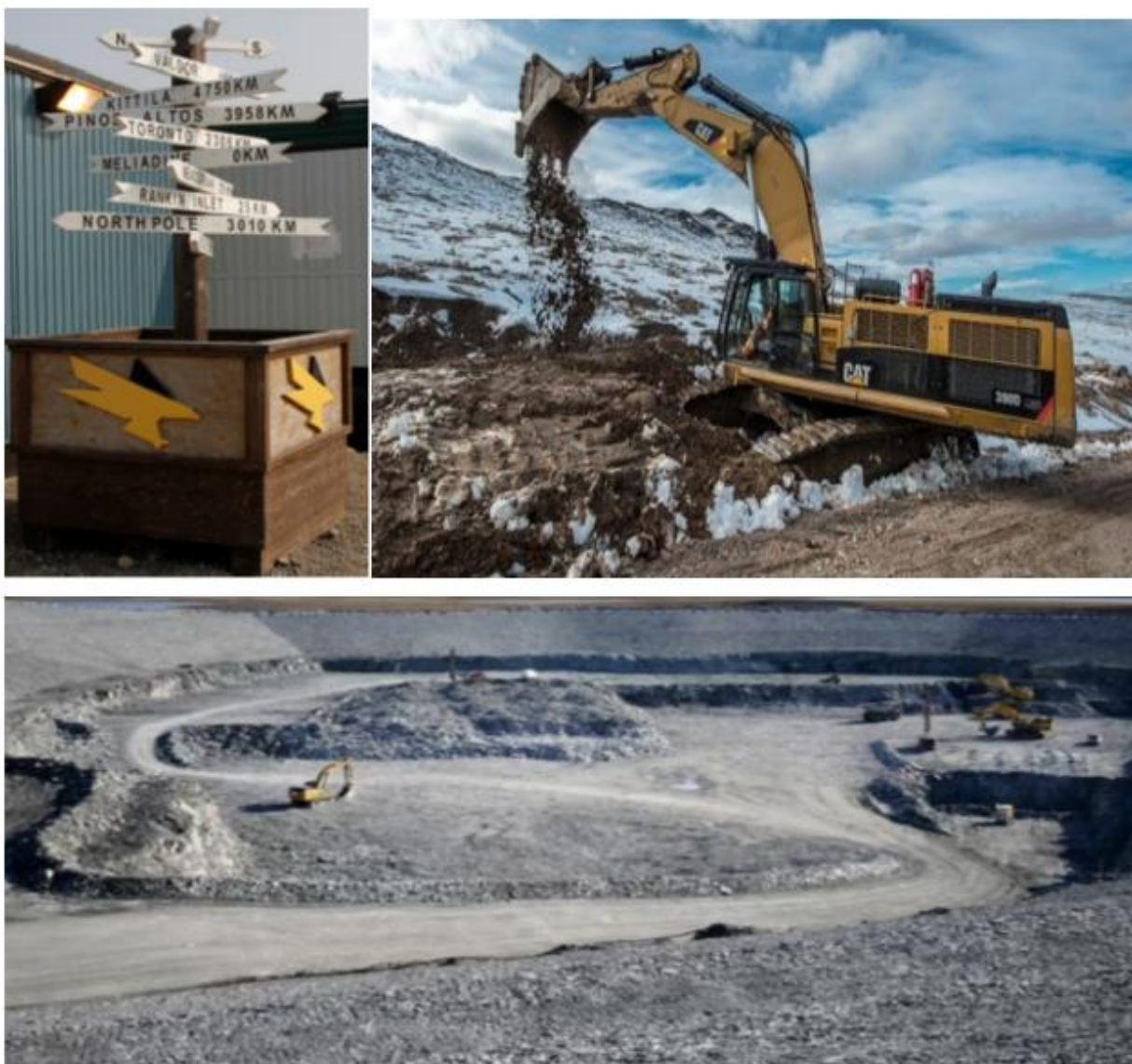


Figure 3.1 Photo de la mine de Meliadine dans les conditions de gel (tirée sur le site de la mine - Source: radio Canada et 201203-11MN034-NIRB 2019-20 Meliadine Monitoring Report-OT3F)

La muscovite utilisée pour l'amendement des résidus miniers a été échantillonnée sur le site Aldous à Preissac au niveau de l'affleurement des unités monzogranites composées essentiellement de muscovite et de grenats (Tremblay, 1950; Dawson, 1966). Le site de Preissac est situé à environ 70 km de Rouyn-Noranda et environ 40 km de Val d'Or au Nord-Est (figure 3.2).

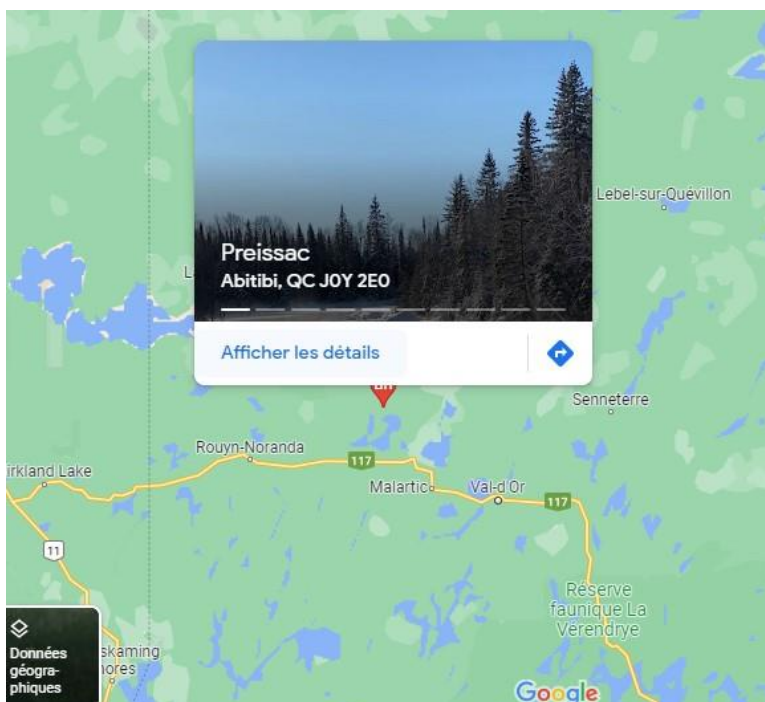


Figure 3.2 Localisation du site d'échantillonnage de la muscovite) tiré de Google Maps

## 3.2 Approche méthodologique

### 3.2.1 Protocole de traitement et caractérisation de la muscovite

La muscovite échantillonnée dans un état naturel contenait quelques impuretés telles du grenat), de la terre noire, des débris de bois ...etc. Elle a fait l'objet d'un traitement méthodique qui consistait à (voir figure 3.3) :

1. Lavage des minéraux et leur séparation mécanique (triage)
2. Séchage à l'étuve à 60°C pendant 48 heures;
3. Broyage et pulvérisation à l'aide du pulvérisateur planétaire à boulets (Planetary Ball Mill Fritsch);
4. Tamisage à l'aide de tamis de différentes mailles afin d'obtenir des particules de plus petites tailles;
5. Vérification de la teneur en muscovite à partir de l'analyse minéralogique par DRX;
6. Contrôle de la granulométrie au granulomètre à Laser;
7. Détermination de la densité relative des grains (Gs);
8. Conservation de la poudre de muscovite dans un dessiccateur.

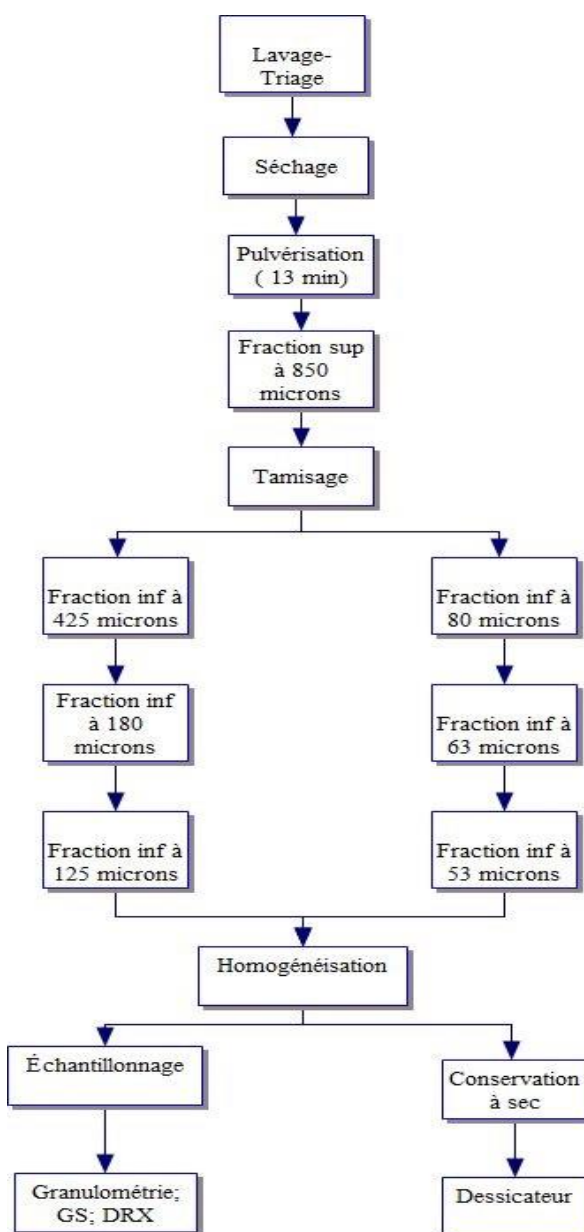


Figure 3.3 Schéma du protocole de traitement de la muscovite

Le lavage de la muscovite a été effectué avec de l'eau de robinet à forte pression dans un tamis de grande maille afin de la débarrasser de toutes sources de contamination capables de passer au travers du tamis. Le triage a consisté à enlever manuellement toute autre impureté de grande dimension qui n'a pas pu être évacuée au travers du tamis lors du lavage. Une fois lavée et triée, la muscovite a été séchée dans une étuve de 60°C pendant 48 heures afin de faciliter la pulvérisation. La vérification du séchage total se faisait en mesurant plusieurs fois la masse sèche après les 48 heures de séchage.



La pulvérisation a été réalisée dans le pulvérisateur planétaire à boulets de quatre bols. La quantité de muscovite à pulvériser est alors placée dans chaque bol de sorte que tous les boulets soient totalement couverts et la pulvérisation a duré 13 minutes. Ce temps de pulvérisation a permis d'obtenir une fraction inférieure ou égale à 850 microns. Un tamisage à l'aide de six tamis de différentes mailles a été réalisé après la phase de pulvérisation pour obtenir une granulométrie plus fine pouvant correspondre à celle des résidus de la mine Méliadine.

Afin de s'assurer de la qualité de la muscovite utilisée dans les mélanges de cette étude, une analyse par diffraction des Rayons X a été réalisée pour la détermination de sa composition minéralogique (teneur). Les résultats de cette analyse ont montré que les minéraux sont à 100 % de la muscovite pure et le faible pourcentage du corindon provient des billes utilisées pour la micronisation au cours de l'analyse (figure 3. 4).

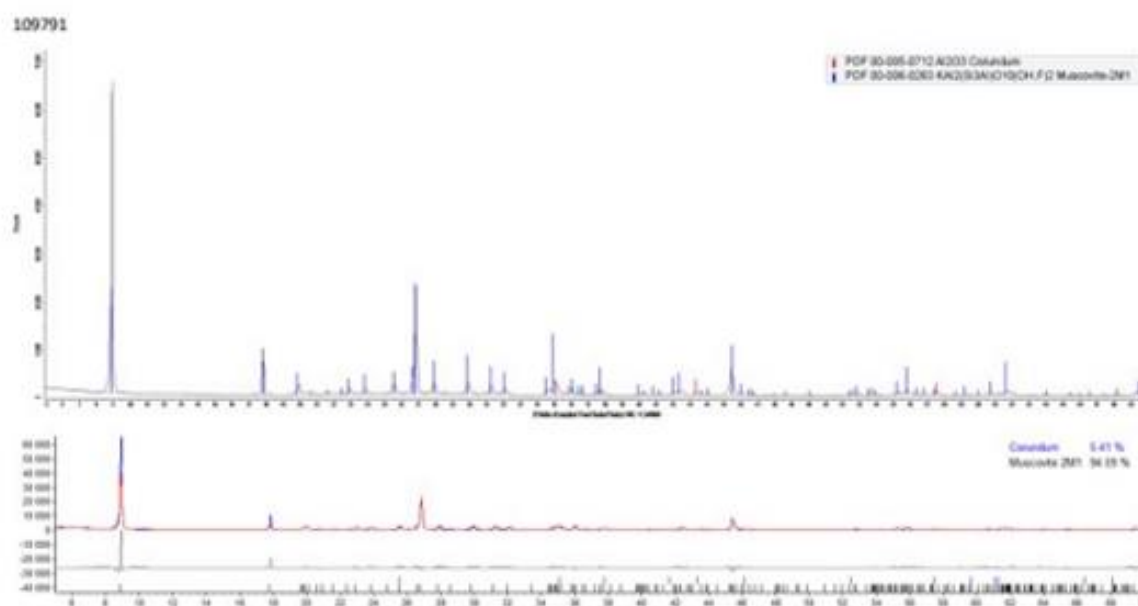


Figure 3.4 Analyse minéralogique quantitative de la muscovite par DRX

Une partie de la muscovite a été prélevée pour déterminer la densité relative des grains et la courbe granulométrique au Laser. Il est à noter qu'il n'a pas été facile de déterminer une granulométrie de petites particules au granulomètre à Laser, parce que le granulomètre à Laser considère les petits feuillets comme de grosses particules. L'autre partie de la muscovite en poudre environ huit kilogrammes (8 kg) a été conservée dans un dessiccateur pour le dopage des résidus miniers.

### 3.2.2 Démarche expérimentale

L'approche expérimentale a été utilisée pour la réalisation des travaux de ce projet de recherche. Cette approche couvre trois grandes étapes d'essais au laboratoire (figure 3.5). En premier lieu, les résidus miniers filtrés échantillonnés à la mine Meliadine ont été caractérisés afin de déterminer leurs propriétés physiques (densité relative, distribution granulométrique, surface spécifique des grains) et leur composition minéralogique par DRX (combinaison de la diffraction des rayons X). Ensuite, ces résidus ont été utilisés pour la préparation des mélanges destinés aux différentes caractérisations de laboratoire.

Trois types de caractérisations ont été réalisés sur ces différents mélanges avec amendement cimentaire et sans amendement cimentaire (témoins).

- 1) Caractérisation mécanique des résidus filtrés et des mélanges de résidus miniers avec amendement cimentaire pour la détermination de la résistance à la compression uniaxiale (UCS). Cet essai a pour objectif d'évaluer l'effet de l'amendement cimentaire sur les résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés.
- 2) Évaluation des propriétés hydriques des résidus miniers filtrés et des mélanges de résidus avec amendement cimentaire (perméabilité, courbes de rétention d'eau), incluant l'évaluation de l'effet des cycles de gel-dégel sur l'évolution de la conductivité hydraulique. Au total, douze cycles de gel-dégel ont été réalisés sur les résidus densifiés, solidifiés et stabilisés pour simuler l'entreposage des résidus miniers en surface.
- 3) Évaluation du comportement hydrogéochimique et environnemental des résidus solidifiés et stabilisés à base de ciment Portland HE. Cette évaluation a été réalisée à l'aide de colonnes expérimentales qui ont été soumises à des cycles de mouillage et drainage. L'analyse physico-chimique a été réalisée pour évaluer la qualité des eaux de lixiviation et statuer sur d'éventuelle mobilité des éléments chimiques (métaux lourds et métalloïdes). Ces analyses ont été réalisées à l'aide de l'ICP-AES (Spectroscopie d'émission atomique à plasma couplé par induction) et la C.I (Chromatographie).

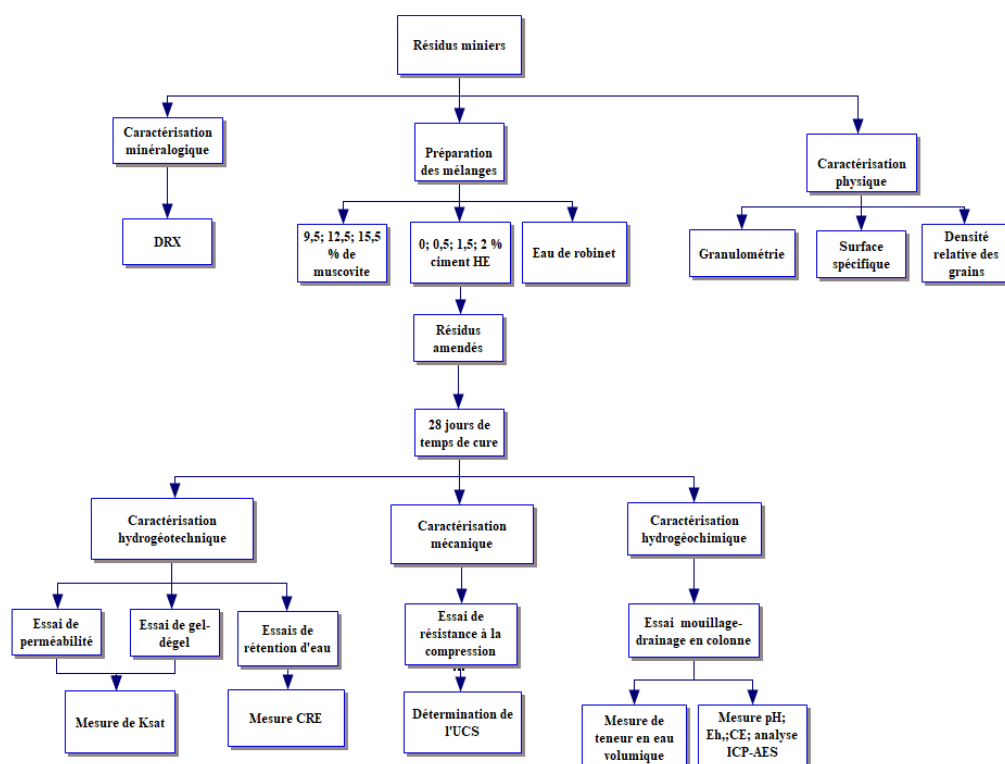


Figure 3.5 Schéma de l'approche méthodologique

### 3.2.3 Caractérisation des propriétés physiques des résidus miniers

La caractérisation physique des résidus miniers a été réalisée au laboratoire mécanique de l'URSTM de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (IREME-UQAT) à Rouyn-Noranda. Tous les essais ont été réalisés suivant les normes ASTM. Les propriétés physiques déterminées au laboratoire sont décrites dans cette section, incluant la distribution granulométrique, la densité relative des grains solides et la surface spécifique des grains.

#### 3.2.3.1 Analyse de la distribution granulométrique

La connaissance de la distribution granulométrique est d'une importante capitale dans l'évaluation du comportement hydrogéochimique et mécanique des résidus miniers. Car, elle a une influence directe sur les propriétés hydriques et physiques des matériaux. Un matériau contenant plus de particules fines, possède une plus grande capacité de rétention d'eau et une faible perméabilité. Il est également démontré que le comportement mécanique d'un sol (résistance au cisaillement) dépend de la répartition des grains (fraction fine). Plus le pourcentage de la fraction fine d'un sol est faible, plus la résistance au cisaillement est élevée (Reiffsteck et al, 2006).

Les principaux paramètres granulométriques ont été déterminés au laboratoire à l'aide du granulomètre à diffraction Laser Mastersizer de Malvern (figure 3.6). Ces paramètres sont présentés dans le tableau 3.1, ainsi que la courbe granulométrique à la figure 3.7.

La détermination de la granulométrie au laser consiste à mesurer la taille des particules à partir de la diffraction Laser en utilisant une petite quantité d'échantillons. Dans ce cas, l'intensité de la lumière diffusée pendant le passage d'un faisceau Laser à travers un échantillon de particules est mesurée. Ensuite, les données générées sont utilisées pour calculer la taille des particules qui ont créé l'image de diffraction. Le diffractomètre Laser permet d'obtenir une distribution des particules de diamètres situés entre 0,05 à 880  $\mu\text{m}$ . Environ 46% des particules des résidus de la mine Méliadine ont un diamètre inférieur à 20  $\mu\text{m}$ .

Le tableau 3.1 montre que le  $D_{10}$  est compris entre 2,8 et 3,8  $\mu\text{m}$ ,  $D_{30}$  entre 6,3 et 11,7  $\mu\text{m}$ ,  $D_{50}$  entre 11,9 et 22,5  $\mu\text{m}$ ,  $D_{60}$  entre 15,7 et 30,3  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  est compris entre 39,7 et 109  $\mu\text{m}$ . Cu est compris entre 5,5 et 7,9; Cc est compris entre 0,91 et 1,2 respectivement pour la muscovite et les résidus de la mine Meliadine. Il est important de noter que l'ajout de ciment et l'augmentation de la teneur en muscovite conduisent à une réduction de  $D_{10}$  et  $D_{60}$ . Les paramètres granulométriques sont typiques des résidus de roches dures (Aubertin et al., 2002; Bussière et al., 2007). Enfin, les résidus de la mine Méliadine sont classés comme des silts à faible plasticité selon le système USC, avec une granulométrie bien calibrée ( $6 < Cu$ ).



Figure 3.6 Granulomètre à diffraction Laser Mastersizer de Malvern

Tableau 3.1 Paramètres granulométriques des résidus de la mine Meliadine et de la muscovite

Matériaux	Paramètres						
	$\mu\text{m}$					Cu	Cc
	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>90</sub>		
Résidus	3,8	11,7	22,5	30,3	109	7,9	1,2
Muscovite	2,8	6,3	11,9	15,7	39,7	5,5	0,9

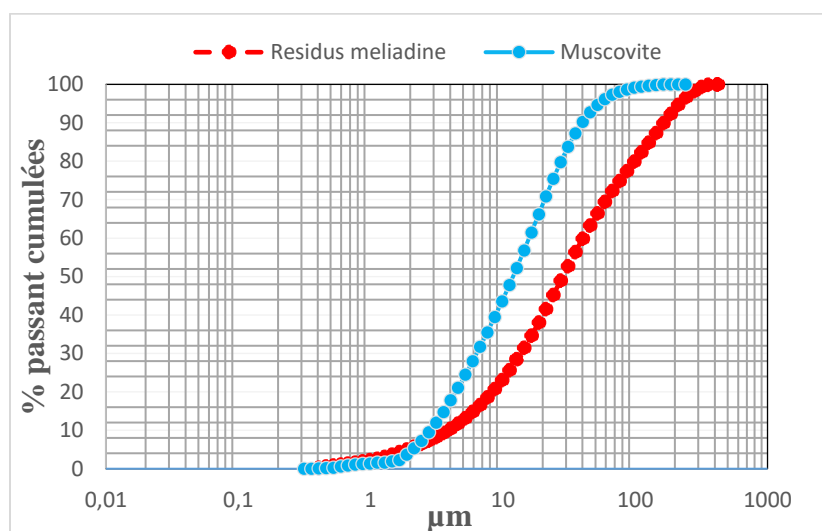


Figure 3.7 Courbe granulométrique des résidus de la mine Meliadine et de la muscovite

### 3.2.3.2 Surface spécifique des grains (S)

La surface spécifique des grains se définit comme étant la surface totale par unité de masse. Sa connaissance et sa détermination sont d'une grande importance dans la caractérisation d'un matériau. Car la vitesse de réactivité est fonction de l'état de division du matériau. Elle est déterminée par la méthode d'absorption de gaz à basse température. Cette technique permet de mesurer la surface spécifique sans modification de la texture géométrique de l'échantillon et de déterminer la totalité de la surface des particules. Le principe d'absorption fonctionne grâce à de faibles forces (Forces de Van der Waals) qui se produisent à la surface de la poudre. Ces forces agissent vers l'extérieur des molécules de gaz qui entourent l'échantillon. La surface spécifique est

alors obtenue à partir de l'équation d'absorption physique d'un gaz sur un solide ou équation de Bet (Brunauer et al., 1938) en déterminant le volume absorbé en monocouche ( $v_m$ ). Lorsque le volume est connu, la surface spécifique peut être calculée par la formule suivante:

$$S_t = n_m * s_m \quad (3.1)$$

Où

$S_t$  = surface totale de l'échantillon;

$n_m$  = nombre de molécules de gaz

$s_m$  = surface d'une molécule de gaz (généralement connue).

### 3.2.3.3 Densité relative des grains ( $G_s$ )

Le pycnomètre à hélium a été utilisé pour la détermination de la densité relative des grains (figure 3.8). Cet appareil est composé d'une bouteille d'hélium et permet de déterminer avec précision le volume d'un échantillon solide de masse connue. L'objectif est de mesurer à température contrôlée la masse volumique de l'échantillon. Pour cela, on injecte le gaz à hélium à une pression donnée dans un petit gobelet en aluminium. Par la suite, délasser la pression à l'intérieur du gobelet de mesure contenant l'échantillon et puis mesurer la nouvelle pression du gaz dans le gobelet. Ainsi, la masse volumique psychométrique peut être calculée à partir du volume réel occupé par l'échantillon. Cette méthode sert à mesurer le volume du gaz déplacé par une masse connue (au minimum 1,5 g de poudre environ) et permet de déterminer la densité réelle du matériau. Les résultats d'analyse du pycnomètre ont montré que la densité relative des grains ( $G_s$ ) des résidus de la mine Meliadine est de 2,92 g/cm<sup>3</sup>.

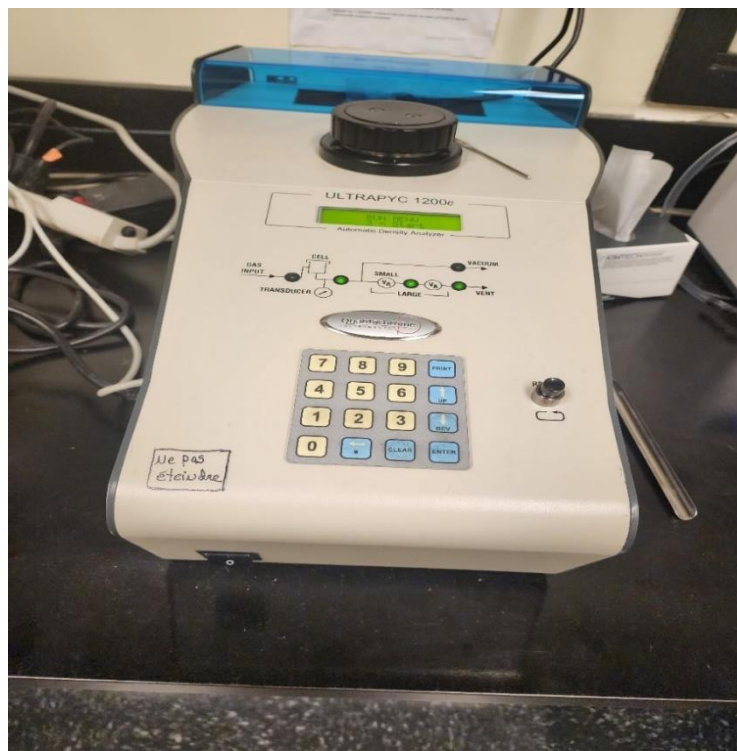


Figure 3.8 Pycnomètre à hélium pour la détermination de la densité relative des grains

### 3.2.3.4 Diffraction des Rayons X (DRX)

Dans le but d'obtenir la teneur initiale de la muscovite et les phases minérales des résidus de la mine Meliadine pour des fins de dopage, un échantillon de poudre a été soumis à l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) au laboratoire métallurgique d'activation (ACtLabs). Les résultats de DRX montrent que le quartz est le minéral le plus abondant (42,7%), suivi de la chlorite (21,2 %), ensuite l'albite (15,5%), la muscovite (9,5%), la dolomite (8,4 %) et enfin la magnétite (1,9 %).

### 3.2.4 Préparation et mise en place des mélanges

Au cours de cette étude, une variété de recettes de dix mélanges de résidus et du ciment a été utilisée, pour simuler deux configurations d'entreposage des résidus miniers en surface dans dix colonnes (figure 3.9). Les mélanges ont été préparés avec trois teneurs en muscovite : 9,5; 12,5 et 15,5% (voir tableau 3.2). Pour chaque niveau de teneur en muscovite, trois proportions de ciment Portland HE (0,0; 0,5, et 2% massique) ont été ajoutées pour le premier scénario d'entreposage. Ensuite une autre proportion de ciment (1,5% HE) a été ajoutée à la teneur de 12,5 % de muscovite afin de tester la deuxième configuration.

Tableau 3.2 Différents types de dopage et amendement cimentaire

<b>Teneurs en muscovite (%)</b>	<b>Proportions en ciment portland HE (%)</b>	<b>Désignation</b>
9,5	0,0	Mel#1
	0,5	Mel#2
	2	Mel#3
12,5	0,0	Mel#4
	0,5	Mel#5
	1,5	Mel#6
	2	Mel#7
15,5	0,0	Mel#8
	0,5	Mel#9
	2	Mel#10

Dans la première configuration, les couches de résidus densifiés d’une épaisseur de 30 cm (non amendées ou amendées de ciment Portland HE avec différentes teneurs de muscovite) ont été déposées en trois couches de 10 cm dans neuf (9) colonnes de 40 cm de hauteur et 15 cm de diamètre. Dans la deuxième configuration, les mélanges de résidus ont été déposés en quatre (4) couches successives de 10 cm d’épaisseur en alternant les couches non cimentées (CNC) et les couches cimentées (CC). Cette configuration a été simulée dans une colonne de 50 cm de hauteur et de 15 cm de diamètre. Un intervalle de soixante-douze heures (72 h) séparait le dépôt de chaque couche afin de permettre aux couches sous-jacentes de se drainer et de se consolider. Cette deuxième configuration a pour objectif de simuler un scénario de continuité d’entreposage des résidus miniers dans un parc préexistant. La porosité visée de mise en place des mélanges correspond à environ 0,36 et celle calculée est de 0,37.

Tous les mélanges ont été préparés à une seule consistance comprise entre 2,30 et 3.5 pouces (7 et 9 cm) et à un seul pourcentage solide  $C_w$  égal à 83,5% solides. Les mélanges ont ensuite été soumis à un seul temps de cure de 28 jours à une température contrôlée de 18°C dans une chambre humide avant le début des essais.



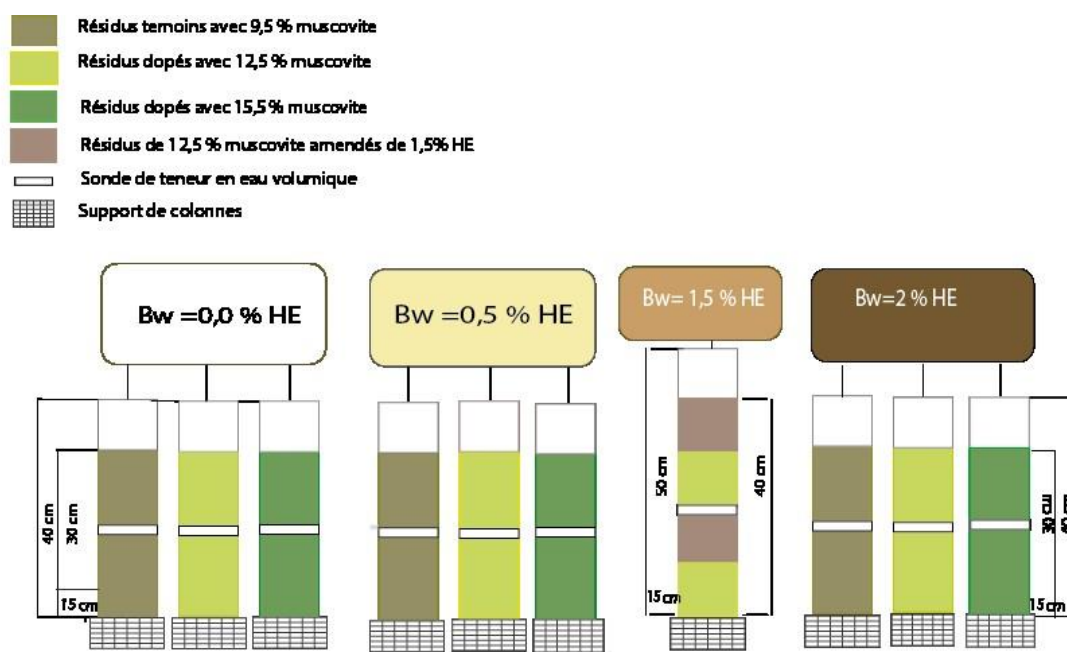


Figure 3.9 Configuration des colonnes expérimentales

Les différentes recettes de mélanges d'amendements ont fait l'objet de caractérisations physique, hydrogéochimique, géotechnique et mécanique.

### 3.2.5 Caractérisation physique des mélanges

Les principaux paramètres granulométriques et la densité relative des grains des différents mélanges (amendés et non amendés) sont présentés dans le tableau 3.3 et les courbes granulométriques à la figure 3.10.

Ce tableau montre que le  $D_{10}$  est compris entre  $3,8 \mu\text{m}$ ,  $3,7 \mu\text{m}$ ,  $3,6 \mu\text{m}$ ,  $3,6 \mu\text{m}$ ,  $3,6 \mu\text{m}$ ,  $3,7 \mu\text{m}$ ,  $3,1 \mu\text{m}$ ,  $3,0$ ,  $3,0$  et  $2,9 \mu\text{m}$ ,  $D_{30}$  est compris entre  $11,7 \mu\text{m}$ ,  $11,6 \mu\text{m}$ ,  $11,2 \mu\text{m}$ ,  $11,0 \mu\text{m}$ ,  $11,0 \mu\text{m}$ ,  $11,3 \mu\text{m}$ ,  $11,8 \mu\text{m}$ ,  $10,8 \mu\text{m}$ ,  $9,2 \mu\text{m}$ ,  $8,9 \mu\text{m}$  et  $8,7 \mu\text{m}$ ,  $D_{60}$  est compris entre  $30,3 \mu\text{m}$ ,  $30,1 \mu\text{m}$ ,  $29,6 \mu\text{m}$ ,  $29,7 \mu\text{m}$ ,  $29,4 \mu\text{m}$ ,  $30,1 \mu\text{m}$ ,  $29,2 \mu\text{m}$ ,  $22,2 \mu\text{m}$ ,  $20,7$  et  $20,4 \mu\text{m}$ ,  $C_u$  est compris entre  $7,7$ ,  $7,9$ ,  $8,0$ ,  $8,3$ ,  $9,7$ ,  $8,2$ ,  $9,3$ ,  $7,3$ ,  $6$ ,  $8$  et  $6,9$  et  $C_c$  est compris entre  $1,2$ ,  $1,2$ ,  $1,2$ ,  $1,2$ ,  $1,1$ ,  $1,2$ ,  $1,3$ ,  $1,2$ ,  $1,3$  et  $1,2$  respectivement pour les mélanges Mel#1 à Mel#10. Nous pouvons constater que les valeurs des paramètres granulométriques des mélanges sont quasi similaires aux paramètres des résidus. Ils peuvent donc être classés comme des silts à faible plasticité selon le système USC (Système de Classification uniformisé des Sols).

Tableau 3.3 Principaux paramètres granulométriques des mélanges

Mélanges			Paramètres			
			μm			
Muscovite %	Ciment %	HE	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Cu
9,5	0		3,8	11,7	30,3	7,9
	0,5		3,7	11,6	30,1	7,9
	2		3,6	11,2	29,6	8,0
12,5	0		3,6	11,0	29,7	8,3
	0,5		3,6	11,0	29,4	9,7
	1,5		3,7	11,3	30,1	8,2
	2		3,1	10,8	29,2	9,3
15,5	0		3,0	9,2	22,2	7,3
	0,5		3,0	8,9	20,7	6,8
	2		2,9	8,7	20,4	6,9

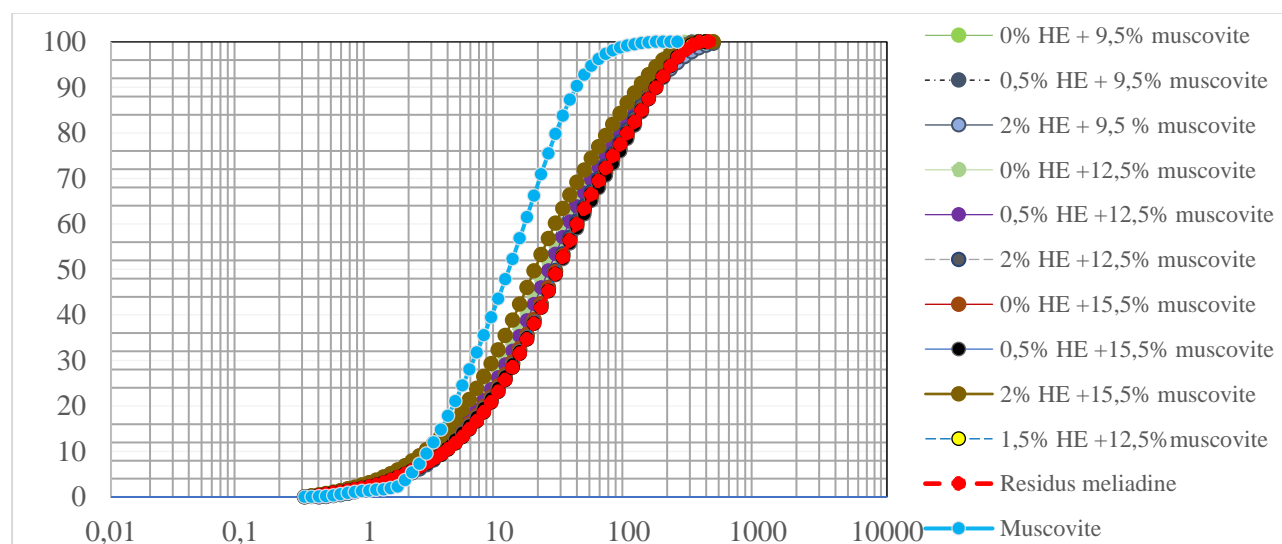


Figure 3.10 Courbe granulométrique des différents mélanges et de la muscovite

### 3.3 Caractérisation mécanique des mélanges

Dans le but d'évaluer l'effet du ciment et l'impact de la teneur en muscovite sur les propriétés mécaniques des mélanges de résidus miniers amendés avec le ciment Portland HE (« High Early

Strength »), des essais de résistance à la compression uniaxiale ont été effectués au laboratoire. L'homogénéisation de ces mélanges a été effectuée à l'aide d'un malaxeur Hobart, (figure 3.11a) pour une durée de 7 minutes. La caractérisation a été réalisée après 28 jours de temps de cure à une température constante de 18°C. Le choix de cette température était basé sur les conditions de l'usine de traitement de la mine Meliadine afin de mieux simuler les conditions réelles de terrain.

L'essai de résistance à la compression a été utilisée par plusieurs études pour évaluer l'intégrité physique des matériaux solidités à base de ciment (Belem et al., 2003; Hamberg, 2015; Termkhajornkit, 2012). Ainsi, la résistance à la compression d'un matériau peut être définie comme la force de compression uniaxiale maximale atteinte à la rupture de ce matériau. La rupture se produit lorsque le matériau soumis à la compression est fragile et se déforme lorsqu'il est ductile.

Le principe de l'essai de compression uniaxiale, également appelé compression simple, consiste à comprimer un échantillon d'un matériau (roche, béton ou remblai) de forme cylindrique entreposé entre deux plateaux parallèles d'une presse mécanique afin de mesurer la résistance à la compression de ce matériau (Belem et al., 2003; Hamberg, 2015; Termkhajornkit, 2012).

Au cours de l'essai de compression, l'échantillon se raccourcit sous l'effet de la compression et s'élargit à la suite de la propagation des fissures induites par la déformation plastique à laquelle l'échantillon est soumis. Dans ce cas, l'échantillon peut être fissuré ou séparé en des morceaux de deux ou plusieurs, (figure 3.11b).

Dans le cas de notre étude, dix moules de 15,62 cm de hauteur et de 7,24 cm de diamètre ont été utilisés. Ces moules ont été remplis par des mélanges. Ensuite, les différents mélanges ont été soumis à un essai de compression uniaxiale après 28 jours de cure.

Afin d'évaluer l'effet du ciment sur les résidus miniers, une certaine quantité d'eau a été ajoutée aux résidus (amendés et non amendés) pour former des pâtes de résidus. Cette quantité d'eau ( $w$ ) a été déterminée selon la formule :

$$w = \frac{1}{C_w} - 1 \quad (3.2)$$

$C_w$  est le pourcentage solide

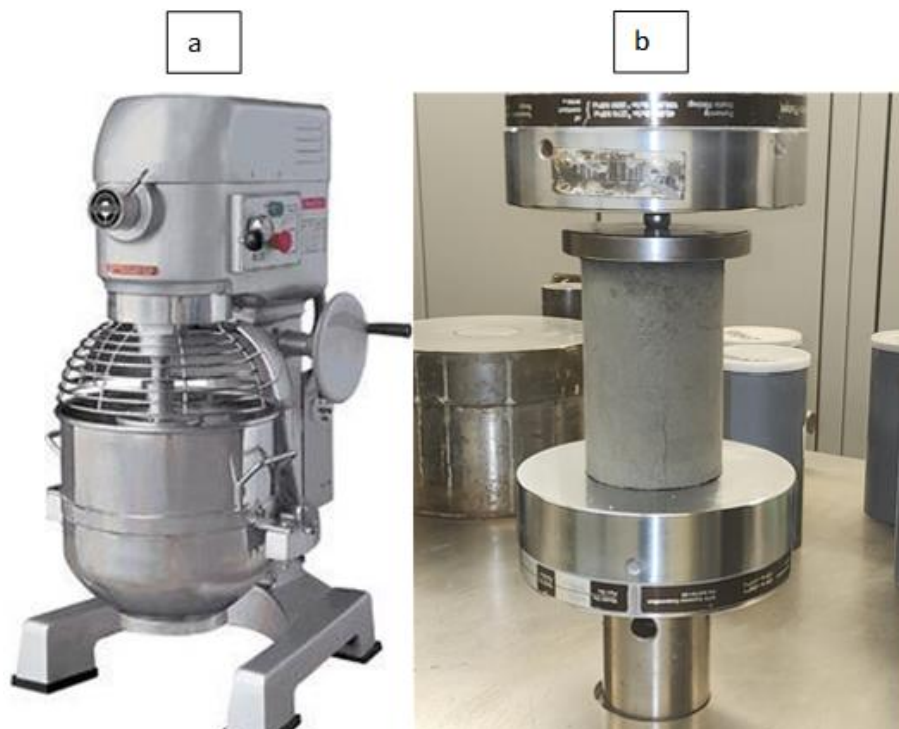


Figure 3.11 a&b Malaxeur Horbart (a) utilisé pour homogénéiser les mélanges & presse mécanique (b) utilisée pour l'essai de l'UCS

### 3.4 Caractérisation hydrogéotechnique des mélanges

#### 3.4.1 Essai de perméabilité

La conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des résidus densifiés, solidités et stabilisés a été déterminée à l'aide de l'essai de perméabilité à paroi flexible et à charge variable selon la norme ASTM D5084-16a.

Le perméamètre à paroi flexible utilisé pour cet essai était équipé d'une base et d'une tête qui s'adaptent parfaitement à l'échantillon. La tête et la base sont munies de deux tubes de drainage permettant la saturation du matériau et l'évacuation de l'air (figure 3.12).

L'échantillon de mélanges utilisé pour les essais de perméabilité a été préalablement préparé et placé dans des moules (10,3 cm de hauteur et 20,5 cm de diamètre) pour une cure de 28 jours. Les dimensions des moules correspondaient à celles du perméamètre à paroi flexible utilisé. Une fois les 28 jours écoulés, l'échantillon a été enlevé du moule en PVC et pesé. La hauteur et le diamètre de l'échantillon ont également été mesurés. L'échantillon a été inséré dans une membrane flexible

qui l'entourait intégralement. L'échantillon a par la suite été placé dans la base du perméamètre avec une pierre poreuse et un géotextile à ses extrémités.

La saturation de l'échantillon a été réalisée à travers de grosses burettes avec de l'eau désionisée et désaérée en appliquant une pression de saturation après avoir été confinée par la pression cellulaire. Le temps de saturation variait entre une à deux semaines selon le type de mélange après 28 jours de cure. Les pressions de confinement et de saturation étaient de 30 et 20 kPa respectivement. Ces pressions étaient toutes contrôlées par des valves et des capteurs de pression. Ces valeurs respectent l'ordre de précision de 1,5 fois supérieure à la pression de saturation. Toutes les vérifications ont été effectuées pour s'assurer de l'étanchéité de toute l'installation et l'air résiduel a été chassé des tuyaux en ouvrant la valve de sortie d'eau qui se situe à la base du perméamètre.

L'essai de la conductivité hydraulique a ensuite été lancé en utilisant un chronomètre. La conductivité hydraulique saturée  $k_{sat}$  (cm/s) a été calculée selon la formule :

$$k_{sat} = \frac{a L}{A \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.3)$$

Où

a : aire de la burette de sortie d'eau;

L : la hauteur de l'échantillon en cm;

A : aire de la section de l'échantillon;

$\Delta t$  : différence des temps ( $t_2 - t_1$ )

$h_1$  et  $h_2$  : les pertes de charge à travers l'échantillon aux temps  $t_1$  et  $t_2$



Figure 3.12 Moule & échantillon dans la membrane (a) et Permeamètre à paroi flexible (b) utilisé pour les essais de conductivité hydraulique

### 3.4.2 Essai de gel-dégel sur les mélanges non amendés et amendés

Les essais de gel-dégel ont été réalisés sur les échantillons utilisés pour les essais de conductivité hydraulique. L'objectif était d'évaluer les effets de gel-dégel sur la conductivité hydraulique des résidus solidifiés et stabilisés à base du ciment Portland HE. Les échantillons entourés de membranes dans des cellules ont été isolés avec du polystyrène afin de minimiser l'évaporation et d'éviter le gel partiel (figure 3.13). Les échantillons ont été placés dans un congélateur à une température moyenne de  $-26^{\circ}\text{C}$  pour une durée de 24 h pendant les périodes de gel. Pour les temps de dégel, les échantillons sont restés isolés et déposés à une température constante de  $18^{\circ}\text{C}$  dans une chambre réservée à cet effet pour la même durée de 24h après 28 jours de cure. Ensuite, la conductivité hydraulique saturée est évaluée après chaque cycle de gel-dégel.





Figure 3.13 Cellule contenant les échantillons soumis aux cycles de gel-dégel

### 3.4.3 Détermination des courbes de rétention d'eau (CRE)

Les courbes de rétention d'eau (CRE) des différents mélanges ont été réalisées après 28 jours de cure. Les mélanges ont été préparés dans un moule de dimensions (8,5 cm de diamètre et 6 cm de hauteur) équivalant à celles de la cellule de pression. Par la suite, chaque échantillon a été saturé et placé dans une cellule de pression entre deux plaques de céramique poreuses préalablement saturées. La pierre poreuse utilisée dans cette étude avait une capacité maximale de 300 kPa. Les cellules étaient munies : 1) d'un tube de sortie situé à la base permettant le drainage de l'eau de l'échantillon et 2) d'une pression d'air alimentée par un tube d'entrée situé sur la plaque supérieure. L'échantillon est alors soumis à l'essai en appliquant la plus faible pression à la cellule capable d'entraîner l'écoulement de l'eau et de provoquer une perte de masse de l'échantillon. La pesée des cellules a été effectuée avant et pendant l'essai.

Différentes teneurs en eau volumiques ( $\theta$ ) étaient obtenues en fonction de la succion ( $\psi$ ) au cours de l'essai à partir de la différence de masses. Les deux paramètres ( $\theta$ ) et ( $\psi$ ) ont permis de tracer la courbe de rétention d'eau. La CRE a été utilisée pour la détermination de la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) ou AEV et de la pression résiduelle ( $\psi_r$ ) qui sont deux paramètres qui caractérisent la CRE (Aubertin et al., 1998).

### **3.5 Essai de mouillage-drainage en colonne sur les mélanges non amendés et amendés**

Comme mentionné dans la section préparation des mélanges, les colonnes ont servi à simuler deux configurations de dépositions des résidus miniers amendés en surface et à évaluer leur comportement hydrogéochimique.

Rappelons que les essais en colonne ou les cellules de terrain avec amendement cimentaire des résidus ont été utilisés dans plusieurs études (Barast et al., 2014; Deschamps, 2009; Hadimi, 2014) pour évaluer le comportement hydrogéochimique des résidus miniers. Pour la présente étude, dix colonnes expérimentales, instrumentées à l'aide des sondes de type EC 5 ont été utilisées. Ces équipements ont été utilisés pour le suivi de l'évolution de la teneur en eau volumique en fonction du temps au sein des différents matériaux. Les sondes ont été installées directement au moment de la mise en place des mélanges dans les colonnes. Ces colonnes étaient également munies de valves de sortie à leur base et qui sont connectées à des réservoirs pour collecter les lixiviats après le processus du mouillage et durant la période de drainage. Ces réservoirs étaient préalablement pesés et identifiés avant d'être fixés à chaque colonne (figure 3.14).





Figure 3.14 Colonnes expérimentales utilisées dans les essais expérimentaux

Les colonnes ont été soumises aux cycles de mouillage et de drainage. Au début de chaque cycle de mouillage, des volumes d'eau ont été ajoutés aux mélanges dans les colonnes. Le volume d'eau ajouté jusqu'à saturation a été calculé selon la formule :

$$V_w = S_r \cdot V_v \quad (3.4)$$

Où  $S_r$  est le degré de saturation et  $V_v$  le volume des vides.

Le volume d'eau variait entre 2,5 L pour les colonnes de 40 cm à 3,20 L pour la colonne de 50 cm. Les volumes d'eau utilisés toutes les quatre semaines dépendaient de la vitesse de drainage des colonnes (entièrement, peu ou à moitié drainées) qui est fonction de la microstructure (taille des pores) des couches déposées. Un arrosoir et un tube gradué (figure 3.15) réservés à cet effet ont été utilisés pour mouiller les couches de mélanges dans les colonnes.



Figure 3.15 Matériels utilisés pour le mouillage des couches de résidus.

Dans le but d'éviter les chemins préférentiels et d'obtenir un meilleur remplissage des pores (saturation), le mouillage des couches de mélanges a été progressif et échelonné sur une période de deux (2) jours. Le principe a consisté à utiliser la première moitié du volume d'eau total pour arroser les colonnes le premier jour (soit 1,25 et 1,6L). La deuxième moitié du volume d'eau était réservée pour le deuxième jour de mouillage.

Une période de 26 jours était déterminée pour la période de drainage. Le drainage commence lorsque les valves sont ouvertes. Dans ce cas, l'eau est libre de s'écouler et de se drainer à travers les couches de mélanges. La quantité d'eau drainée durant cette période dépendait de la perméabilité des couches de mélanges déposées dans les colonnes. Après chaque cycle de drainage, les lixiviats ont été récoltés à des fins d'analyses physico-chimiques. Au total, dix cycles de mouillage et de drainage ont été réalisés durant ces essais.

### **3.5.1 Analyse des paramètres physico-chimiques et chimiques**

Le lixiviat collecté à la fin de chaque cycle de mouillage-drainage était analysé pour déterminer les paramètres physico-chimiques et chimiques. Pour la validité des résultats, le pH, le potentiel

d'oxydo-réduction (Eh) et la conductivité électrique (CE) étaient déterminés le jour de la récupération de chaque lixiviat.

Le pH était déterminé à l'aide d'une sonde Thermo Scientific Orion Green sur l'appareil de lecture (VWR Symphony pH-mètre B0PCI de  $\pm 0,02$ ). La sonde était calibrée avec les solutions de pH 4; 7 et 10. Le potentiel d'oxydo-réduction était également mesuré sur l'appareil de lecture (VWR Symphony) avec la sonde Epoxy Cole Parmer Oakton (0,05%) calibrée avec la solution 225 mv. La mesure de la conductivité électrique (CE) était effectuée à l'aide de la sonde Oakton SS rings PP de  $\pm 0,5\%$  de précision. La sonde EC était calibrée avec la solution 1413  $\mu\text{m}/\text{cm}$  à 25°C figure 3.16).

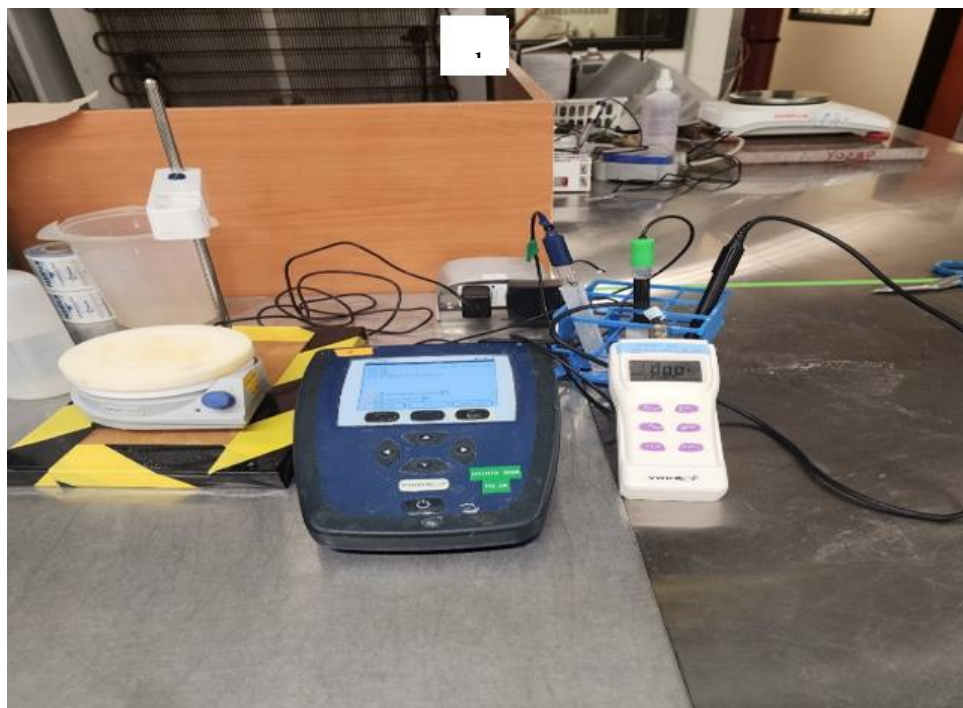


Figure 3.16 Photos de l'appareil VWR Symphony pH-mètre avec les sondes Epoxy Cole Parmer Oakton, Oakton SS rings PP-

Les échantillons étaient par la suite conservés dans un réfrigérateur pour la préparation des tubes pour l'analyse à l'aide du spectromètre d'émission atomique au plasma couplé inductif (ICP-AES).

Les échantillons ICP-AES ont été filtrés et mis dans des tubes de dix millilitres (10 ml) avec l'ajout de 2% d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) pour la conservation. Les principaux éléments chimiques analysés sont : l'aluminium (Al), l'arsenic (As), le baryum (Ba), le béryllium (Be), le bismuth (Bi), le calcium (Ca), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le

magnésium (Mg), le manganèse (Mn), le sodium (Na), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le soufre (S) et le zinc (Zn).

Un échantillon solide a également été analysé par digestion (ICP-AES) afin d'identifier et de déterminer la concentration des éléments chimiques présents dans les résidus de la mine Meliadine.

### **3.5.2 Mesure de la teneur en eau volumique ( $\theta$ )**

La détermination de la teneur en eau d'un sol est d'une importance capitale dans le domaine environnemental (Chagnaud, 2017). Dans le cadre de cette étude, une sonde de teneur en eau de type EC-5 (figure 3.17 a) a été installée au niveau de chaque colonne afin de suivre le comportement hydrogéologique des résidus amendés et non amendés en s'inspirant des études antérieures (Deschamps, 2009; Hadimi, 2014; Kalonji, 2014; Larochelle, 2018; Maqsood & Bussière, 2009). Les sondes ont été placées à une hauteur de 15 cm pour les couches de 30 cm et de 20 cm pour les couches de 40 cm.

Les sondes EC-5 permettent de déterminer la teneur en eau en mesurant la constante diélectrique à l'aide de la technologie capacitive/fréquence. Les données ont été enregistrées à l'aide d'un datalogger et récupérées à partir du logiciel ECHO Utility de Decagon Devices une fois tous les 15 jours.

Les sondes ont été calibrées après 28 jours de cure pour chaque type de mélange afin de corriger les valeurs mesurées en teneur en eau volumique réelle correspondante de chaque mélange. La calibration a été réalisée en effectuant plusieurs mesures avec la sonde pour différentes teneurs en eau volumiques. L'échantillon est tout d'abord pesé à l'état sec afin d'obtenir sa masse solide ( $M_s$ ). Par la suite, une quantité d'eau de masse ( $M_e$ ) connue est ajoutée à l'échantillon. L'échantillon partiellement humidifié est placé dans un cylindre de diamètre ( $d$ ) et de hauteur ( $h$ ) connus et pesé de nouveau pour déterminer sa masse humide ( $M_h$ ). La mesure est prise par la sonde toutes les minutes pendant 10 minutes. Les mêmes étapes sont répétées pour les teneurs en eau passant de 0% jusqu'à saturation totale de l'échantillon (figure 3.17 b & c).





Figure 3.17 a & b Sonde EC-5 pour la mesure de la teneur en eau volumique (a) et les pesées de calibration (b)

La teneur en eau volumique ( $\theta$ ) est déterminée par la formule suivante :

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{total}} = n * S_r \quad (3.5)$$

Où  $V_{eau}$  est le volume d'eau ajouté à l'échantillon,  $V_{total}$  est le volume total du cylindre,  $n$  est la porosité et  $S_r$  le degré de saturation du matériau.

$$V_{eau} = (M_h - M_s) / \rho_w \quad (3.6)$$

Où  $M_h$  est la masse humide de l'échantillon et  $M_s$  est la masse solide de l'échantillon.

Les courbes de calibration ont été tracées en utilisant les différentes valeurs mesurées par la sonde et une équation de droite a été obtenue :

$$y = ax + b \quad (3.7)$$

Cette équation a permis de corriger les mesures réalisées à l'aide de la sonde et d'obtenir la teneur en eau volumique réelle. Les courbes de calibration sont présentées à la figure 3.18 et 19).

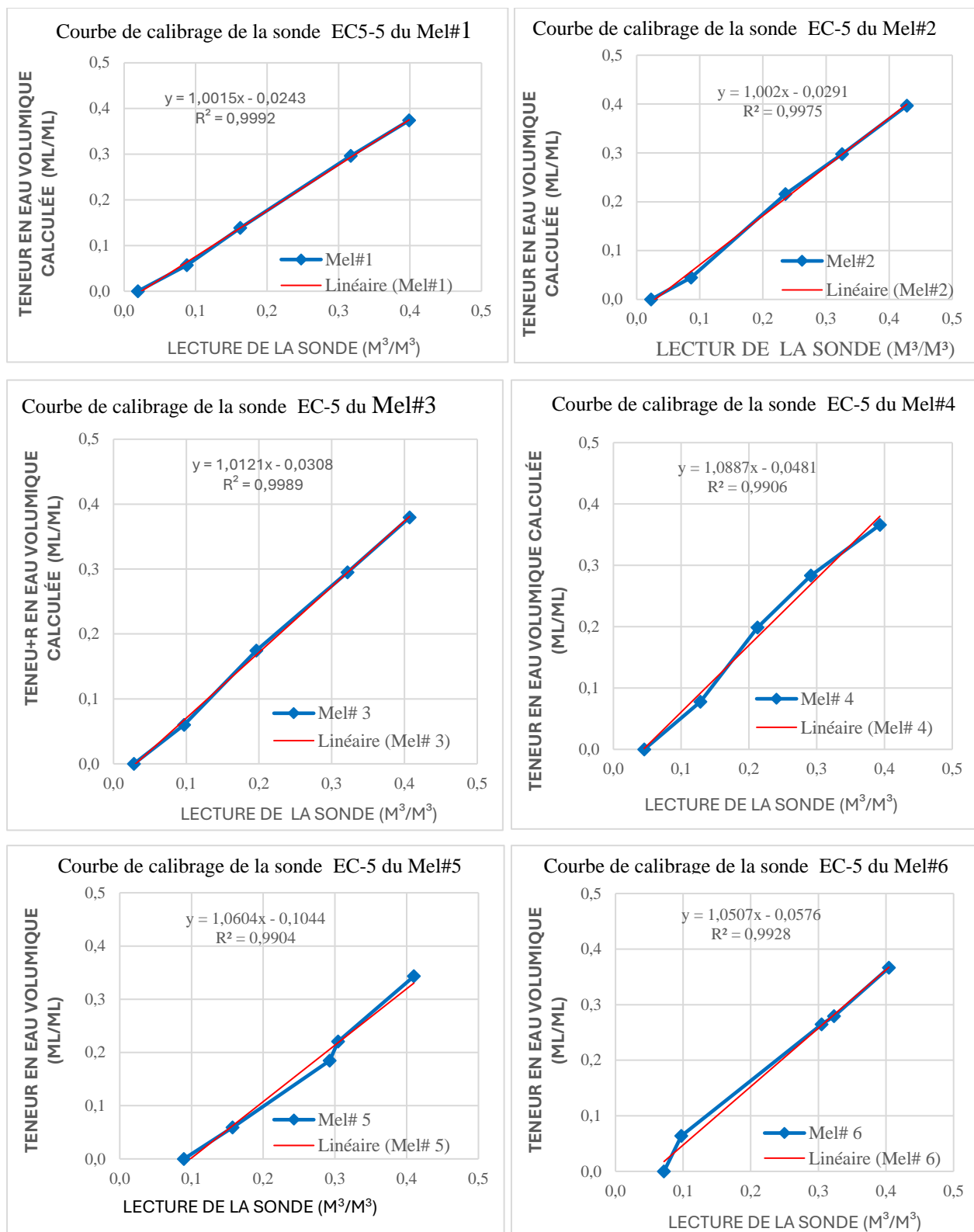


Figure 3.18 Courbes de calibration des différents mélanges 1 à 6

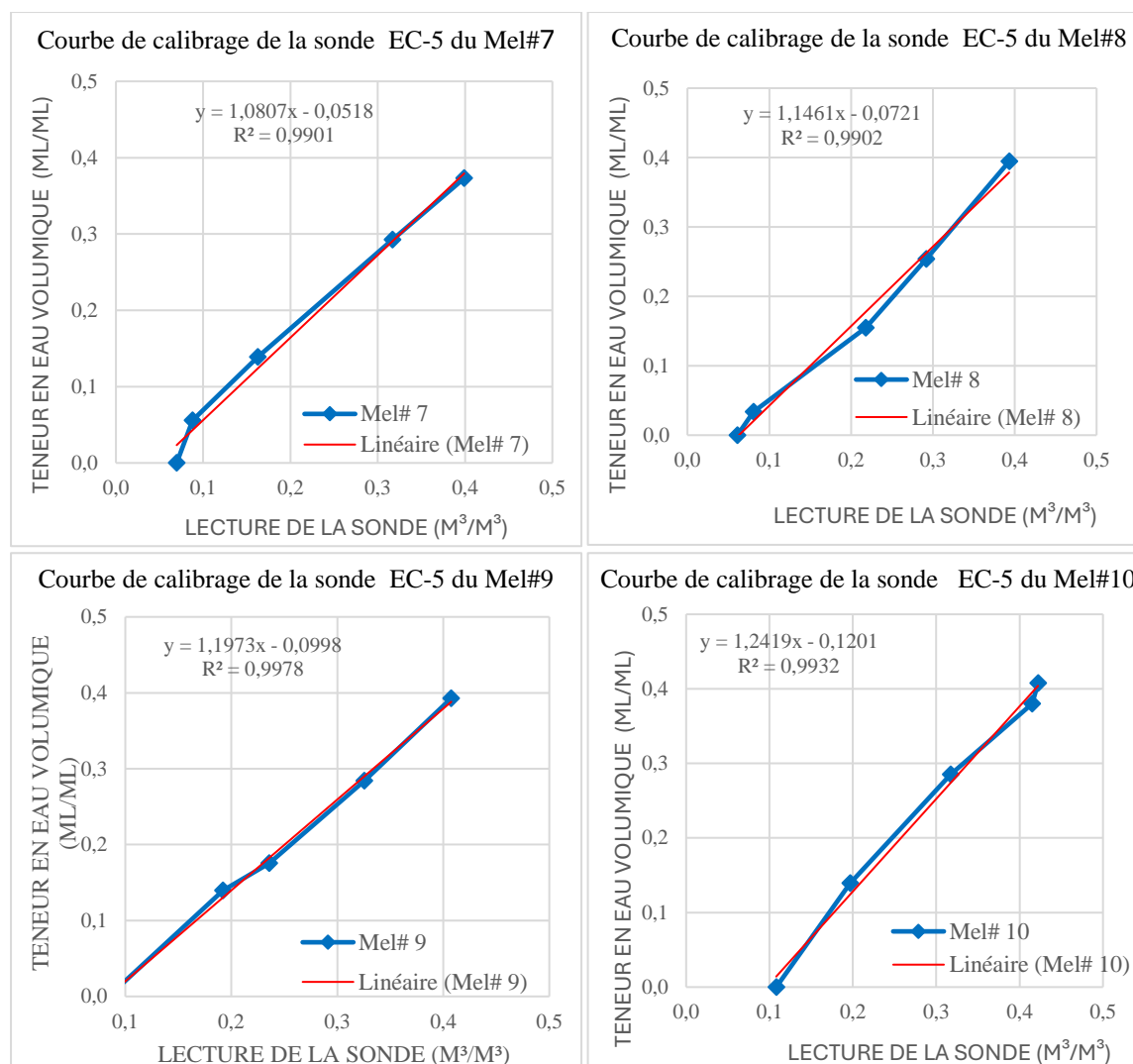


Figure 3.19 Courbes de calibration des différents mélanges 7 à 10

### 3.5.3 Démantèlement des colonnes

Le démantèlement des colonnes était réalisé après le dixième cycle de drainage qui correspondait au dernier rinçage. Cette étape est capitale pour la validation des résultats de la teneur en eau volumique mesurée par la sonde. En outre, l'observation visuelle des matériaux à cette étape permettrait de déceler des zones de variations minéralogiques, structurales et des zones de précipitation des minéraux secondaires dans les couches de mélanges.

Pour le calcul de la teneur en eau volumique, les colonnes ont été démantelées par couche de 10 cm d'épaisseur et chaque couche était pesée et séchée. Un échantillon composite de sol était prélevé dans les colonnes de 30 cm et de 40 cm d'épaisseur pour des fins d'analyses microstructurale et

chimique par digestion et ICP-AES poste démantèlement. Ces analyses peuvent permettre de comprendre le comportement du ciment HE utilisé dans les mélanges (formation de portlandite) et d'évaluer sa performance à absorber ou à encapsuler des métaux dans les résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés.



## **CHAPITRE 4    ARTICLE 1: SOLIDIFICATION-STABILISATION (S/S) OF DENSIFIED MINE TAILINGS CONTAINING PHYLLOSILICATES FOR SURFACE STORAGE UNDER NATURAL CLIMATIC CONDITION**

Marie Zogbili Teoro, Abdelkabar Maqsoud, Tikou Belem and Mamert Mbonimpa

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, PQ, Canada,

MarieZogbili.Teoro@uqat.ca, abdelkabar.maqsoud@uqat.ca, tikou.belem@uqat.ca,

mamert.mbonimpa@uqat.ca,

The article was submitted on January 15, 2024, and presented at the Minefill 2024 conference of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Mining with Backfill in Vancouver on May 12, 2024

Ce chapitre vise à répondre aux objectifs 1 et 2, à savoir, premièrement, évaluer l'effet de l'amendement cimentaire en termes de solidification c'est à dire la résistance à la compression uniaxiale (USC) et deuxièmement, évaluer le comportement hydrogéologique (capacité de rétention d'eau et la  $k_{sat}$ ) des résidus miniers solidifiés et stabilisés.

### **Abstract**

Mine tailings are filtered and stored on the surface in tailings storage facilities to create self-supporting tailings. However, tailings containing phyllosilicates (such as Muscovite - fine tailings) may be susceptible to long-term freeze-thaw and wet-dry cycles. These environmental conditions can adversely affect the hydrogeochemical stability including the modification of saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ), water retention curve (CRE), and mobility of chemical elements, especially in the case of sulfide deposits. Additionally, these conditions impact the physical stability, including mechanical strength and bearing capacity of these tailings.

To mitigate these potential impacts, the use of hydraulic binders to solidify and stabilize these tailings is becoming increasingly a necessary. In these tests, small quantities of HE cements (0.5%, 1.5% and 2%) were added to the filtered tailings, incorporating different proportions of muscovite (9.5%, 12.5% and 15.5%) to form mix recipes. These blends were subjected to several tests after 28 days of curing at a controlled temperature of 18°C.

Test results showed significant improvements in uniaxial compressive strength (UCS)  $k_{sat}$ , pH, Eh and water electrical conductivity improved with the addition of 2% HE cements to muscovite-bearing mine tailings up to 15%. UCS increased from 61 kPa for unamended tailings to 493 kPa for tailings amended with 2% HE cements.  $k_{sat}$  decreased from  $10^{-7}$  to  $10^{-8}$  m.s<sup>-1</sup> and the pH increased from 7 to 8.6. However, few differences were observed in the air entry value of all tested mixture materials.

The results of this study highlight the positive impact of incorporating cementitious amendment to phyllosilicate-bearing mine tailings stored on the surface under northern conditions. This finding presents an opportunity for mining companies to establish a more responsible, safe and sustainable management system for the mining environment, all at a lower cost.

Keywords: Mine tailings, hydraulic properties, geochemical stability, mechanical strength, binder, climate, permafrost.

## 4.1 Introduction

The extraction of ores during mining operation requires a treatment process at the mill to obtain an economically valuable concentrate. This process generates a significant quantity of mine tailings that must be managed by the operators for underground mines. Approximately 60% of these tailings are returned underground as backfill to ensure the stability of the underground mine site (Belem & Benzaazoua, 2008b; Benzaazoua et al., 2003; Benzaazoua et al., 2004a; Newman et al., 2001; Ouellet et al., 2006). The remaining portion is typically deposited on the surface in tailings storage facilities surrounded by retaining dikes.

However, the mineralogical composition and granulometry of these tailings mean that their long-term management remains a real source of chemical instability such as acid mine drainage (AMD) generation by sulfide minerals oxidation and physical instability, including dike failure (Aubertin et al., 2002b; Bussière, 2007; Marques et al., 2020).

Another issue related to surface tailings management is the presence of phyllosilicates and the effect of climatic stresses such as freeze-thaw and wetting-drying cycles especially in cold regions (Létourneau, 2012; Ma et al., 2022; Ren et al., 2019). These climatic conditions can adversely affect the physical integrity of filtered tailings and negatively impact their hydrogeochemical, geotechnical and mechanical properties.

Indeed, freeze-thaw and wet-dry cycles can induce a sharp increase of water contained in phyllosilicate-bearing tailings during the spring seasons. This increase in water content leads to structural deterioration and cracking of densified tailings. These changes result in increased hydraulic conductivity and a progressive and a progressive weakening of mechanical performance of the tailings. Additionally, all these phenomena promote the release, solubility, and mobility of contaminants, especially in the case of sulfurous deposits into the environment. Consequently, they create chemical instability and pose risks to surface water, groundwater, plants and living organisms. In such cases, the application of the solidification and stabilization method using cement becomes an effective alternative to increase the mechanical performance, durability and hydrogeochemical stability of mine tailings (Benzaazoua et al., 2004c; Chen et al., 2019; Hadimi, 2014; Hadimi et al., 2016; Kumpiene et al., 2008; Lwin et al., 2018; Segui et al., 2023; Tyagi & Annachhatre, 2023).

The addition of cement to tailings reduces their porosity and permeability and increases their water-retention capacity (air entry value) and their mechanical performance (Chen et al., 2019; Peyronnard et Benzaazoua, 2012; Shi et Spence, 2004; Wang et al., 2023).

This overview that the solidification/ stabilization method based on hydraulic binder is widely recognized and successfully utilized in several engineering fields. However, its application poses a significant challenge in the mining field due to unique characteristics of each tailing including mineralogical composition, grain size distribution and exposure climatic conditions (Eagle, 2021). This study was undertaken with these considerations with the objective to assess the hydrogeochemical behavior of densified, solidified, and stabilized tailings from the Meliadine mine which contain phyllosilicates and are stored on the surface under natural northern climatic conditions.

This article presents a description of the methodology and material utilized in this study. Then presents investigation results regarding the influence of phyllosilicate amendments on various aspects including mechanical strength, water retention curve, permeability, freeze-thaw effect, and leachate water qualities. Finally, the paper concludes by a discussing the beneficial effects of employing cement-based solidification and stabilization techniques to enhance the mechanical and hydrogeochemical properties of densified mine tailings.

## 4.2 Materials and Methods

In this project, materials utilized included Meliadine mine tailings, high early strength (HE) Portland cement and muscovite. The muscovite was sampled in its natural state at the Aldovs site in Preissac located in the Abitibi Témiscamingue region of Quebec, Canada. Subsequently, it underwent protocol treatment and analysis by combined X-ray diffraction (XRD) in order to determine the content (%) of muscovite used in the mixtures.

### 4.2.1 Materials and properties

The filtered tailings and muscovite underwent physical characterization to determine their relative density, particle size distribution, specific surface area. Additionally, mineralogical characterization using X-ray diffraction (XRD) was conducted to determine the initial muscovite content in the tailings before doping and blending. The results of the grain size distribution are presented in figure 4.1. This grain size distribution was used to determine specific parameters such as  $D_{10}$ ,  $D_{60}$  and  $C_u$ . These parameters are presented in Table 4.1 and mineralogical characterization and their proportion in Table 4.2.

Table 4.1 Physical and mineralogical properties of Meliadine mine tailing

Parameter	Value
Dr	2.92
$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	3.8
$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	22.5
$D_{60}$ ( $\mu\text{m}$ )	30.3
CU	7.89
CC	1.18
P80 $\mu\text{m}$ (%)	85

Table 4.2 Mineralogical properties of Meliadine mine tailing

Mineral	Proportion (Wt. %)
Quartz	42.7
Chlorite	21.2
Albite	15.5
Muscovite	9.5
Dolomite	8.4
Magnétite	1.9

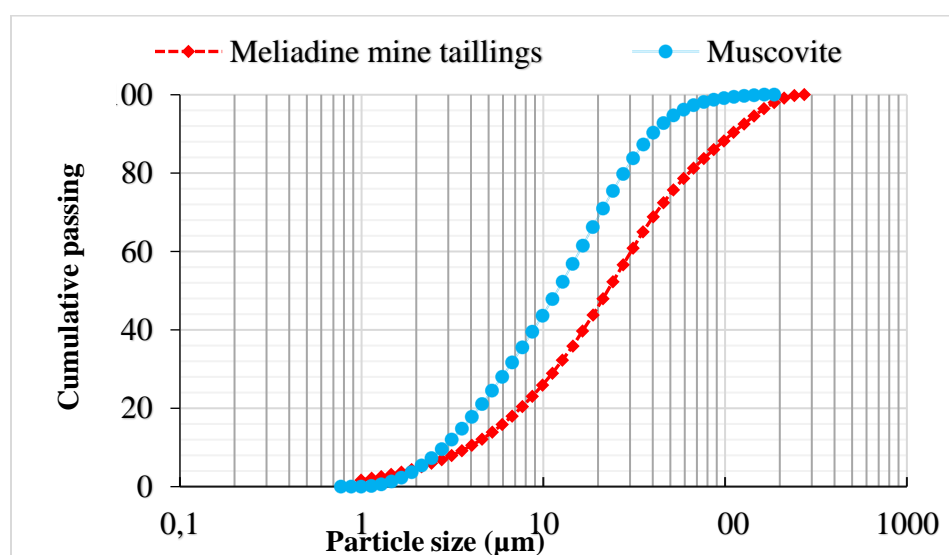


Figure 4.1 particle size distribution of Meliadine mine tailings and muscovite.

The results of physical characterization indicate that Meliadine mine tailings are dense; with a density of  $D_r = 2.92$ , the percentage passing through particle smaller than  $80 \mu\text{m}$  is approximately 85%. The particle diameter corresponding to  $D_{10}$  is  $3.8 \mu\text{m}$ . The uniformity and curvature coefficients correspond to 7.89, and 1.18 respectively. The particle size distribution of Meliadine mine tailings is typical of hard rock mines (Aubertin et al., 2002), with a measured specific surface area of  $1818.4 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

X-ray diffraction (XRD) analysis of the tailings revealed quartz as the most abundant mineral at 42.7%, followed by chlorite (21.2%), albite (15.5%), muscovite (9.5%), dolomite (8.4%) and finally magnetite (1.9%).

#### **4.2.2 Mix Preparation and placement of cemented and Uncemented layers**

This study employed various mixture of tailings and cement to simulate two surface tailing storage scenarios. The mixtures were prepared with three levels of muscovite content (9.5, 12.5 and 15.5%). For each level, three proportions of Portland HE cements were added (0, 0.5, and 2% by mass) for the first scenario. Additionally, another cement (1.5% HE) was added to the 12.5% muscovite content to test a second configuration scenario involving intercalation of uncemented (UC) and cemented (CC) column layers. This second configuration aimed to simulate continuous tailings storage in a pre-existing facility.

All mixtures were prepared to a uniform consistency of between 2 and 3.5 inches and a fixed solid percentage of 83.5%. The mixtures underwent a 28-days curing period at controlled temperature of 18°C in a humid chamber before further testing.

#### **4.2.3 Test Performed**

Before describing the tests, it's important to note that all experiments were conducted in accordance with ASTM standards (D2166, D1633-00).

#### **4.2.4 Uniaxial Compressive Strength**

Mechanical properties were assessed in the laboratory through uniaxial compression tests (UCS). Ten specimens each with high of 15.62 cm and 7.24 cm diameter, were prepared from different mixtures. After 28 days, these cylindrical samples were subject to uniaxial compression testing. Each sample was placed between two parallel platens of a mechanical press and compressed to measure its compressive strength. This allowed for an evaluation of the effect of the amendment on the physical integrity of the cement-based stabilized and solidified tailings.

#### **4.2.5 Wetting-drying columns tests**

Experimental columns with a diameter of 15 cm and a height of 40 cm were used to test the hydrochemical behavior of the mixtures. Each column was subjected to wetting and drying cycles. Each cycle began with the saturation of the material with water (volumes ranging from 2425 to

3137 ml), followed by a drainage period lasting four weeks. After each cycle, leachate was collected near the bottom of the column and analyzed for physical and chemical parameters including pH, Eh, and EC.

#### 4.2.6 Water retention curve

Water retention curves (WRC) were determined through the Tempe cells test (Figure 4.2). After 28 day curing period, the mixtures were prepared in molds with dimensions of 8.5 cm in diameter and 6 cm in height, equivalent to the dimensions of the pressure cell. The samples were saturated and then placed between two saturated porous ceramic plates to begin the test. The water retention curve was obtained by plotting the various water contents ( $\theta$ ) as a function of suction ( $\psi$ ) during the test.



Figure 4.2 Pressure cells (Tempe cells) used to determine the WRC of tailing mixtures

#### 4.2.7 Permeability and freeze-thaw tests

The saturated hydraulic conductivity ( $k_{sat}$ ) of both amended and unamended tailings was determined using the variable-head flexible-wall permeability test in accordance with ASTM D5084-16a.

The mixture sample used for the permeability and freeze-thaw tests was prepared for curing in PVC molds (10.3 cm high and 20.5 cm in diameter) before being placed in the permeameter with

a porous stone and geotextile at the ends. The sample was saturated with deionized and deaerated water. Containment and saturation pressures were 30 and 20 kPa respectively. The saturated hydraulic conductivity  $k_{sat}$  (cm/s) was calculated by the formula:

$$k_{sat} = \frac{a L}{A \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4.1)$$

where,  $a$  = area of burette;  $L$  = sample height in cm;  $A$  = sample section area; and  $h_1$  and  $h_2$  = pressure losses across the sample at times  $t_1$  and  $t_2$ .

Twelve cycles of freeze-thaw tests were conducted on solidified and stabilized samples to assess the effects of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of amended tailings. The samples, surrounded by membranes and isolated in a cell, were moved to a freezer with an average temperature of  $-26^\circ\text{C}$  during 24 hours during the freezing phase. Subsequently, they were thawed at an ambient temperature of  $20^\circ\text{C}$ .

## 4.3 Results and Discussion

### 4.3.1 Uniaxial compressive strength

The results of uniaxial compressive strength (UCS) tests on the various mixtures are depicted in figure 4.3. It is evident that the increase in the UCS of the mixtures correlates with the increase in the proportion of cement. For example, with cement contents of 0.0, 0.5, 1.5 and 2%, the UCS increased from 61.4 kPa (for mixtures with 0.0% cement) to 493.4 kPa (for mixes with 2% HE cements). These findings are consistent with previous studies from other authors (Belem et al., 2000; Fall et al., 2008; Hamberg et al., 2015). However, for the same mixtures and cement proportion, the compressive strength decreases with increasing muscovite percentage (9.5; 12.5 and 15.5%). This demonstrates the negative impact of phyllosilicates on the development of uniaxial compressive strength in cement-based mixes. Similar adverse effects of muscovite have been observed by other authors (Benzaazoua et al., 2010; Cepuritis et al., 2014; Loovents et al., 2007; Miskovsky, 2004).



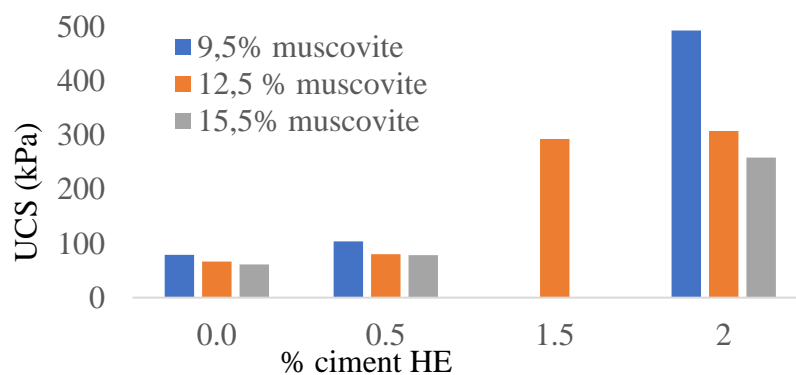


Figure 4.3 Effect of cement and muscovite on UCS development.

### 4.3.2 Physical and chemical properties of leacheate

Analysis results for physical and chemical parameters (pH, Eh) and electrical conductivity (EC) are presented in Figure 4.4.

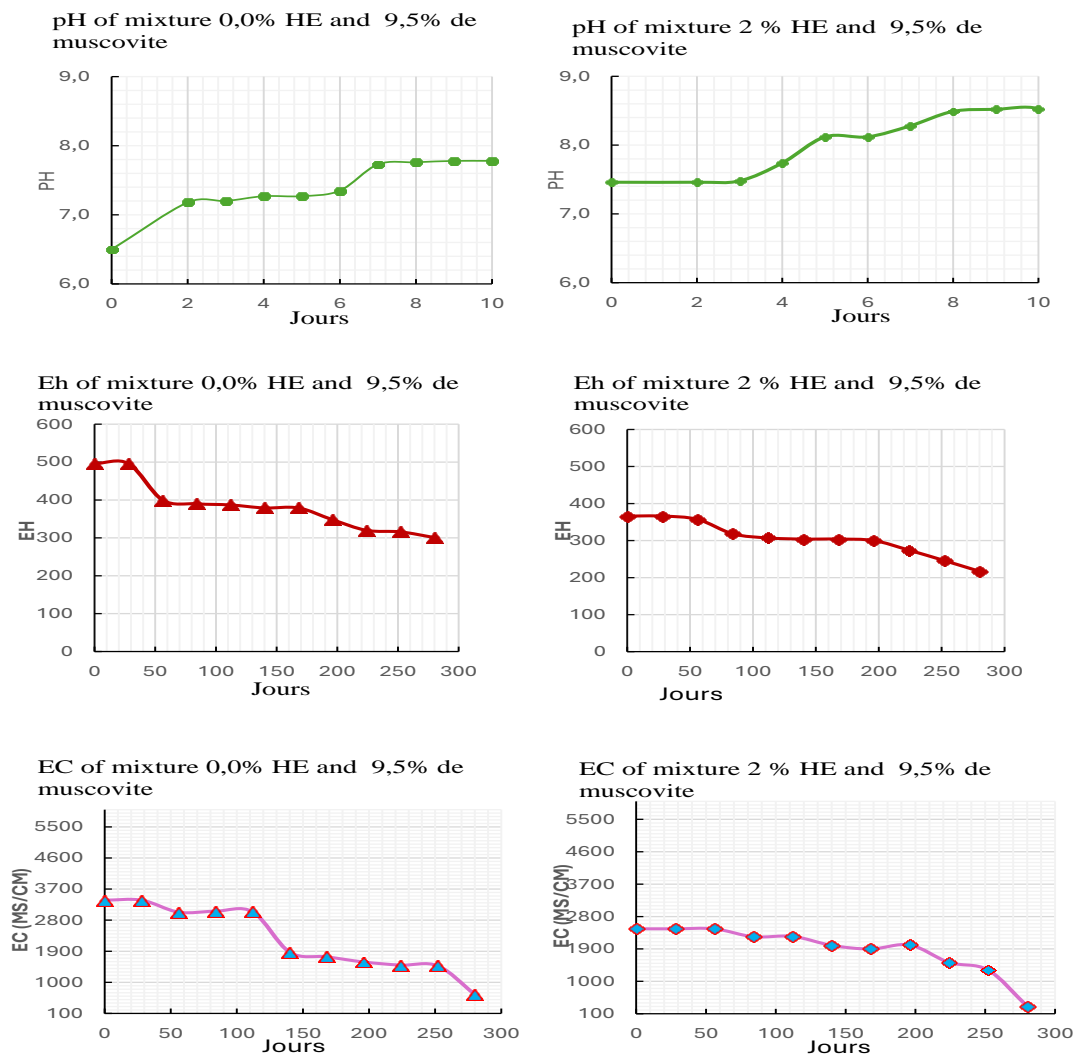


Figure 4.4 Evolution of physical and chemical parameters (pH, Eh, CE) as a function of % cement and number of wetting and drying cycles

The results show that the parameters (pH, Eh and EC) were improved gradually after each wetting and drying cycle and more particularly with the addition of 2% cement. This behaviour was observed by other authors with the tailings without muscovite (Deschamps et al., 2009b; Hadimi et al., 2016). The pH values increased from 6.3 to 7.8 for unamended tailings and from 7.40 to 8.6 for tailings amended with 2% HE cements for all mixes (9.5; 12.5 and 15.5% muscovite). The variation in pH values observed with 0.5% cement proportions could indeed be attributed to the rapid desaturation of the amended tailings, potentially leading to oxidation of the tailings and subsequent generation of acidity. This highlights the importance of cement content in achieving stable and consistent results in tailings stabilization.

### 4.3.3 Evolution of Water Retention Properties

The Air Entry Value (AEV) of the mixtures was determined on the water retention curves (WRC or CRE), using the tangent method (Fredlund et al., 2012) (Figure 4.5). The values obtained are shown in Table 4.3.

Table 4.3 Air Entry Value (AEV) for the amended tailings

Mix		AEV (cm)
% cement HE	% muscovite	
0	9.5	300
2		560
0	12.5	315
1.5		400
2		510
0	15.5	330
2		480

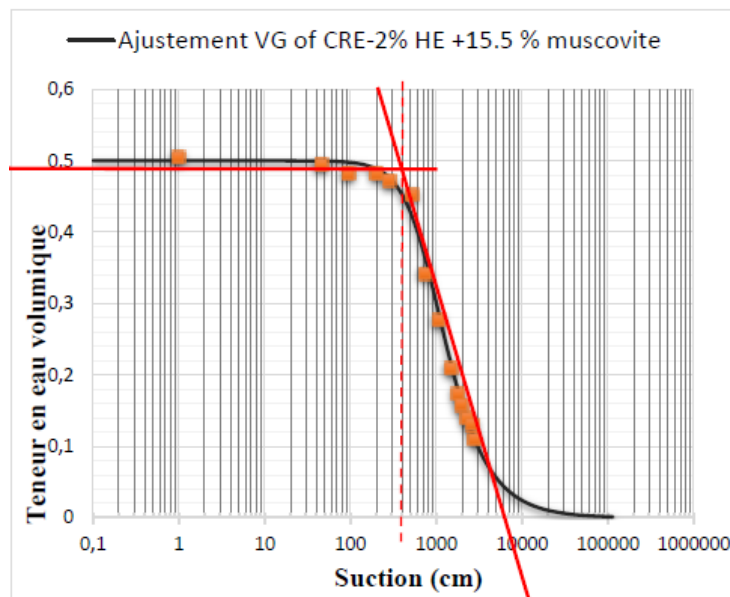


Figure 4.5 Retention curve measured and fitted using van Genuchten's RETC model.

The table 4.3 demonstrates that the incorporation of muscovite led to a marginal increase in the air entry value, with an increase of 3 kPa observed, rising from 30 kPa to 33 kPa. This increment could

be deemed negligible considering potential evaluation method errors. However, the addition of cement resulted in a notable rise in AEV. Specifically, for muscovite proportions of 9.5%, 12.5%, and 15.5%, the AEV increased from 30 kPa to 56 kPa, from 31.5 kPa to 40 kPa, and from 33 kPa to 48 kPa, respectively.

#### 4.3.4 Assessment of freeze-thaw effects on saturated hydraulic conductivity of cemented (CC) and uncemented (UC) tailings containing phyllosilicates (Muscovite)

The results of the saturated hydraulic conductivity measurements ( $k_{sat}$ ) are shown in the table 4.4.

Table 4.4 Variation of Permeability as function of freeze-thaw

Mel# (%)		Evolution of $k_{sat}$ as a function of the number of freeze-thaw cycles						
Cement (HE)	Muscovite	Cycle 0	Cycle 2	Cycle 4	Cycle 6	Cycle 8	Cycle 10	Cycle 12
		$k_{sat}$ (m/s)						
0.0	9.5	8,33E-08	1,10E-07	1,39E-07	1,58E-07	1,73E-07	1,94E-07	1,98E-07
0.5		3,41E-08	7,53E-08	9,49E-08	1,09E-07	1,16E-07	1,23E-07	1,27E-07
2		2,33E-08	4,93E-08	7,28E-08	7,75E-08	7,86E-08	8,20E-08	8,74E-08
0	12.5	8,22E-08	9,98E-08	2,03E-07	2,39E-07	3,00E-07	3,45E-07	3,94E-07
0.5		8,24E-08	9,99E-08	1,45E-07	1,77E-07	1,89E-07	2,21E-07	2,44E-07
1.5		1,57E-07	2,22E-07	2,84E-07	2,91E-07	3,05E-07	3,53E-07	3,84E-07
2		2,21E-08	5,97E-08	8,93E-08	9,43E-08	1,34E-07	1,53E-07	1,57E-07
0	15.5	8,13E-08	9,95E-08	2,14E-07	2,84E-07	3,06E-07	3,72E-07	4,03E-07
0.5		5,56E-08	7,87E-08	1,33E-07	2,41E-07	2,62E-07	3,26E-07	3,52E-07
2		3,24E-08	5,76E-08	9,98E-08	2,02E-07	2,12E-07	2,98E-07	3,02E-07

The test results outlined in Table 4.3 show a increase in  $k_{sat}$  (m/s) of an order of magnitude ( $8.33 \times 10^{-8}$  to  $1.03 \times 10^{-7}$  and  $8.24 \times 10^{-8}$  to  $1.12 \times 10^{-7}$ ) respectively in cycle 2 for the 0.0% HE+9.5% muscovite and 0.5% HE+12.5% muscovite mixtures.

While a slight increase of  $k_{sat}$  was observed ( $2.33 \times 10^{-8}$  to  $8.74 \times 10^{-8}$ ) throughout the test period (cycle 12) for the 2% HE+9.5% muscovite. It should be noted that the 1.5% HE+12.5 mixture was the only one to start with a higher  $k_{sat}$  ( $1.57 \times 10^{-7}$  to  $3.64 \times 10^{-7}$ ). But it did not show any major

variation. The high  $k_{\text{sat}}$  of the 0.0% HE+15.5% muscovite could be attributed to its particle size, as finer the material tend to be less permeable, as observed by (Fall et al., 2009).

#### **4.4 Conclusion**

The findings of this study highlight the influence of phyllosilicates, specifically muscovite, on the mechanical and hydrogeochemical properties of solidified and stabilized tailings. Phyllosilicates were found to diminish the uniaxial compressive strength (UCS) of the tailings. Freeze-thaw cycles led to a notable increase in the saturated hydraulic conductivity ( $k_{\text{sat}}$ ) of cemented tailings containing less than 2% cement. However, the addition of 2% HE cements significantly enhanced both mechanical (UCS increased from 61 to 493 kPa) and hydrogeochemical properties ( $k_{\text{sat}}$  decreased by an order of magnitude). pH, Eh, and electrical conductivity (EC) also exhibited considerable improvement. Indeed, the addition of the binder has been observed to increase the air entry value (AEV), indicating an enhancement in the retention capacity of the mixes. This improvement suggests that the binder contributes to better water retention properties, which can be crucial for the overall performance and stability of the solidified and stabilized tailings.

The UCS measurements provided insights into the physical integrity of the various mixtures used in the study.

Overall, the study underscores the potential of solidification and stabilization techniques for tailings containing phyllosilicates. However, careful consideration of the cement percentage in relation to the proportion of phyllosilicates is essential for the effective application of this technique.

#### **4.5 Acknowledgements**

The authors would like to acknowledge the Fonds de recherche du Québec, Nature et technologies (FRQNT), Agnico Eagle Mines Ltd et IAMGOLD Corporation and the Research Institute of Mines and Environment (RIME UQAT-Polytechnique) for their financial support

## REFERENCES

- Aubertin, M. (2003). Sulphide reactivity within cemented paste backfill: Oxygen consumption test results.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M. et Riffon, O. (2002b). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. Dans. Défis & Perspectives: Symposium.
- Barast, Benzaazoua, M., Maqsoud, A. et Bussière, B. (2014). Long term hydro-geochemical behaviour of surface paste disposal in field experimental cells. Dans. Proceedings of the Conference Canadienne de Géotechnique, GeoRegina, CD-Rom, Regina, Slovakia.
- Belem, T. et Benzaazoua, M. (2008b). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
- Benzaazoua, M., Belem, T., Ouellet, S. et Fall, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement a court, a moyen et a long terme. *Proceedings of Apres-mines*.
- Benzaazoua, M., Fall, M. et Belem, T. (2004a). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I. et Bussière, B. (2004c). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 17(2), 233-243.
- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenviromental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.
- Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G. J., Potvin, R. et Benzaazoua, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées. Dans. Proceedings of the Symposium.
- Chen, G., Shah, K. J., Shi, L., Chiang, P.-C. et You, Z. (2019). Red soil amelioration and heavy metal immobilization by a multi-element mineral amendment: performance and mechanisms. *Environmental Pollution*, 254, 112964.
- Eagle, A. (2021). *Rapport sommaire de 2021 sur la gestion des residus*.
- Fall, M., Adrien, D., Célestin, J., Pokharel, M. et Touré, M. (2009). Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 22(15), 1307-1317.
- Godbout, J., Bussière, B., Aubertin, M., Belem, T. et Benzaazoua, M. (2004). Évolution des propriétés de rétention d'eau des remblais miniers cimentés en pâte durant le curage. Dans. Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference and the 5th joint CGS-IAH Conference.
- Hadimi. (2014). *Étude du comportement hydrogéochimique à long terme d'un dépôt de rejets miniers sulfureux et des effets d'amendements cimentaires: simulations expérimentales au laboratoire* [École Polytechnique de Montréal].

- Hadimi, Mostafa, B., Abdelkadir, M. et Bruno, B. (2016). Effect of cementitious amendment on the hydrogeological behavior of a surface paste tailings' disposal. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 1-15.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A. et Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste management*, 28(1), 215-225.
- Létourneau, M. (2012). Effet du gel et du dégel sur les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux.
- Lwin, C. S., Seo, B.-H., Kim, H.-U., Owens, G. et Kim, K.-R. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—A critical review. *Soil science and plant nutrition*, 64(2), 156-167.
- Ma, L.-H., Chen, J., Zhao, Y.-F., Zhang, C., Liu, R. et Ren, S. (2022). Water Content and Bedding Angle Effects on the Mechanical Properties and Micro-/Macro-Failure Mechanism of Phyllite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-19.
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. et Mbonimpa, M. (2012). Predicting hysteresis of the water retention curve from basic properties of granular soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1147-1159.
- Marques, A., Oliveira, S., Paes, B., Paes, I. et Coelho, A. (2020). Evaluation of the Liquefaction Susceptibility of Filtered Iron Ore Tailings from the Iron Quadrangle (Brazil). Dans. *Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*.
- Newman, P., White, R. et Cadden, A. (2001). Paste, the future of tailings disposal. Dans. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mining and the Environment, Skelleftea, Sweden*.
- Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. et Aubertin, M. (2006). Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 19(5), 407-419.
- Ren, J., Vanapalli, S. K., Han, Z., Omenogor, K. O. et Bai, Y. (2019). The resilient moduli of five Canadian soils under wetting and freeze-thaw conditions and their estimation by using an artificial neural network model. *Cold Regions Science and Technology*, 168, 102894.
- Segui, P., Safhi, A. e. M., Amrani, M. et Benzaazoua, M. (2023). Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. *Minerals*, 13(1), 90.
- Tyagi, S. et Annachhatre, A. P. (2023). A review on recent trends in solidification and stabilization techniques for heavy metal immobilization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-25.

## **CHAPITRE 5 ARTICLE 2: ASSESSMENT OF THE HYDROCHEMICAL BEHAVIOR OF DENSIFIED, SOLIDIFIED AND STABILIZED MINE TAILINGS UNDER NATURAL CLIMATIC CONDITIONS**

Marie Zogbili Teoro, Abdelkabar Maqsoud, Tikou Belem and Mamert Mbonimpa

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Research Institute of Mines and Environment (RIME), QC, Canada.

The article has been submitted and accepted at the GeoMontreal 2024 conference of the 77th Canadian Geotechnical Conference and the 16th AIH-SNC Groundwater Conference and will be presented between September 15 and 18, 2024.

L'objectif de ce chapitre est de répondre à la deuxième partie du premier objectif qui consistait à évaluer l'effet de l'amendement cimentaire en termes de stabilisation chimique des résidus miniers solidifiés et stabilisés.

### **RÉSUMÉ**

L'exposition à long terme des résidus miniers densifiés (RMD) contenant des phyllosilicates aux cycles de mouillage-drainage (MD) et de gel-dégel peut engendrer des modifications au niveau de leur structure interne. Pour minimiser les effets des conditions climatiques sur les résidus miniers contenant de phyllosilicates, plusieurs techniques peuvent être utilisées et parmi lesquelles on trouve l'amendement cimentaire. Ce dernier peut être utilisé dans la solidification et la stabilisation des résidus miniers. Cette technique a été testée dans le cadre de cette étude où le ciment Portland du type HE a été utilisé afin de solidifier et stabiliser les RMD renfermant des phyllosilicates de la mine Meliadine. Ainsi dix mélanges ont été conçus avec de faibles quantités du ciment HE en incorporant différentes proportions de muscovite. Après un temps de cure de 28 jours et sous température contrôlée les colonnes ont été soumises à des cycles MD.

Les résultats de ces investigations ont montré que le pH, Eh et la conductivité électrique se sont considérablement améliorés. En plus, une réduction notable des concentrations en As, Fe, Ni, Cu, Zn des lixiviats a été observée. Ces différentes concentrations respectent les réglementations environnementales de la directive 019.



## ABSTRACT

Long-term exposure of phyllosilicate-bearing densified mine tailings (DMT) to wetting-drying (WD) and freeze-thaw cycles can lead to structural changes. To mitigate the impact of climatic conditions on mine tailings containing phyllosilicate, various techniques, including cementitious amendment, can be employed. Cementitious amendment involves the solidification and stabilization of mine tailings, a method tested in this study using HE-type Portland cement to treat phyllosilicate-bearing DMT from the Meliadine mine. Ten mixtures were formulated, incorporating different proportions of muscovite and HE cement. Following a 28-day curing period, the columns underwent temperature-controlled MD cycles. The investigation results demonstrated considerable improvements in pH, Eh, and electrical conductivity. Moreover, a significant reduction in leachate concentrations of As, Fe, Ni, Cu, and Zn was observed, all of which comply with the environmental regulations outlined in Directive 019.

## 5.1 Introduction

Mining companies face the challenge of managing the significant volumes of tailings generated during ore processing. Typically, only around 60% of these tailings are reutilized underground as backfill to maintain underground stability. The remaining tailings are stored on the surface in tailing storage facilities (TSFs), enclosed by retaining structures. These tailings may contain sulfide minerals, which, when exposed to atmospheric conditions, undergo oxidation, leading to the generation of acid mine drainage (AMD). AMD is characterized by acidic pH and high concentrations of dissolved metals and sulfates, posing environmental risks. (Aubertin et al., 2002b; Bussière, 2007; Maqsoud et al., 2016; Marques et al., 2020).

To reduce the environmental impact of tailings, other management techniques involve thickening and filtering tailings to produce paste tailings with a pulp density ranging between 70% and 85%, or "filter cakes" with a high pulp density of over 85% (Bussière, 2007; Fränkle et al., 2022). These techniques, widely used by mining companies, allow for the improvement of the consistency of the tailings stored on the surface.

However, the presence of phyllosilicates in these tailings could have a negative impact on their stability. Indeed, the succession of wetting-drying cycles and freeze-thaw cycles, particularly in cold regions, will affect the physical and hydrochemical integrity of these tailings (Létourneau,

2012; Ma et al., 2022; Ren et al., 2019), allowing the dissolution, leaching, and mobility of dissolved chemical elements in surface water and groundwater (Benzaazoua et al., 2004; Coussy, 2011; Maqsoud et al., 2012). Under these conditions, the use of stabilization techniques such as cementitious amendment of tailings can be a promising alternative for effective tailings management.

Adding small quantities of cement to mine tailings can modify their texture and transform them into a monolithic matrix. Cement acts as a cohesive between grains, reducing permeability (Belem et al., 2000; Deschamps et al., 2009; Deschamps et al., 2008; Elghali et al., 2019; Godbout et al., 2007; Ichrak et al., 2016). It also buffers the pH of leachates, increasing neutralization power and contaminant stabilization.

The present study was conducted to evaluate the performance of the cementitious amendment in terms of the chemical stability of densified, solidified, and stabilized mine tailings which contain phyllosilicates.

## **5.2 Materials and Methods**

In this study, tailings sampled from the Meliadine mine site, along with muscovite sourced from a meticulous pegmatite outcrop located in the Abitibi region, and Portland HE cements were utilized. It is important to note that the muscovite underwent washing, drying, pulverizing, and sieving before being incorporated into the mixtures. These materials were combined to prepare mixtures simulating two scenarios of tailings surface storage configuration.

### **5.2.1 Mixture preparations**

In this work, ten mixtures were prepared with varying cement and muscovite content (see Table 5.1). The muscovite was added to the tailings to achieve three different levels: 9.5%, 12.5%, and 15.5%. For each muscovite content, three proportions of Portland HE cements (0.0%, 0.5%, and 2%) were added. These mixtures were homogenized using a Hobart mixer for 7 minutes

Table 5.1 Mixes contents in muscovite and cements

Parameters	Muscovite (%)	Ciment (%)
Mixture 1		0
Mixture 2	9.5	0.5
Mixture 3		2
Mixture 4		0
Mixture 5		0.5
Mixture 6	12.5	1.5
Mixture 7		2
Mixture 8		0
Mixture 9	15.5	0.5
Mixture 10		2

All mixtures were prepared to a uniform consistency ranging between 2.30 and 3.5 inches (7 and 9 cm) and a consistent solid percentage (Cw) of 83.5%. Subsequently, the mixture underwent 28 days curing period at a constant temperature of 18°C.

### 5.2.2 Material characterization

Physical, chemical, and mineralogical characterization was carried out on the Meliadine tailings, muscovite and prepared mixtures. The grain size distributions (GSD) were determined through Malvern's Mastersizer laser diffraction particle sizer and results are presented in Figure 5.1.

Table 5.2 presents the physical characteristics of the tailings, pulverised muscovite and mixtures, including the diameters Dx (diameter corresponding to x% passing on the cumulative GSD curve), the coefficient of uniformity ( $C_U$ ) and the coefficient of curvature ( $C_C$ ).

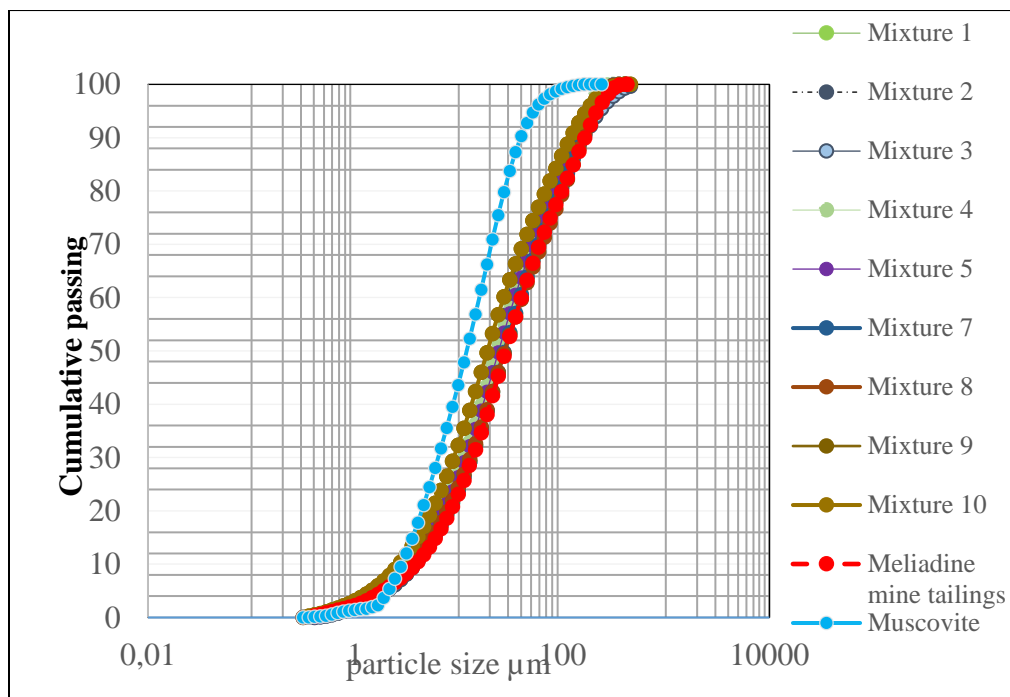


Figure 5.1 GSD of te tailings, muscovite and mixtures

This table shows that  $D_{10}$  is ranged between 2.8 and 3.8  $\mu\text{m}$ ,  $D_{60}$  is between 15.7 and 30.3  $\mu\text{m}$ , Cu is included between 5.56 and 7.97, and Cc is ranged between 0.91 and 1.18 respectively for muscovite and Meliadine tailings. It's important to note that adding cement and increasing muscovite content leads to a reduction in  $D_{10}$  and  $D_{60}$ . The GSD parameters are typical for hard rock tailings (Aubertin et al., 2002; Bussière et al., 2007). As final remark, Meliadine tailings are classified as low-plasticity silts according to the USC system with a well-graded particle size ( $6 < \text{Cu}$ ). The GSD parameters of the mixtures are in same range to those of the tailings.

Table 5.2 Mixtures contents in muscovite and cements

Parameters	$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{60}$ ( $\mu\text{m}$ )	Cu	Cc
Tailings	3.80	30.30	7.97	1.18
Muscovite	2.82	15.72	5.56	0.91
Mixture 1	3.80	30.30	7.97	1.18
Mixture 2	3.77	30.10	7.98	1.19
Mixture 3	3.66	29.62	8.08	1.16
Mixture 4	3.58	29.70	8.29	1.16

Parameters	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>60</sub> (μm)	Cu	Cc (suite)
Mixture 5	3.65	29.42	9.67	1.14
Mixture 6	3.69	30.11	8.16	1.15
Mixture 7	3.13	29.23	9.33	1.27
Mixture 8	3.05	22.21	7.27	1.23
Mixture 9	3.02	20.70	6.85	1.26
Mixture 10	2.94	20.40	6.94	124

Relative grain density (GS) was obtained using a helium pycnometer in accordance with ASTM D-550-06. Results show that the GS of the Meliadine tailings is 2.92 g/cm<sup>3</sup> and that of muscovite is 2,83 g/cm<sup>3</sup>.

The mineralogical composition of the tailings was analyzed using X-ray diffractometer (XRD). The results of the mineralogical analysis are presented in Table 5.3.

These XRD results reveal that quartz is the most abundant mineral (42.7%), followed by chlorite (21.2%), albite (15.5%), muscovite (9.5%), dolomite (8.4%), and finally magnetite (1.9%).

Table 5.3 Mineralogical tested of tailings

Minerals	%	Minerals	%
Quartz	42.7	Muscovite	9.5
Chlorite	21.2	Dolomite	8.4
Albite	15.5	Magnetite	1.9

### 5.2.3 Column testing of prepared mixtures

To assess the hydrochemical properties of the mixtures, experimental columns were utilized in two scenarios:

- In the first scenario, nine experimental columns were employed, each measuring 40 cm in height and 15 cm in diameter. These columns were filled with the mixture, with a thickness corresponding to 30 cm. The tailings were deposited in three 10 cm layers (Mixture 1 to 5 and 7 to 10).
- In the second scenario, the mixtures were deposited in four successive 10 cm thick layers, alternating between uncemented (UC) and cemented (CC) layers. This scenario was simulated in a single column measuring 50 cm in height and 15 cm in diameter. An interval of seventy-two hours (72 h) separated the deposition of each layer to allow the underlying layers to dry and consolidate (Mixture 6). This configuration aimed to simulate a scenario of continuous tailings storage in pre-existing tailings facilities.

The targeted and calculated mixtures placement porosity was approximately 0.36 and 0.37.

Each column was subjected to wetting and drying cycles. Each cycle began with the saturation of the material with water (volumes ranging from 2425 to 3137 ml), followed by a drainage period lasting four weeks. After each cycle, leachate was collected near the bottom of the column and analyzed for physical and chemical parameters including pH, redox potential (Eh), electrical conductivity (EC) and dissolved elements.

## **5.3 Investigation results**

### **5.3.1 pH, Eh and EC results**

The pH, Eh, and EC measurements are depicted in Figure 5.2. This figure illustrates a progressive increase in pH after each wetting-drying cycle, particularly noticeable in mixtures amended with 2% cement.

For unamended tailings, the pH values increased from 6.5 to 7.78, from 7.0 to 7.9 and from 6.9 to 7.8 respectively for fixture 1, 4 and 8. However, for tailings amended with 2% HE cement and muscovite proportions of 9.5%, 12.5%, and 15.5% (mixtures 3, 7, and 10), the pH increased from 7.5 to 8.21, from 7.4 to 8.84 and from 7.72 to 8.92 respectively for mixture 3, 5 and 10

In the case of tailings amended with 0.5% cement and 9.5% muscovite (mixture 2), the pH initially decreased between cycles 3 and 4, followed by an increase from cycle 6 onwards. This variation could be attributed to the rapid desaturation of the amended tailings, potentially leading to tailings

oxidation and subsequent acid generation. Similar behavior has been observed by other authors (Barast et al., 2014; Deschamps et al., 2009; Elghali et al., 2019; Hadimi et al., 2016).

Finally, it is important to recall that the higher % cement affects positively the pH values.

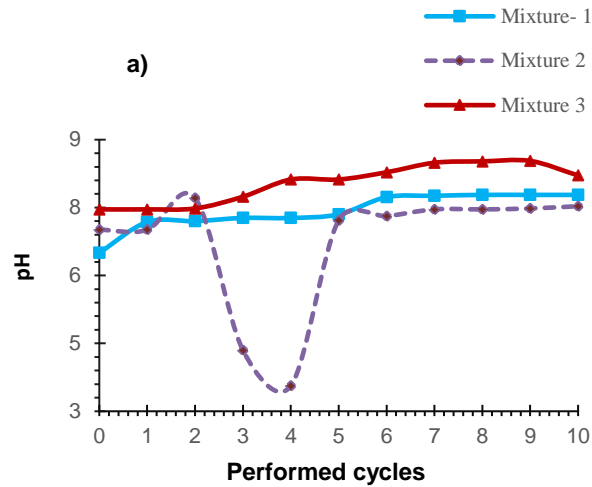


Figure 5.2 pH measured values in the water flush

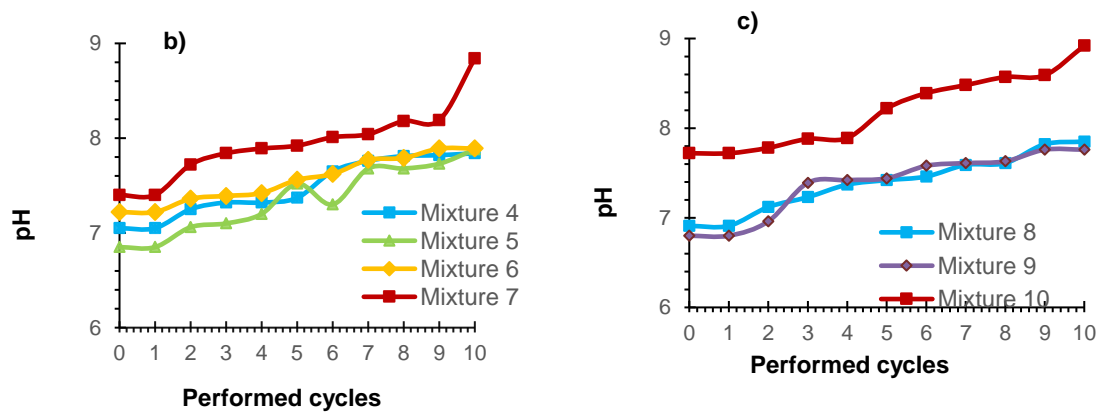


Figure 5.3 pH measured values in the water flush

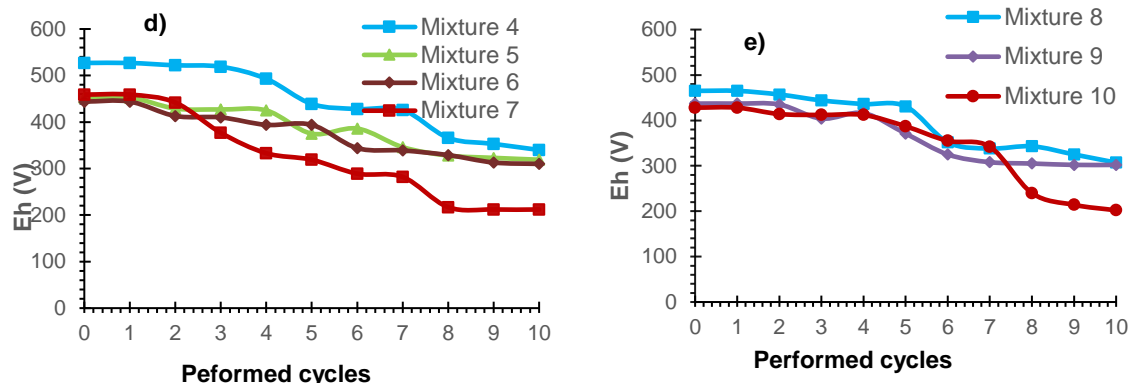


Figure 5.4 Eh measured values in the water flush

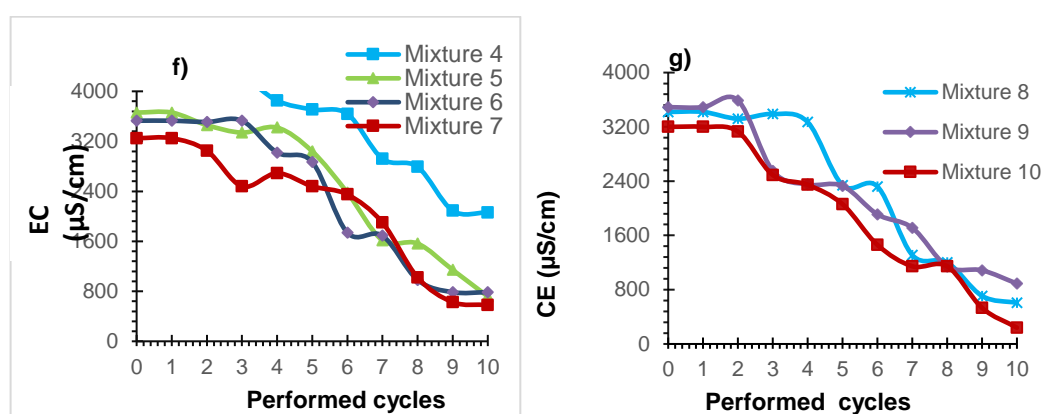


Figure 5.5 EC measured values in the water flush

The electrical conductivity (EC) values decreased from 4300 to 605  $\mu\text{S}/\text{cm}$  for unamended tailings across all muscovite contents. For tailings amended with cement and muscovite contents of 9.5%, 12.5%, and 15.5%, EC values decreased from 3490 to 717.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , from 3640 to 582  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , and from 3490 to 240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectively. Interestingly, the EC values of unamended tailings with 15.5% muscovite were slightly lower than those of tailings amended with 0.5% cement. This discrepancy could be attributed to the destruction of the cementitious matrix and the dissolution of hydration products (due to the small amount of cement) under the influence of wet-dry cycles, resulting in the release of metals.

Furthermore, for tailings amended with 2% cement, the EC was lower compared to those amended with 0%, 0.5%, and 1.5% cement after ten cycles for the same muscovite contents.

Additionally, the redox potential (Eh) decreased for all mixtures, with average values ranging from 496 to 202 mV.



As final remark, the effect of the deposition scenario did not have a real impact on the analysed parameters (comparison between Mixture 5 and 6).

### 5.3.2 Dissolved elements

For arsenic (As) measured concentration are presented in Figure 5.6. The higher initial concentrations were measured in the uncemented tailings; the values measured correspond to 5.6 mg/L, 9.4 mg/L, and 6.5 mg/L respectively for 9.5%, 12.5%, and 15.5% muscovite (mixture 1, 4 and 8). This Figure shows that the concentrations fluctuated during the first cycles; then a decreasing trend was observed for the different mixtures. The measured concentrations at the end of the test were between 0.01 and 0.2 mg/L, 0.02 mg/L and 0.19 mg/L and 0.02 and 0.1 mg/L respectively for 9.5%, 12.5%, and 15.5% muscovite.

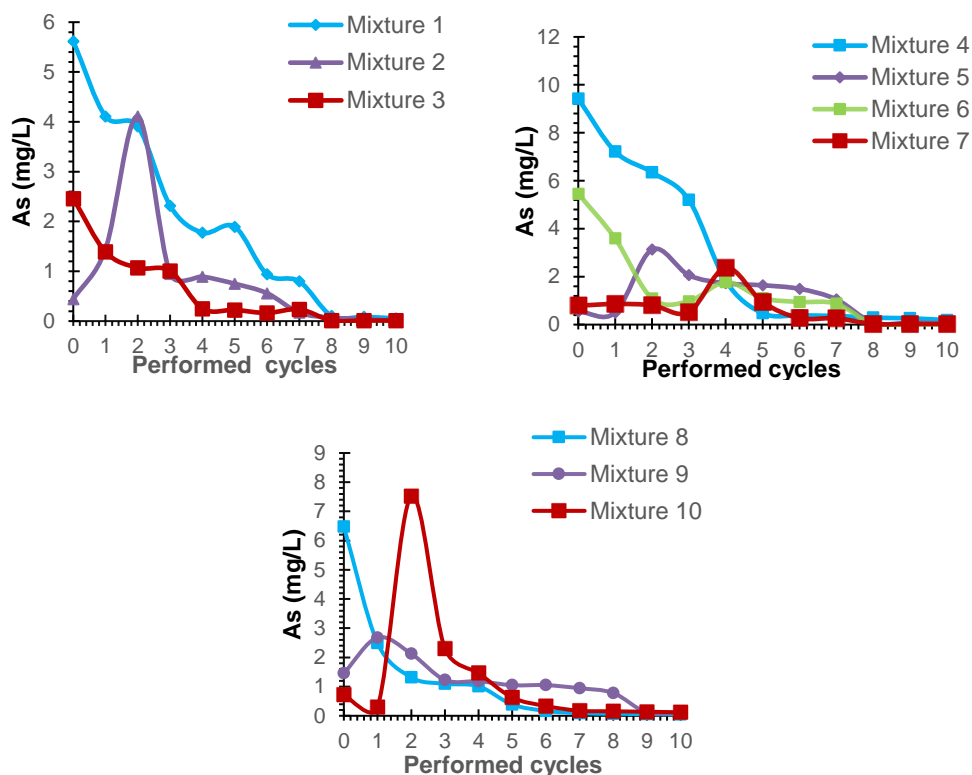


Figure 5.6 Measured As concentrations in the water flush

For the iron element and after cycle 5, all measured concentrations were below 2 mg/l (see figure 5.7).

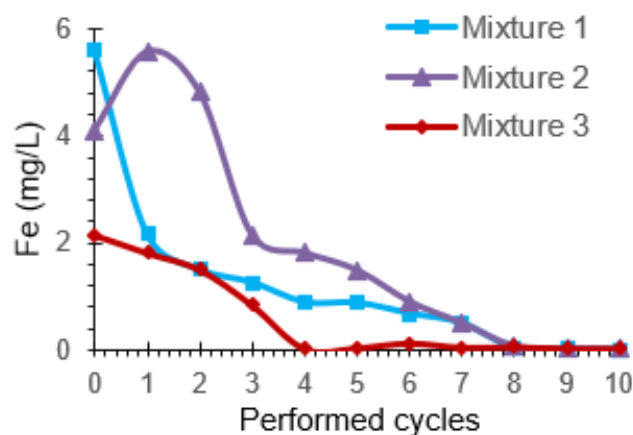


Figure 5.7 Measured iron concentrations in the water flush

For copper (Cu), the higher initial measured concentrations correspond to 0.52 mg/L, 2.06 mg/L, and 1.42 mg/L respectively for 9.5%, 12.5%, and 15.5% muscovite. Then, a decreasing trend was observed for the different mixtures (Figure 5.8). It is important to recall that for all the tested mixtures and after the first 4 cycles, the measured Cu concentration was below 0.01mg/L.

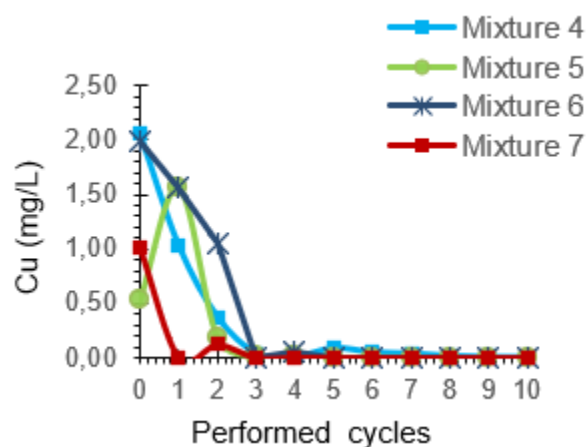


Figure 5.8 Measured Cu concentrations in the water flush

Higher initial measured concentrations of zinc (Zn) correspond to 0.96 mg/L, 2.80 mg/L, and 3.16 mg/L respectively for 9.5%, 12.5%, and 15.5% muscovite. For all the tested mixtures, fluctuations in the Zn concentrations were observed. However, all the measured concentrations were below 0.02 after the 8 cycles of WD (see Figure 5.9).

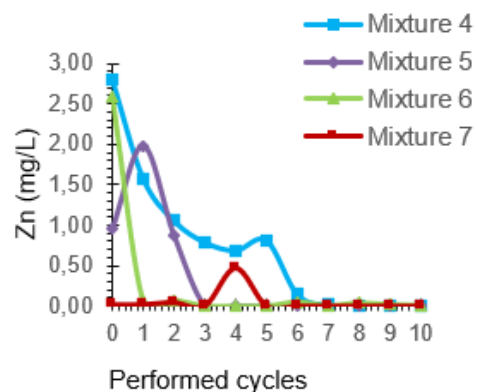


Figure 5.9 Measured Zn concentrations in the water flush

For lead (Pb), the higher initial measured concentrations correspond to 0.001 mg/L, 0.003 mg/L, and 0.019 mg/L respectively for uncemented tailings with 9.5%, 12.5%, and 15.5% muscovite. It is important to recall that for all the tested mixtures and after the first 4 cycles, the measured Pb concentrations were below 0.001 mg/L (see Figure 5.10).

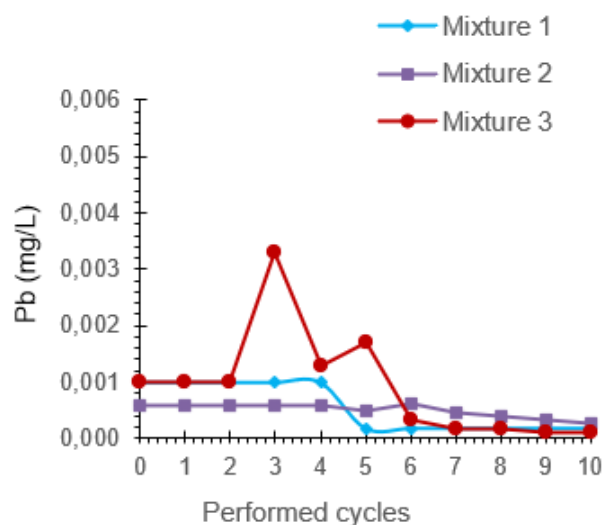


Figure 5.10 Measured Pb concentrations in the water flush

As a final remark, despite the early release of dissolved elements, copper (Cu) and zinc (Zn) stabilized more rapidly than the other elements. This could be due to the precipitation of these metals as a result of the alkalinity of the leachate. This aspect is discussed in the following section.

## 5.4 Discussion

The Pourbaix diagram, also known as the potential-pH diagram, is a tool used in electrochemistry to predict the stability of different chemical species under various conditions of electrochemical potential and pH. This tool is employed to evaluate the stability domains of Arsenic (As), Copper (Cu), and Iron (Fe) in amended tailings with 2% cement. This assessment helps to explain or justify the low measured concentration of these chemical elements in water flush.

The investigation results are presented in Figures 5.8, 5.9, and 5.10 as scatter plots with red solid lines. Figure 5.11 indicates that Arsenic becomes more acidic above 0.5 volts with a pH of less than 4. Additionally, these figures illustrate that aqueous arsenic species shift from more acidic forms ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ;  $\text{HAsO}_4^-$ ) to less acidic forms ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$ ;  $\text{AsO}_4^{3-}$ ) as pH increases ( $\text{pH} > 7$ ). This behavior could be explained by the trapping of as in the C-S-H (calcium silicate hydrate) phases, as well as the loss of one to two protons ( $\text{H}^+$ ) due to the partial dissociation of hydrogen ions (Chatain, 2004; Dzombak and Morel, 1991; Coussy et al., 2013).

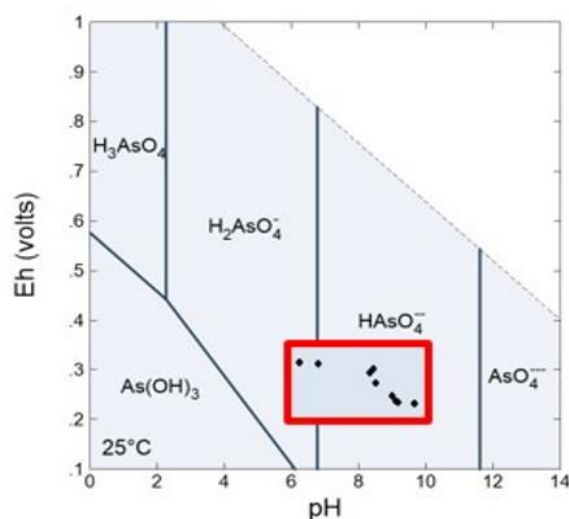


Figure 5.11 Pourbaix diagram for Arsenic

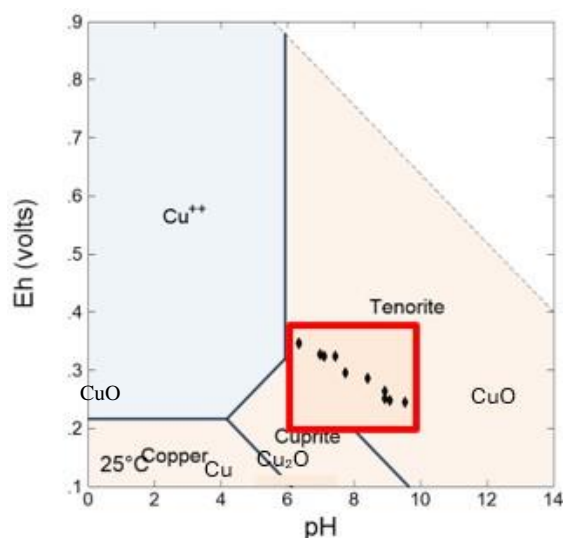


Figure 5.12 Pourbaix diagram for Copper

Figures 5.12 and 5-13 show that precipitated forms of copper oxides ( $\text{CuO}$ ) and iron hydroxides ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) are the most dominant chemical species at  $\text{pH} > 7$ .

This observation could justify their low concentration in the leachates. These species are chemically stable under high pH conditions (Bernd and Bernd, 2007; Chandra and Gerson, 2009). The chemical stability of these species is thought to be due to their resistance to dissolution, allowing them to persist in the soil or environment without posing a risk to living beings.

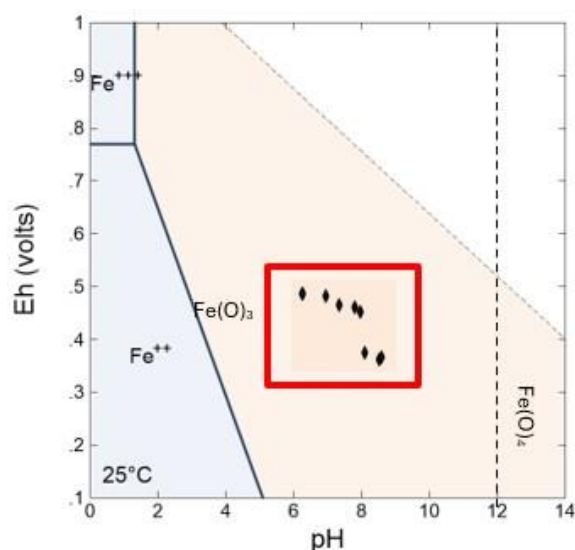


Figure 5.13 Pourbaix diagram for Iron

## 5.5 Conclusion

The experimental results of this study highlight the performance of the cementitious amendment in terms of chemical stabilization of densified, solidified and stabilized tailings containing phyllosilicates (muscovite). These results show a stable pH around 8 and 8.9 for amended tailings with 2% cement.

For tailings with 15.5% of muscovite, electrical conductivity stabilized at 240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  for the 2% cement mixture, around 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  for the 0.5% and 1.5% mixture and 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  for the unamended mixture. These results illustrate the effect of % cement on the dissolved mineralization of leachate water.

Redox potential stabilized at around 400 mV for unamended mixture with 0.5% cement, 300 mV for mixes with 0.5% cement and 200 mV for mixture amended with 2% cement.

A considerable reduction in arsenic and iron concentrations was also observed right from the start of the tests for the mixture with 2% cement compared with the unamended mixture and those amended with 0.5% and 1.5% cement.

Zinc, nickel and copper were completely immobilized during the cycles. In addition, only lead showed the opposite behavior in the 2% cement mixture, but with very low concentrations for all types of mixtures.

Pourbaix diagrams indicate that 2% cement amendments reduced the leaching of chemical species through the processes of precipitation (Fe, Cu) from secondary phases and acidity neutralization (As). As a result, 2% cement mixture offer better immobilization and leaching reduction of metals. However, Pb, Ni and Zn were released in the 2% cement amendments with 12.5% and 15.5% muscovite.

Nevertheless, all metals stabilized at the end of the tests for all types of mixtures.

Finally, it can be concluded that hydraulic binder-based Solidification-Stabilization is a promising technique for the chemical stabilization of densified mine tailings containing phyllosilicates. However, the percentage of cement must be taken into account in relation to the proportion of phyllosilicates for effective application of the technique.

## 5.6 Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the Fonds de recherche du Québec, Nature et technologies (FRQNT), Agnico Eagle Mines ltd et IAMGOLD Corporation and the Research Institute of Mines and Environment (RIME UQAT-Polytechnique) for their financial support.

## REFERENCES

- ASTM C143/C143M - 15a. 2015. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. ASTM International Annual Book of ASTM. 04.02. American Society of Testing Material, West Conshohocken, PA.
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. et 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., Mbonimpa, M., Jollette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M. et Riffon, O. (2002b). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. Dans. Défis & Perspectives: Symposium.
- Barast, Benzaazoua, M., Maqsoud, A. et Bussière, B. (2014). Long term hydro-geochemical behaviour of surface paste disposal in field experimental cells. Dans. Proceedings of the Conference Canadienne de Géotechnique, GeoRegina, CD-Rom, Regina, Slovakia.
- Belem, T. et Benzaazoua, M. (2008b). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
- Belem, T., Benzaazoua, M. et Bussière, B. (2000). Mechanical behaviour of cemented paste backfill. Dans. Proc. of 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal.
- Benzaazoua, M., Belem, T., Ouellet, S. et Fall, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement a court, a moyen et a long terme. *Proceedings of Apres-mines*.
- Benzaazoua, M., Fall, M. et Belem, T. (2004a). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I. et Bussière, B. (2004). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 17(2), 233-243.
- [Record #334 is using a reference type undefined in this output style.]
- Bussière, 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., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. W. et 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.

- Chandra, A. et Gerson, A. (2009). A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 97-110.
- Chatain, V. (2004). Caractérisation de la mobilisation potentielle de l'arsenic et d'autres constituants inorganiques présents dans les sols issus d'un site minier aurifère [INSA LYON].
- Coussy, S. (2011). Stabilisation de rejets miniers pollués à l'arsenic à l'aide de sous-produits cimentaires: étude de l'influence de la cristalochimie sur le risque de mobilisation des polluants. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue (Canada).
- Coussy, S., Benzaazoua, M., Bussière, B., Blanc, D. et Moszkowicz, P. (2013). Stabilisation de l'arsenic dans les remblais miniers en pâte cimentée. *Déchets Sciences et Techniques*, 64, 4-12.
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B. et Aubertin, M. (2009). Les effets d'amendements alcalins sur des résidus miniers sulfureux entreposés en surface: Cas des dépôts en pâte. *Déchets Sciences et Techniques*, 54, 19-30.
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M. et Belem, T. (2008). Microstructural and geochemical evolution of paste tailings in surface disposal conditions. *Minerals Engineering*, 21(4), 341-353.
- Dzombak, D. A. et Morel, F. M. (1991). *Surface complexation modeling: hydrous ferric oxide*. John Wiley & Sons.
- Elghali, A., Benzaazoua, M., Bussière, B. et Genty, T. (2019). In situ effectiveness of alkaline and cementitious amendments to stabilize oxidized acid-generating tailings. *Minerals*, 9(5), 314.
- Fränkle, B., Morsch, P., Kessler, C., Sok, T., Gleiß, M. et Nirschl, H. (2022). Iron Ore Tailings Dewatering: Measurement of Adhesion and Cohesion for Filter Press Operation. *Sustainability*, 14(6), 3424.
- Godbout, J., Bussière, B. et Belem, T. (2007). Evolution of cemented paste backfill saturated hydraulic conductivity at early curing time.
- Hadimi, Mostafa, B., Abdelkadir, M. et Bruno, B. (2016). Effect of cementitious amendment on the hydrogeological behavior of a surface paste tailings' disposal. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 1-15.
- Ichrak, H., Mostafa, B., Abdelkadir, M. et Bruno, B. (2016). Effect of cementitious amendment on the hydrogeological behavior of a surface paste tailings' disposal. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1, 1-15.
- Létourneau, M. (2012). Effet du gel et du dégel sur les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux.
- Ma, L.-H., Chen, J., Zhao, Y.-F., Zhang, C., Liu, R. et Ren, S. (2022). Water Content and Bedding Angle Effects on the Mechanical Properties and Micro-/Macro-Failure Mechanism of Phyllite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-19.
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M., Plante, B. t. et Cyr, J. (2012). Tracer tests to evaluate hydraulic residence time in limestone drains: Case study of the Lorraine site, Latulipe,



- Québec, Canada. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(4), 275-291. <https://doi.org/10.1080/17480930.2011.613567>
- Maqsoud, A., Neculita, C. M., Bussière, B., Benzaazoua, M. et Dionne, J. (2016). Impact of fresh tailing deposition on the evolution of groundwater hydrogeochemistry at the abandoned Manitou mine site, Quebec, Canada. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 9054-9072.
- Marques, A., Oliveira, S., Paes, B., Paes, I. et Coelho, A. (2020). Evaluation of the Liquefaction Susceptibility of Filtered Iron Ore Tailings from the Iron Quadrangle (Brazil). Dans. *Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*.
- Newman, P., White, R. et Cadden, A. (2001). Paste, the future of tailings disposal. Dans. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mining and the Environment*, Skelleftea, Sweden.
- Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. et Aubertin, M. (2006). Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 19(5), 407-419.
- Ren, J., Vanapalli, S. K., Han, Z., Omenogor, K. O. et Bai, Y. (2019). The resilient moduli of five Canadian soils under wetting and freeze-thaw conditions and their estimation by using an artificial neural network model. *Cold Regions Science and Technology*, 168, 102894.

## CHAPITRE 6 COMPLÉMENT DE RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre expose les résultats qui n'ont pas été présentés dans les deux (2) articles rédigés. Ces résultats concernent : le suivi du comportement hydrogéologique (volume d'eau recueilli et la teneur en eau volumique) dans les colonnes; l'impact de la variation de teneur en muscovite et l'effet de la proportion du ciment sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des mélanges soumis à des cycles de gel-dégel; et sur la capacité de rétention d'eau (CRE) des résidus densifiés solidifiés et stabilisés (RmD-S/S). Tous ces résultats seront décrits et discutés dans les sections suivantes.

Il est à souligner que l'impact de la variation de la teneur en muscovite, l'effet du ciment sur la résistance à la compression uniaxiale (UCS) et la chimie ne seront pas discutés dans ce chapitre en raison du fait que les résultats d'analyse de l'UCS de tous les mélanges ont été compilés et ont fait l'objet d'une description dans l'article 1 et la chimie dans l'article 2. Toutefois, le reste des résultats de ces analyses seront présentés à l'annexe A et B.

### 6.1 Résultats du suivi du comportement hydrogéologique des mélanges au cours des cycles de mouillage-drainage

L'évaluation de la distribution de la teneur en eau dans les différents mélanges a été effectuée en deux étapes. La première étape a consisté à mesurer le volume d'eau percolé et récupéré dans les réservoirs placés en dessous des colonnes à la fin de chaque cycle de mouillage-drainage. La deuxième étape a été effectuée à travers l'enregistrement des teneurs en eau volumiques à l'aide des sondes de teneur EC-5. Les résultats de ces mesures sont présentés en fonction de la teneur en muscovite (9,5; 12,5 et 15,5%) et de la proportion du ciment (0; 0,5; 1,5 et 2%) correspondant au Mél# 1, Mél# 2, Mél# 3, Mél# 4, Mél# 5, Mél# 6, Mél# 7, Mél# 8, Mél# 9, Mél# 10.

#### 6.1.1 Volume d'eau récupéré

##### 6.1.1.1 Mélanges avec 9,5% de muscovite amendés et non amendés

Les résultats des mesures de la quantité d'eau drainée sont présentés à la figure 6.1, sous forme d'histogrammes. Cette figure montre l'évolution de la quantité d'eau drainée en fonction du temps.

Pour le Mél# 1 (sans amendement - histogrammes bleus), le volume d'eau drainé a varié entre 1,3 et 1,5 litre au cours des trois premiers cycles de mouillage-drainage. À partir du 4<sup>ème</sup> jusqu'au 10<sup>ème</sup>

cycle, une augmentation importante du volume d'eau drainé a été observée avec des valeurs passant de 1,5 à 2,3 litres. Ce comportement pourrait être attribué à l'expansion des fissures qui ont servi de chemin préférentiel de l'eau en raison des cycles répétés de mouillage-drainage.

Pour le Mél# 2 (0,5 % ciment - histogrammes rouges), le volume d'eau drainé a connu une variation dès les premiers cycles et cela, jusqu'à la fin de l'essai. Toutefois, le plus important volume (2, 3 litres), a été recueilli au 5<sup>ème</sup> cycle. Cette variation pourrait s'expliquer par l'évolution de la microstructure marquée par l'apparition de nouvelles fissures.

Concernant les Mél# 3 (2% ciment - histogrammes verts), une percolation très lente a marqué le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> cycle. Cela s'est justifié par les petits volumes d'eau (0,2 à 0,3 litre) récupérés et l'observation d'une eau stagnante à la surface des mélanges dans les colonnes. La stagnation de l'eau pourrait être expliquée par la formation des produits d'hydrates (carapace) à la surface des mélanges. Par la suite, une augmentation exponentielle du volume d'eau (1,2 litres) a été observée à partir du 3<sup>ème</sup> cycle. Cette augmentation du volume d'eau drainé pourrait être attribuée à la dissolution des produits d'hydrations provoquant ainsi une augmentation de la porosité des mélanges. Le volume d'eau a légèrement baissé à 1,0 litre au 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> cycle, avant d'augmenter à 1,3 litres au 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> cycle. À partir du 8<sup>ème</sup> cycle, le volume d'eau récolté est resté relativement constant (1,2 litres) jusqu'à la fin de l'essai. Ce comportement pourrait être dû au processus de cimentation qui a permis ainsi la réduction de la perméabilité de ces mélanges (Belem et al., 2000; Elghali et al., 2019; Godbout et al., 2007).

La figure 6.1 montre également que, malgré les quelques variations présentées par le Mél# 3 (2% de ciment), ce mélange a enregistré les plus faibles volumes d'eau récoltés comparativement aux Mél# 1 et Mél# 2 (0% et 0,5% de ciment, respectivement).

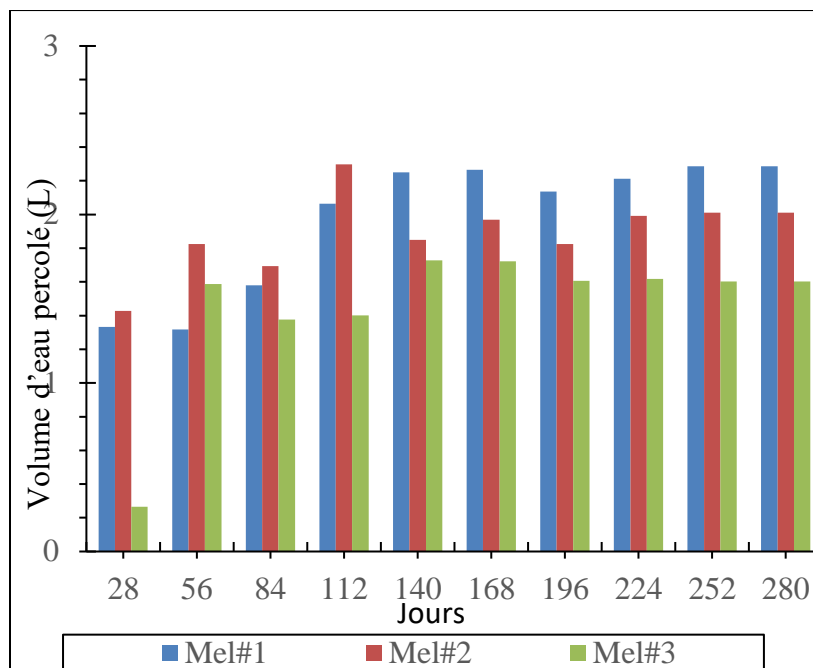


Figure 6.1 Volume d'eau percolé à travers les mélanges de 9,5% de muscovite non amendés et amendés de 0,5 et 2% de ciment

#### 6.1.1.2 Mélanges avec 12,5% de muscovites non amendés et amendés

Les résultats des mesures de volumes d'eau récoltés sont présentés à la figure 6.2.

Pour le Mél# 4 (non amendé - histogramme noir), on constate que le volume d'eau drainé du 1<sup>er</sup> cycle au 4<sup>ème</sup> cycle était situé entre 1,2 et 1,7 litres. À partir du 5<sup>ème</sup> cycle, une variation et une augmentation progressive ont été observées jusqu'à atteindre un volume d'eau recueilli de 2,3 à 2,4 litres du 8<sup>ème</sup> au 10<sup>ème</sup> cycle. Ces variations et cette augmentation du volume d'eau pourraient être expliquées par le caractère évolutif de la microstructure des mélanges sous l'effet des cycles de mouillage-drainage. Ce comportement est typique des matériaux fins (Eigenbrod, 1996; Qi et al., 2006).

Pour le Mél# 5 (0,5 % ciment - histogrammes verts), le volume d'eau collecté a peu varié (1,6 à 2,0 litres). Cependant, le 4<sup>ème</sup> cycle a présenté le plus grand volume d'eau drainé avec une valeur de 2,2 litres.

Pour le Mél# 6 (1,5% ciment - histogrammes gris), le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> cycle a connu de faibles volumes d'eau récoltés (0,9 et 1,0 litre). Puis, une augmentation du volume (2,7 litres) a été constatée au 3<sup>ème</sup> cycle; et une baisse de volume (2,1 litres) au 4<sup>ème</sup> cycle. Au 5<sup>ème</sup> cycle, une augmentation

remarquablement du volume d'eau drainé est survenue et le volume récolté a atteint 4,0 litres. Cette augmentation fulgurante, pourrait être due à l'apparition d'une fissure majeure qui a occasionné l'augmentation du taux de drainage. A partir du 6<sup>ème</sup> cycle, le volume d'eau a grandement baissé jusqu'à 2,4 litres et cela jusqu'à la fin de l'essai. Ce comportement pourrait être dû au remplissage et la cicatrisation de la fissure par les produits d'hydrates aux cycles suivants.

Pour le Mél# 7 (2% ciment - histogrammes violets), le plus faible volume d'eau (0,3 et 0,5 litre) a été récupéré aux deux premiers cycles. Ensuite, une augmentation importante du volume d'eau (1,9 litres) a été remarquée du 3<sup>ème</sup> au 6<sup>ème</sup> cycle. Le volume d'eau a par la suite légèrement diminué (1,7 litres) et il est resté quasi constant jusqu'à la fin des cycles.

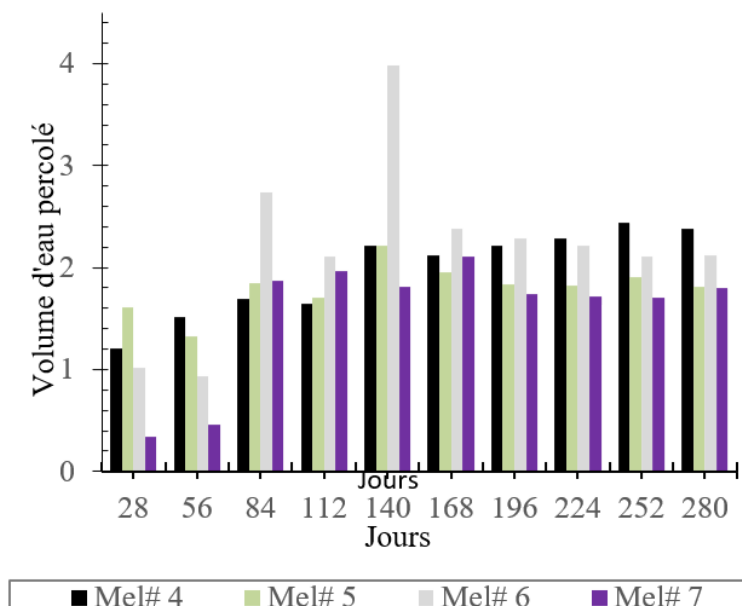


Figure 6.2 Volume d'eau percolé à travers les mélanges Mélange 4, Mélange 5, Mélange 6, Mélange 7 (12,5% de muscovite non amendés et amendés de 0,5 ; 1,5 et 2% de ciment)

### 6.1.1.3 Mélanges avec 15,5% de muscovite non amendés et amendés

Sur la figure 6.3 le Mél# 8 (non amendé - histogrammes bleus et Mél# 9 (0,5 ciment - gris clair), a présenté un comportement similaire avec des volumes d'eau récoltés presque similaires tout au long des cycles. Les plus faibles volumes d'eau ont été récoltés aux deux premiers cycles. Toutefois, le Mél# 8 a présenté un volume d'eau drainé un peu plus faible (1,1 contre 1,6 litres) au 1<sup>er</sup> cycle; et légèrement faible (1,2 contre 1,3 litres) au 2<sup>ème</sup> cycle par rapport au Mél# 9. Puis, à partir du 3<sup>ème</sup> cycle, est survenue une augmentation progressive du volume d'eau (1,9 litre) des

deux mélanges (Mél# 8 et Mél# 9) pour atteindre 2,4 litres vers la fin de l'essai. Ce comportement pourrait être attribué à la dissolution du ciment conduisant ainsi à la destruction de la structure des mélanges sous l'effet des cycles.

Le Mél# 10 (2% ciment - histogrammes bleu clair), a présenté une variation de volumes durant les quatre premiers cycles avec de faibles volumes d'eau récoltés (1,1 et 1,5 litre). Le volume drainé a ensuite légèrement augmenté aux six derniers cycles (1,7 litres).

Nous pouvons constater que la différence entre les volumes d'eau récoltés est plus ou moins faible pour les Mél# 8, Mél# 9 et Mél# 10 par rapport aux Mél# 1 à Mél# 7. Ce comportement pourrait s'expliquer par la teneur élevée de la muscovite dans ces mélanges qui pourrait avoir une influence négativement sur le développement de la résistance mécanique (Said et al., 2009); un élément essentiel dans la solidification pour la garantie et une bonne cohésion de la microstructure (Belem et al., 2000; Ouellet et al., 2007; Sari et al., 2022; Wang et al., 2023).

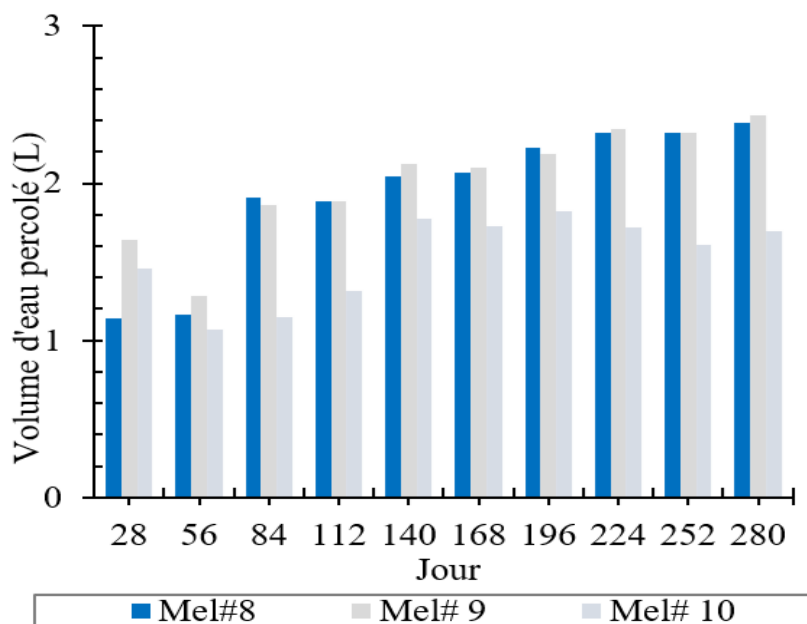


Figure 6.3 Volume d'eau percolé à travers les mélanges Mélange 8, Mélange 9, Mélange 10, Mé (15,5% de muscovite non amendés et amendés de 0,5 et 2% de ciment)

## 6.2 Évolution des teneurs en eau volumique

Dans le but de confirmer les volumes d'eau récoltés et de mieux comprendre lequel des mélanges retient plus ou moins d'eau, il est nécessaire d'étudier la teneur en eau volumique et le degré de saturation de chaque type de mélange soumis aux cycles de mouillage-drainage.

Les résultats des mesures des teneurs en eau volumiques sont présentés sous forme de graphiques et montrent l'évolution de la teneur en eau volumique pendant toute la durée des essais. Chaque graphique est constitué de deux formes schématisant deux périodes. Une période de mouillage qui correspond généralement à un sommet et une période de drainage ou séchage qui correspond à un fond. Les sommets représentent les teneurs en eau volumiques les plus élevées et les creux représentent les plus faibles teneurs en eau volumiques.

Le degré de saturation ( $s_r$ ) a été calculé à l'aide de la porosité de mise en place et de la teneur en eau volumique mesurée par la formule suite :

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{tot}} = n \times s_r \quad (6.1)$$

$$s_r = \frac{\theta}{n} \quad (6.2)$$

Où  $\theta$  est la teneur en eau volumique mesurée et  $n$ , la porosité

### 6.2.1 Mélanges avec 9,5% de muscovite

La figure 6.4 montre que les teneurs en eau volumiques diminuent de façon progressive après la fin de la période du mouillage. Au cours de la période du premier mouillage, la teneur en eau volumique des Mél# 1, Mél# 2 et Mél# 3 a augmenté jusqu'à des valeurs de 0,30, 0,32 et 0,47 respectivement. Cependant, cette teneur en eau volumique ne demeure pas constante jusqu'au prochain rinçage. Il a diminué progressivement jusqu'à des valeurs de 0,23, 0,24 et 0,37. La diminution de la teneur en eau volumique pourrait être associée au développement d'un réseau de fissures favorisant ainsi l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'eau dans les mélanges. Durant les quatre premiers cycles de mouillage, la teneur en eau volumique a varié entre 0,24 et 0,22 pour le Mél# 1 et Mél# 2. Par la suite, elle a baissé jusqu'à 0,20; correspondant à un degré de saturation de 54% à partir du 5<sup>e</sup> cycle, jusqu'à la fin de l'essai. Pour le Mél# 3, la teneur en eau volumique était comprise entre 0,36 et 0,35 jusqu'au 5<sup>ème</sup> cycle. À partir du 6<sup>ème</sup> cycle, elle est restée quasi constante jusqu'à la fin de l'essai, avec une valeur de 0,34 environ, correspondant à un degré de saturation de 91%.

Le Mél# 3 (2% de ciment) a présenté la teneur en eau volumique la plus élevée. Cette teneur corrobore avec le faible volume d'eau récupéré; et cela concorde également avec l'observation visuelle d'eau stagnante dans les colonnes. Le faible taux de percolation de l'eau pourrait être due

à l'effet du ciment qui aurait changé la microstructure et réduit la porosité et la perméabilité des mélanges par la formation de minéraux hydratés au cours du processus d'hydratation (Belem et al., 2000; Deschamps et al., 2008; Godbout et al., 2007).

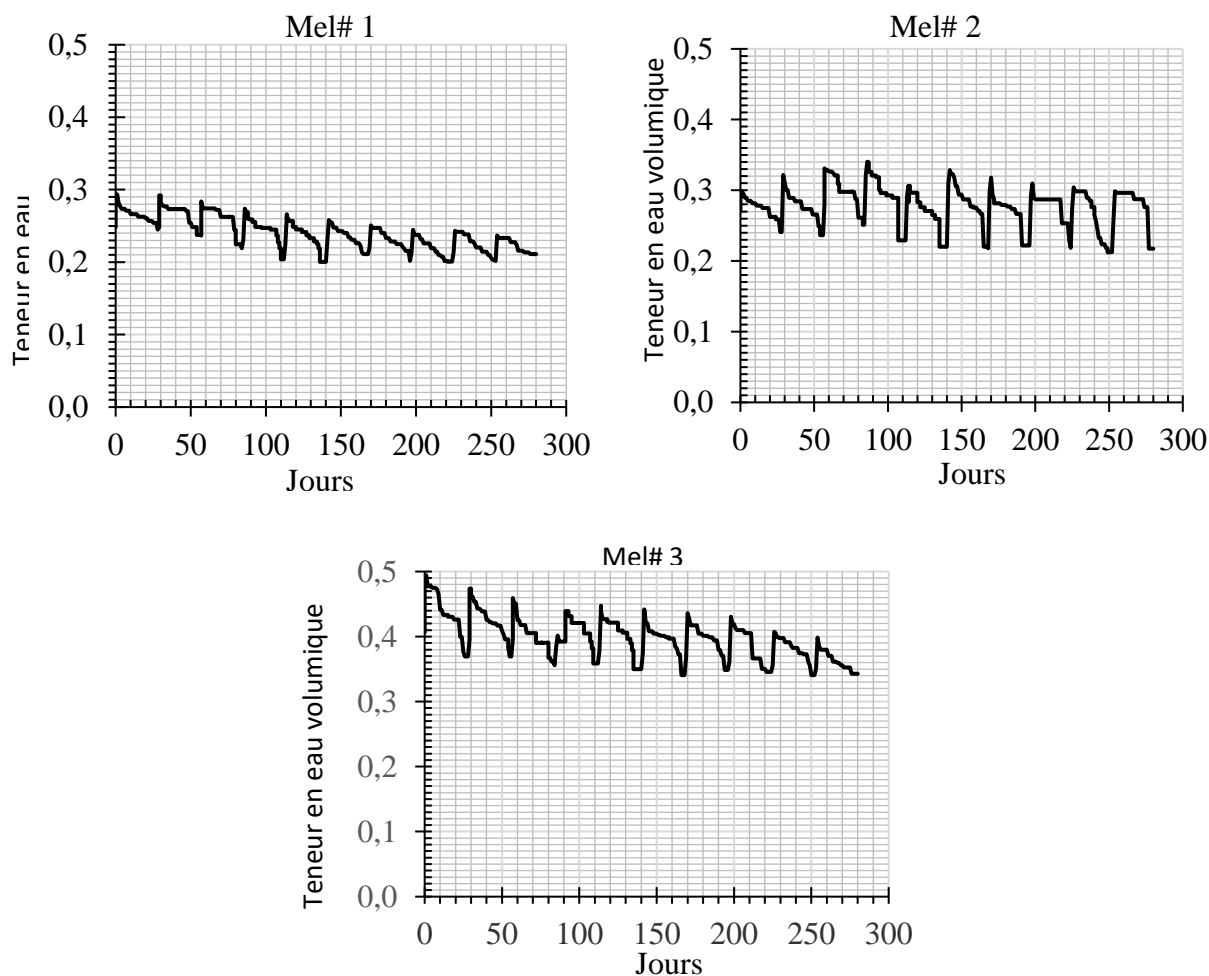


Figure 6.4 Évolution des teneurs en eau volumiques des mélanges 1,2 &3 en fonction du temps

### 6.2.2 Mélanges avec 12,5% de muscovite

Il est à préciser que la sonde de teneur EC-5 n'a pas fonctionné pour la colonne du Mél#5. Pour cette raison, la teneur en eau volumique de ce mélange ne sera pas présentée dans cette section.

Les teneurs en eau volumique mesurées au niveau des mélanges Mél#4 Mél#6 et Mél#7 sont présentées aux figures 6.5 et 6.6. Ces dernières montrent que les teneurs en eau volumiques sont plus élevées aux deux premiers cycles de mouillage avec des valeurs de 0,39; 0,42 et 0,45 respectivement. Ce qui indique une saturation complète des mélanges pendant la phase de



mouillage. Par la suite, l'eau s'est drainée progressivement au cours de la période de drainage jusqu'à des valeurs de teneur en eau volumique comprises entre 0,23 et 0,24 pour le Mél# 4 et le Mél# 6 du 1<sup>er</sup> au 4<sup>ème</sup> cycle de rinçage; et de 0,32 pour le mél# 7. Ce qui correspond à un degré de saturation de 62 % pour Mél# 4 et Mél# 6 et 86% le Mél# 7. La teneur en eau volumique la plus faible (0,18) a été observée au 5<sup>ème</sup> cycle pour le Mél# 6, correspondant à un degré de saturation de 48%. Ceci pourrait être dû à la présence d'une fissure de dessiccation qui a favorisé le drainage rapide de l'eau ou à une éventuelle réduction de la perméabilité. Par la suite, la teneur en eau volumique a augmenté jusqu'à une valeur d'environ 0,23 au 6<sup>ème</sup> cycle de mouillage et elle est restée quasi constante jusqu'à la fin de l'essai. La teneur en eau volumique du Mél# 7 a connu une légère diminution (0,28) au 5<sup>ème</sup> cycle avant de remonter à 0,31 au 6<sup>ème</sup> cycle et 0,32 à la fin de l'essai. La teneur élevée du mél# 7 pourrait être expliquée d'une part, par une bonne capacité de rétention d'eau en raison de l'effet du ciment et d'autre part, par la présence d'un faible réseau de fissures réduisant ainsi l'écoulement de l'eau vers le bas des colonnes(Deschamps, 2009; Hadimi, 2014).

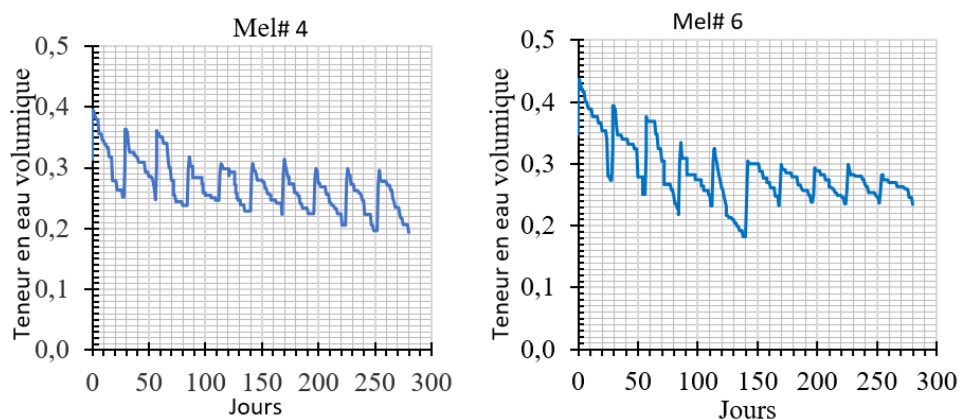


Figure 6.5 Évolution des teneurs en eau des mélanges 4 & 6 en fonction du temps

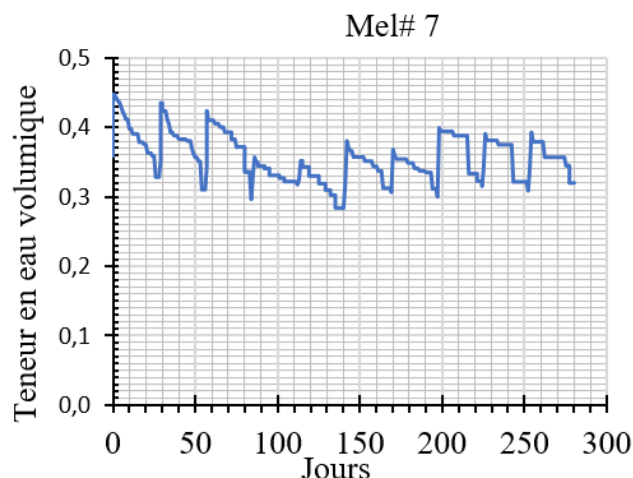


Figure 6.6 Évolution des teneurs en eau du mélange 7 en fonction du temps

### 6.2.3 Mélanges avec 15,5% de muscovite

Les Mél# 8, Mél# 9 ont montré un comportement similaire au cours de toute la période de l'essai (Figure 6.7). Les teneurs en eau volumiques les plus élevées ont été mesurées à la fin des périodes de mouillage et sont comprises entre 0,36 et 0,40 respectivement. Ensuite, des variations importantes au niveau des teneurs en eau volumiques ont été notées au 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> cycle du Mél# 9 (0,22 et 0,23). Ensuite une diminution progressive a été observée pour les deux mélanges (Mél# 8 et Mél# 9) au fur et à mesure que les cycles avançaient en raison de la désaturation progressive avec des valeurs comprises entre 0,21 et 0,20. Ce qui correspond à un degré de saturation de 54 et 56%. La teneur en eau volumique du Mél# 10 a également présenté une valeur élevée pendant les périodes de mouillage indiquant ainsi une saturation totale des mélanges avec une valeur située entre 0,47 et 0,48 aux deux premiers cycles de mouillage. Cette teneur a baissé au cours des cycles jusqu'à une valeur de 0,30 environ jusqu'au 7<sup>ème</sup> cycle, ce qui correspond à un degré de saturation de 81%.

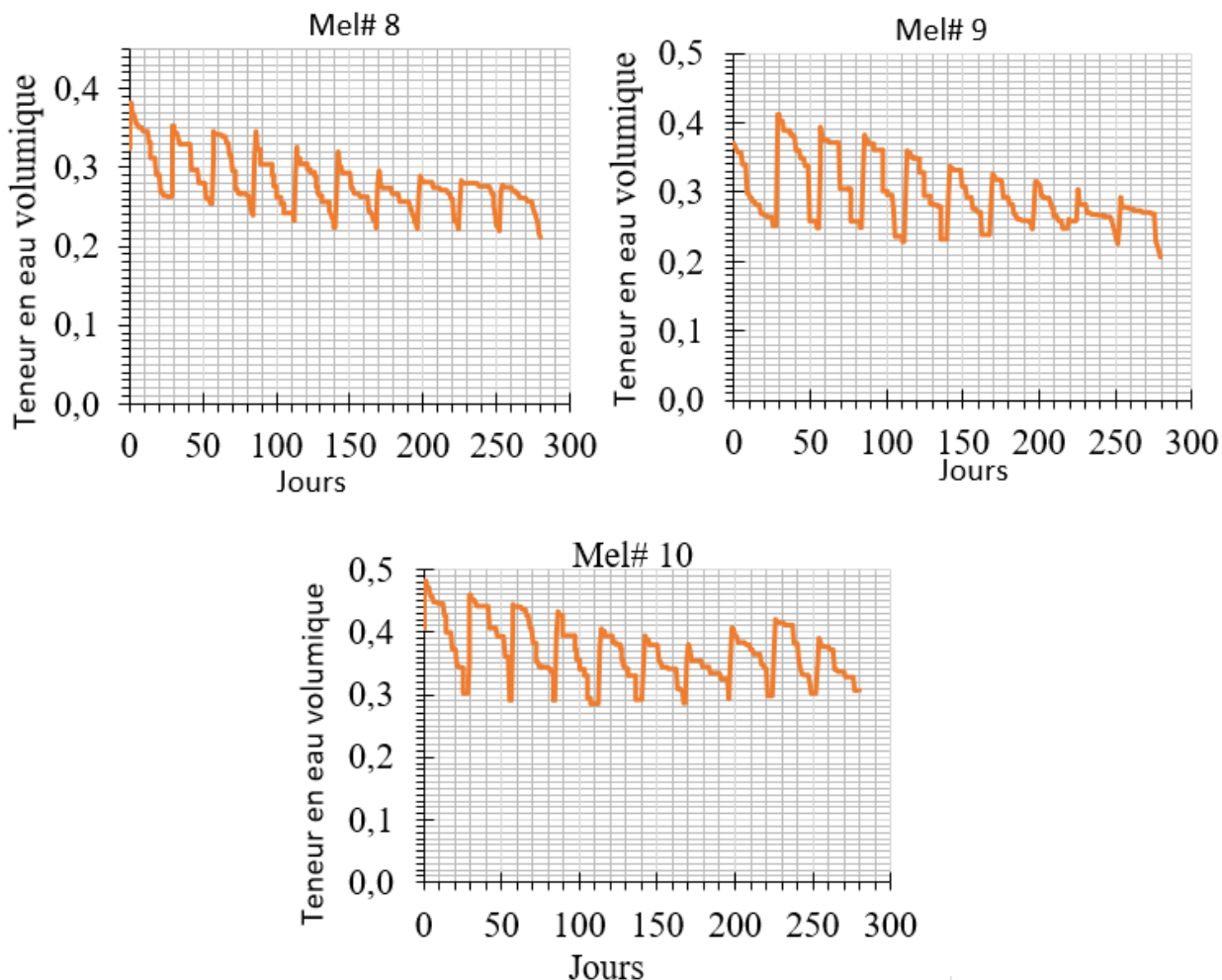


Figure 6.7 Évolution des teneurs en eau des mélanges 8,9 &10 en fonction du temps

### 6.3 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des mélanges soumis aux cycles de gel-dégel

Cette section présente les résultats d'évaluation des facteurs d'aggravation des effets des cycles de gel-dégel sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ); et l'effet de l'ajout du ciment sur la conductivité hydraulique. Les résultats de l'effet des cycles de gel-dégel sur la conductivité hydraulique saturée décrits dans l'article 1 ne seront pas présentés dans cette section.

La  $k_{sat}$  est un paramètre important dans la gestion des résidus miniers en surface soumis à des conditions climatiques nordiques, c'est pourquoi sa prise en compte et son évaluation a fait l'objet d'une partie de ce projet d'étude. Plusieurs facteurs peuvent influencer la  $k_{sat}$  des mélanges non

amendés et amendés. Parmi ces facteurs, on peut citer quelques-uns tel que la granulométrie, la teneur en muscovite, la proportion du ciment et la porosité.

Pour évaluer l'impact de la muscovite et l'effet de la proportion du ciment sur l'évolution de la  $k_{sat}$  des résidus non amendés (témoins) et amendés, soumis à des cycles de gel-dégel, il est nécessaire de faire une comparaison des résultats d'analyse des différents types de mélanges conçus. Plusieurs auteurs ont démontré que l'utilisant du ciment comme agent liant, permet de réduire la porosité et la perméabilité des matériaux cimentaires (Belem et al., 2000; Deschamps et al., 2008; Godbout et al., 2007; Yilmaz, 2010). Cependant, il convient également de souligner que la muscovite peut impacter négativement le développement de la résistance à la compression uniaxiale. En tant que matériau argileux, la muscovite peut influencer sur la perméabilité des matériaux cimentaires en fonction de divers éléments tels que : la proportion ajoutée, la granulométrie et la dispersion (Loorents et al., 2007; Miskovsky, 2004; Said et al., 2009). Afin d'évaluer l'effet du ciment et l'impact de la teneur en muscovite sur la perméabilité ou la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) des mélanges préparés, des essais de perméabilité ont été réalisés à l'aide du perméamètre à paroi flexible et à charge variable sur les différents mélanges tels que précédemment décrits dans le chapitre 3. Les résultats de ces essais sont présentés en fonction de la proportion du ciment (0; 0,5; 1,5 et 2%) utilisée dans les mélanges afin de les comparer.

### **6.3.1 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ): Cas des mélanges sans amendement**

Les résultats de la  $k_{sat}$  des Mél# 1, Mél# 4 et Mél# 8 soumis aux cycles de gel-dégel sont présentés à la Figure 6.8.

La figure 6.8 montre que durant les premiers cycles, les  $k_{sat}$  des différents mélanges sont sensiblement similaires. Ces résultats montrent également que les mélanges ont présenté une évolution et une augmentation progressive de la  $k_{sat}$ . On peut également observer que les augmentations les plus importantes ont été observées au niveau du mélange 8.

La faible valeur de la  $k_{sat}$  au début des cycles pourrait être due à l'influence de la teneur élevée de la muscovite en raison de sa granulométrie fine qui a permis de réduire la perméabilité des mélanges. Par la suite, la  $k_{sat}$  a augmenté d'un ordre de grandeur pour tous les mélanges à partir du 4<sup>ème</sup> cycle jusqu'à la fin des cycles. Les valeurs ont varié entre  $1,39 \times 10^{-07}$  m/s à  $1,98 \times 10^{-07}$  m/s;

$2,03 \times 10^{-07}$  m/s à  $3,94 \times 10^{-07}$  m/s et  $2,14 \times 10^{-07}$  m/s à  $4,03 \times 10^{-07}$  m/s) respectivement. Ces résultats montrent que les valeurs de la  $k_{sat}$  des Mel# 4 et Mel# 8 ont été les plus influencés par les effets des cycles de gel-dégel au fur et à mesure que les cycles avançaient, contrairement au Mel# 1. L'augmentation des valeurs de la  $k_{sat}$  pourrait être associée à l'apparition des fissures dans les mélanges pouvant affecter la microstructure et causer l'augmentation de la conductivité hydraulique (Sterpi, 2015). Ce comportement est en rapport avec la nature des matériaux fins (Chamberlain & Gow, 1979; Dalla Santa et al., 2019; Konrad, 2010).

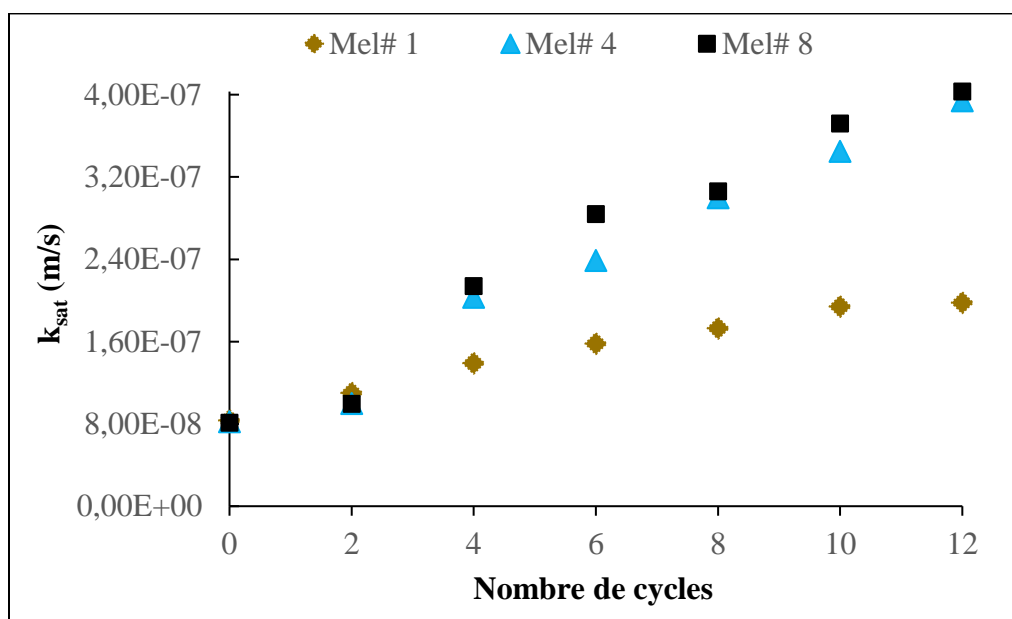


Figure 6.8 Évolutions de la  $k_{sat}$  des Mélange 1, des mélange 2, mélange 3 en fonction du nombre de cycles et de la teneur en muscovite (9,5;12 et 15,5%) de 0.0% de ciment HE

### 6.3.2 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) : Cas des mélanges avec 0,5% de ciment

La figure 6.9 montre une tendance semblable des trois courbes des Mél# 2, Mél# 5 et Mél# 9 aux deux premiers cycles avec des valeurs de la  $k_{sat}$  de  $7,53 \times 10^{-08}$  m/s;  $9,99 \times 10^{-08}$  m/s  $8,87 \times 10^{-08}$  m/s respectivement. Ces valeurs ont par la suite augmenté d'un ordre de grandeur ( $1,45 \times 10^{-07}$  m/s et  $1,33 \times 10^{-07}$  m/s) à partir du 3<sup>ème</sup> cycle pour les Mél# 5 et Mél# 9. Tandis que la  $k_{sat}$  du Mél# 2 a augmenté d'un ordre de grandeur seulement après le 6<sup>ème</sup> cycle avec une valeur de  $1,09 \times 10^{-07}$  m/s. Ce comportement pourrait être lié à la faible quantité de ciment utilisé dans les mélanges et à l'impact de la muscovite sur les matériaux cimentaires. En effet, l'augmentation de la teneur en

muscovite permet de réduire la perméabilité des mélanges (Bandini, 2009). Ce qui expliquerait l'allure semblable des courbes et la faible valeur de la  $k_{sat}$  au début des cycles de gel-dégel. Cependant, la présence de la muscovite en proportion élevée dans les matériaux cimentaires, augmente la sensibilité à l'eau, réduit la résistance à la compression uniaxiale et augmente la porosité et la perméabilité des mélanges soumis à l'action des cycles de gel- dégel (Dempsey & Thompson, 1967; Said et al., 2009; Shihata & Baghdadi, 2001; Xu et al., 2020). Toutefois, l'augmentation de la valeur de la  $k_{sat}$  n'a pas dépassé un ordre de grandeur pour tous les types de mélanges tout au long de l'essai.

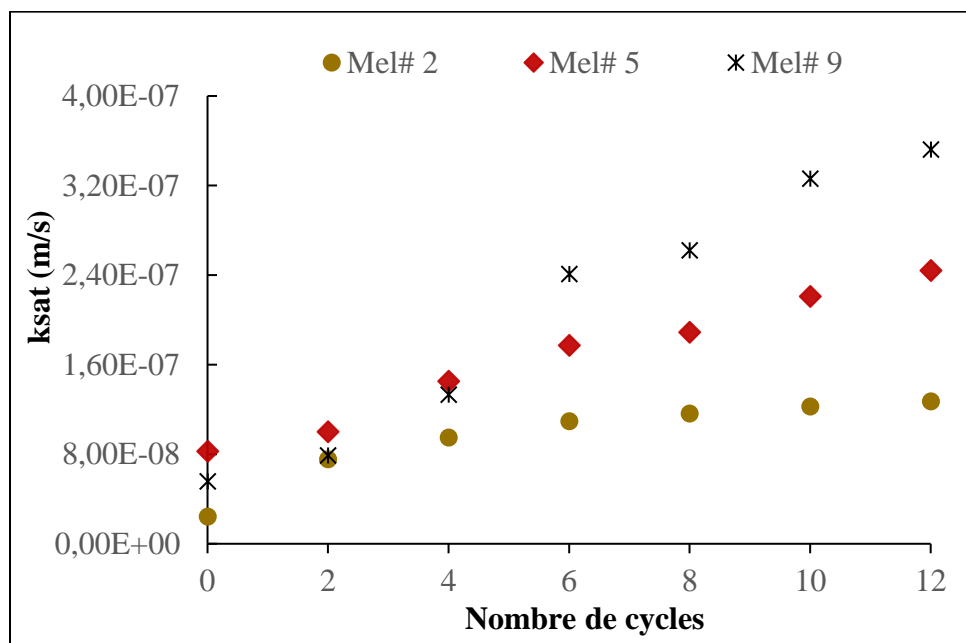


Figure 6.9 Évolutions de la  $k_{sat}$  des Mélange 2, Mélange 5 et Mélange 8 en fonction du nombre de cycles & de la teneur en muscovite (9,5;12 et 15,5%) et 0.5% de ciment HE

### 6.3.3 Impact de la teneur en muscovite sur l'évolution de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) : Cas des mélanges avec 1,5 & 2% de ciment

Les résultats de la  $k_{sat}$  des Mél# 3, Mél# 6, Mél# 7 et Mél# 10 soumis aux cycles de gel-dégel sont présentés à la Figure 6.10.

Cette figure, montre des valeurs de  $k_{sat}$  plus faibles pour le Mél# 3 variant entre  $2,33 \times 10^{-08}$  m/s à  $8,74 \times 10^{-08}$  m/s du début jusqu'à la fin de l'essai. Pour le Mél# 6, l'essai a commencé par des valeurs élevées de  $k_{sat}$  ( $1,57 \times 10^{-07}$  (m/s) à  $3,84 \times 10^{-07}$ ) jusqu'à la fin des cycles. Toutefois, les résultats montrent que ces valeurs n'ont pas connu un changement remarquable au cours de toute

la durée de l'essai. Pour les Mél# 7 et Mél# 10, les valeurs de la  $k_{sat}$  ont varié entre  $2,21 \times 10^{-08}$  m/s à  $9,83 \times 10^{-08}$  m/s; et entre  $2,24 \times 10^{-08}$  m/s à  $9,98 \times 10^{-07}$  m/s respectivement après le 8<sup>ème</sup> cycle de gel-dégel. Par la suite, la  $k_{sat}$  de ces mélanges a augmenté d'un ordre de grandeur pour atteindre les valeurs de  $1,57 \times 10^{-07}$  m/s pour le Mél# 7 et  $3,02 \times 10^{-07}$  pour les Mél# 10.

En tenant compte de toutes ces observations, on peut conclure que l'utilisation de 2% de ciment permettrait de limiter et de réduire les effets des cycles de gel-dégel sur les résidus miniers renfermant des phyllosilicates. Toutefois, le degré de réduction de l'action du gel-dégel sur les résidus amendés est fonction de la teneur en muscovite dans les résidus. Comme on peut le voir, la  $k_{sat}$  des 9,5 % est plus faible que celles des 12,5 et 15,5%. Ceci pourrait s'expliquer par l'impact de la muscovite sur le développement de l'UCS qui pourrait entraîner la destruction de la microstructure sous l'action du gel-dégel et augmenter la porosité et la perméabilité des mélanges.

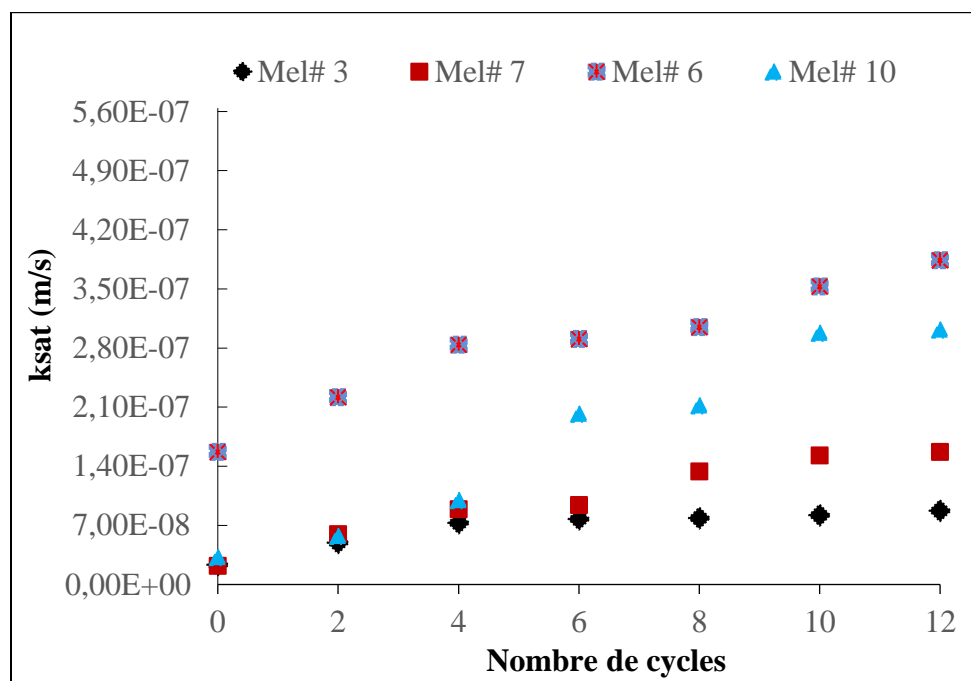


Figure 6.10 Évolutions de la  $k_{sat}$  des Mélanges 3, 6, 7 & 10 en fonction du nombre de cycles & de la teneur en muscovite (9,5;12 et 15,5%) et 1, 0.5% de ciment HE

#### 6.4 Complément d'information sur les courbes de rétention d'eau (CRE)

La capacité de rétention d'eau est l'un des paramètres clés qui permettent d'évaluer l'efficacité d'un dépôt en surface des résidus miniers avec amendement cimentaire, capable de maintenir les résidus à un degré de saturation élevé afin de limiter l'oxydation et le drainage minier acide (cas

des résidus sulfureux). Ce paramètre est également utilisé dans le domaine de la restauration minière pour les recouvrements à effet de barrière capillaire multicouches dont certaines couches nécessitent un degré de saturation supérieur à 85% (Demers & Pabst, 2021; Maqsood & Bussière, 2009).

Dans le cadre de ce projet, la capacité de rétention d'eau a été déterminée et évaluée à travers des essais de laboratoire. La méthode de détermination ainsi que les résultats relatifs aux AEV sont présentés dans l'article 1, au tableau 4.2 et à la figure 4.5 de façon condensée. C'est pourquoi nous trouvons intéressant de détailler un peu plus les résultats obtenus dans cette section du mémoire. Nous présentons les CRE des différents mélanges sous forme de graphique en fonction de la proportion du ciment et de la teneur en muscovite et les paramètres dans un tableau.

Les CRE des Mél#1, Mél# 3, Mél# 4, Mél# 6, Mél# 7, Mél# 8, Mél# 10 sont présentées à la figure 5.10; 5.11 et 5.12 respectivement et les paramètres relatifs aux CRE sont présentés au Tableau 6.1.

La figure 6.11 et le tableau 6.1 montrent que le Mél# 3 préparé avec 2% de ciment et 9,5% de muscovite confère une meilleure propriété de rétention d'eau par rapport au Mél# 1 (non amendé) avec une valeur d'AEV passant de 300 cm (30 kPa) d'eau à 560 cm (56 kPa); soit une augmentation de 86,7 %. La teneur en eau volumique à saturation est de 0,48 et 0,50 et celle résiduelle est de 0,12 et de 0,19 pour le Mél# 1 et Mél# 3 avec une pression résiduelle de 111000 cm et 429900 cm respectivement.

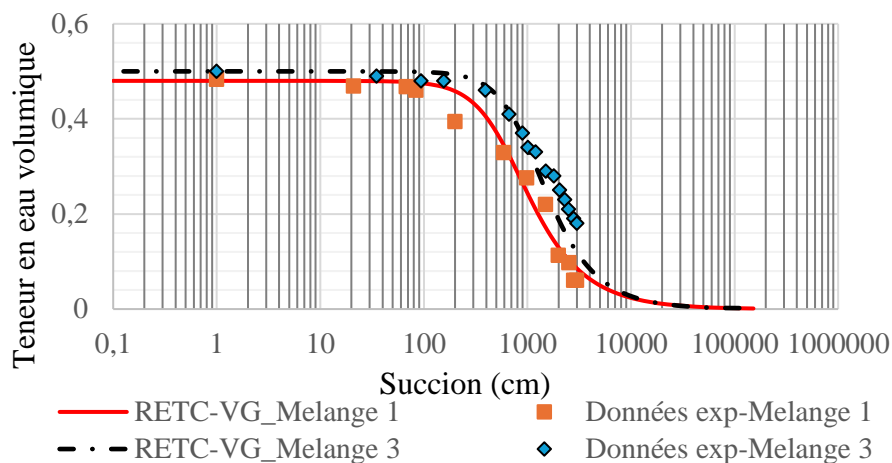


Figure 6.11 pH measured values in the water flush



Le tableau 6.1 résume les paramètres des CRE pour les mélanges Mélange 1, Mélange 3, Mélange 4, Mélange 6, Mélange 8 & Mélange 10 (0% & 2% HE avec 9,5; 12,5 & 15,5% de muscovite)

Tableau 6.1 Paramètre des CRE

Mélanges (%)	AEV (cm) des CRE	$\theta_s$	$\psi_r$	$\theta_r$
Mel# 1	300	0,48	111000	0012
Mel# 3	560	0,50	429900	0019
Mel# 4	315	0,50	114400	0013
Mel# 6	400	0,48	82850	0012
Mel#7	510	0,50	388200	0012
Mel# 8	330	0,50	158900	0013
Mel#10	480	0,50	77490	0013

Les résultats de la figure 6.12 et du tableau 6.1, montrent une faible augmentation de l'AEV des Mél# 6, (1,5 % et 12,5 % muscovite, deuxième scénario) par rapport au Mél# 4 (Mélange non amendé). La valeur de l'AEV a augmenté de 400 cm contre 315 cm, soit une augmentation de 27 %. Cependant, pour la proportion de 2% de ciment avec les mêmes teneurs de muscovite (12,5%, l'AEV est passée de 315 cm à 510 cm pour Mel# 7; soit une augmentation de 70 % environ par rapport au Mél# 1 (non amendé). La teneur en eau volumique des Mél# 4, Mél# 6, Mél# 7 à saturation correspond à 0,50; 0,48 & 0,50 et celle résiduelle 0,13; 0,12; 0,12 avec une pression résiduelle de 114400 kpa, 82850 cm & 388200 cm.

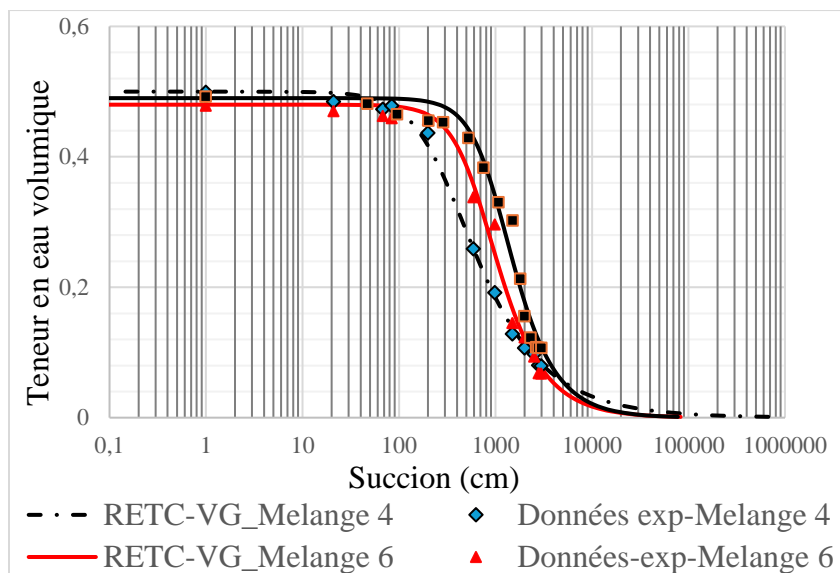


Figure 6.12 Évolution des CRE des Mélange 4, Mélange 6 & Mélange 7

La figure 6.13 et le tableau 6.1 indiquent également une valeur relativement plus élevée de la AEV du Mél# 10 (amendé de 2% de ciment et de 15,5 muscovite) que le Mél# 8 (non amendé). L'AEV est passée de 330 cm à 480 cm; soit une augmentation de 45 %. Ces mélanges ont les mêmes teneurs à saturation et résiduelle. Les teneurs en eau à saturation, résiduelles et la pression résiduelle correspondent à 0,50 et 0,13. Les pressions résiduelles sont de 158900 cm et de 77490 cm respectivement.

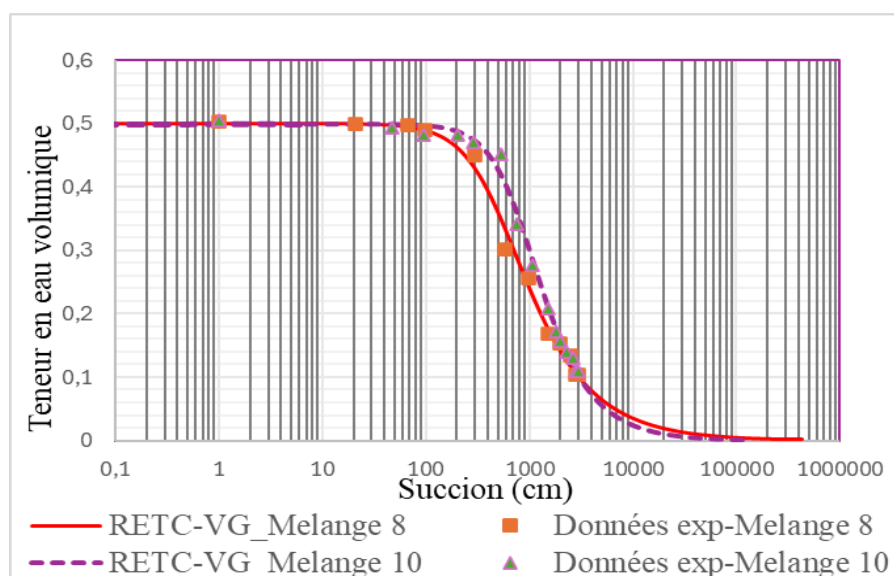


Figure 6.13 Évolution des CRE des Mélange 8 & Mélange 10

En comparant les résultats des trois groupes de mélanges, on remarque que l'AEV a légèrement diminué de 9% et 14 % environ pour les Mél# 7 et Mél#10 par rapport au Mél# 3 pour les mêmes pourcentages de ciment (2%). Cette faible diminution indique que les CRE n'ont pas été influencées par la muscovite comme les autres paramètres (UCS,  $k_{sat}$ ). On peut également remarquer que les données expérimentales sont validées de façon générale avec les CRE ajustées à l'aide du modèle Van Genuchten.

## 6.5 Défis rencontrés

Au cours de la réalisation de ce projet d'étude, nous avons été confrontés à plusieurs défis qui ont permis d'enrichir notre expérience et de favoriser une meilleure compréhension du sujet. Ces défis étaient essentiellement liés d'une part au volume élevé des essais à réaliser dans un délai très court; d'autre part, et d'autre part à l'adaptation des types d'essais de laboratoire au contexte du projet.

Par exemple, il était préalablement prévu d'utiliser une méthode rapide pour mesurer la  $k_{sat}$  à travers le perméamètre à paroi rigide. Cependant, en raison des échecs enregistrés avec cette méthode, le perméamètre à paroi flexible a été proposé et testé. En effet, dans le perméamètre à paroi rigide, l'échantillon s'effondrait deux fois de suite au moment de la saturation. Comme explication, on a considéré que la fine granulométrie des mélanges et la présence de la muscovite qui entraîneraient une déformation causant ainsi un écrasement de l'échantillon. Les essais avaient été repis avec le perméamètre à paroi flexible, qui contient une membrane facilitant l'adaptation de l'échantillon. La reprise de ces essais demandait du temps car, il fallait préparer un autre mélange et attendre 28 jours supplémentaires de cure. Ensuite, le temps minimum de saturation des échantillons était de 10 jours. La période de saturation nécessitait un suivi très rapproché afin d'éviter que les burettes se vident et que l'échantillon ne prenne de l'air. Toutefois, ce suivi a permis d'obtenir des données sur la variation de la  $k_{sat}$  en fonction du temps et du degré de saturation. De plus, la  $k_{sat}$  de l'échantillon soumis aux cycles de gel-dégel était évaluée après chaque cycle et cela pendant 12 cycles. Un essai de 12 cycles de gel-dégel durait environ 48 jours pour un échantillon. Cet essai a été réalisé sur 10 mélanges avec un maximum de deux mélanges à la fois pour des raisons de disponibilité d'espace. Cet essai a duré environ 10 mois.

Les essais en colonne comptaient 10 cycles de mouillage-drainage de 28 jours (environ 11 mois d'essai). Cet essai comprenait l'évaluation du comportement hydrogéologique, géochimique et chimique des dix mélanges.

En plus, la détermination des CRE a également fait l'objet d'une adaptation à part entière du fait que l'échantillon devrait être curé, après sa saturation avant de le soumettre aux essais. Cependant, toutes ces difficultés ont abouti à des questionnements dont les réponses ont permis d'obtenir de meilleurs résultats.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 7.1 Conclusion

En conclusion, ce projet de recherche a porté sur l'évaluation au laboratoire de la performance de l'amendement cimentaire des résidus miniers densifiés, solidifiés et stabilisés (RmD-S/S) à l'aide du ciment Portland de type HE, contenant des phyllosilicates destinés à l'entreposage en surface dans les conditions nordiques. La présence des phyllosilicates et les sollicitations climatiques pourraient parfois rendre laborieuse la gestion des résidus miniers densifiés en surface. C'est pourquoi ce projet a essayé d'investiguer ce domaine de recherche. Pour réaliser cette évaluation dix mélanges ont été préparés avec trois teneurs de muscovite (9,5; 12,5 & 15,5%) non amendés et amendés (de 0,5; 1,5 & 2%) de ciment. Les propriétés mécaniques, hydriques et le comportement hydrogéochimique ont été examinés sur ces différents mélanges. Les résultats obtenus ont permis de statuer d'une part, sur l'impact des phyllosilicates sur la stabilité des RmD-S/S sous les conditions climatiques naturelles; et d'autre part sur le potentiel de l'utilisation du liant dans la gestion des RmD.

Les résultats de la caractérisation mécanique ont montré que les mélanges préparés avec 1,5 et 2% de ciment ont développé les meilleures résistances à la compression uniaxiale (UCS) avec des valeurs respectives de 493,4 kPa; 307,7 kPa, 293,3 kPa et 258,7 kPa après 28 jours de cure pour les teneurs de 9,5; 12,5 et de 15,5 % de muscovite. Ces résultats indiquent clairement l'impact de la muscovite et l'effet du ciment sur le développement de l'UCS des mélanges. L'UCS augmente avec l'augmentation de la proportion du ciment et diminue avec l'augmentation de la teneur en muscovite. Ce résultat est en accord avec celui de (Kornmann et al., 2005).

Les résultats des mesures de la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) ont montré une tendance similaire à celle de la résistance à la compression. Les valeurs les plus faibles de la  $k_{sat}$  ont été trouvées pour les mélanges de 2 % de ciment, suivis de ceux de 0,5%; et enfin, les mélanges non amendés. Toutefois, les  $k_{sat}$  de tous les mélanges soumis aux cycles de gel-dégel indiquent que les cycles ont influencé l'évolution de la  $k_{sat}$ . Ces cycles ont induit une augmentation de la  $k_{sat}$  d'un ordre de grandeur passant de ( $10^{-08}$  à  $10^{-07}$ ). Cependant, il faut noter que le Mél# 3 (2% ciment +9,5% muscovite) est celui qui a été moins influencé par les effets des cycles de gel-dégel. Car la  $k_{sat}$  a légèrement augmenté tout en demeurant dans le même ordre de grandeur ( $10^{-08}$ ). Ce comportement pourrait s'expliquer par la présence d'une forte cohésion entre les grains à cause du

ciment qui a permis de mieux solidifier la structure de ce mélange et de limiter l'action du gel-dégel. Quant au Mél# 6 (deuxième configuration), la  $k_{sat}$  a commencé avec une valeur relativement élevée, mais n'a pas connu de changements majeurs avec des valeurs variant de  $1,57 \times 10^{-07}$  m/s à  $3,84 \times 10^{-07}$  m/s, Ceci pourrait être dû, d'une part, au remplissage des pores par les hydrates; et d'autre part, à la consolidation de la cohésion dans l'ensemble de la matrice cimentaire des couches amendées qui ont permis de résister à l'action du gel-dégel.

La CRE a été déterminée pour les mélanges non amendés et ceux amendés de 1,5 et 2% de ciment avec les trois teneurs de muscovite (9,5;12,5 et 15,5%). Les résultats ont montré que l'AEV des mélanges non amendés augmente avec l'augmentation de la teneur en muscovite. Tandis que pour les mélanges amendés de 2% de ciment, AEV diminue légèrement lorsque la teneur de la muscovite augmente; et elle augmente avec l'augmentation de la proportion du ciment. Les valeurs sont passées de 300 cm à 560 cm; 315 cm à 400 et 510 cm; 330 cm à 480 cm respectivement, pour les Mél# 1 et Mél# 3 ; Mél# 4, Mél# 6 et Mél# 7 et enfin, Mél# 8 et Mél# 10.

Les résultats ont également montré que les volumes d'eau recueillis en dessous des colonnes corroborent avec les teneurs en eau volumiques des mélanges dans les colonnes. Les colonnes qui ont drainé les plus grands volumes d'eau ont également présenté les plus faibles teneurs en eau volumiques. Le Mél# 3 (de 2% de ciment et de 9,5% de muscovite) a montré la teneur en eau volumique la plus élevée (0,34). Ceci correspond à un degré de saturation de 91% ; contre 18% à 20 pour les Mél# 1, Mél# 2, Mél# 4, Mél# 5, Mél# 8 et Mél# 9 (0% et 0,5% ciment) correspondant à un degré de saturation de 48 % et de 21 à 23% pour les Mél# 6, Mél# 7 et Mél# 10 avec un degré de saturation de 62 %. Ces résultats indiquent que le Mél# 3 présente une faible porosité dû à l'effet du ciment qui a favorisé la diminution de la vitesse d'écoulement de l'eau.

Les résultats de géochimie indiquent que les paramètres (pH, Eh et la conductivité électrique) se sont améliorés progressivement avec chaque cycle de mouillage-drainage; et plus particulièrement pour les mélanges amendés de 2% de ciment. Tandis que les résultats de la chimie ont montré une grande variation des concentrations des éléments (As, Fe, Cu, Ni, Pb Zn) durant les six premiers cycles de mouillage-drainage; avant de se stabiliser vers la fin des essais. Les plus faibles concentrations ont été notées pour les mélanges de 2% de ciment. Toutefois, le Ni et le Pb ont connu de très faible concentration dès le début des essais.

À la lumière de tous ces résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation de 2% de ciment a permis l'acquisition d'une meilleure UCS, l'amélioration des propriétés hydriques et hydrogéochimiques, la limitation de l'action des cycles de gel-dégel. Elle également permis de réduire le taux de percolation de l'eau au cours des cycles de mouillage-drainage des RmD-S/S. Cependant, le degré d'acquisition de l'UCS et d'amélioration des propriétés est fonction de la quantité de ciment utilisée et de la teneur en phyllosilicates contenus dans les résidus miniers.

## 7.2 Recommandations

Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation de 2% de ciment dans les RmD permet d'améliorer leurs propriétés physiques et hydrogéochimique. Cependant, ces résultats ont été obtenus lors des travaux de laboratoire où les conditions climatiques sont différentes de celles du terrain. Il serait donc nécessaire de réaliser des essais à l'échelle du terrain afin de prendre en compte la topographie du parc d'entreposage d'une part, d'autre part les conditions réelles de gel-dégel et de mouillage-drainage. Cela permettrait une meilleure évaluation des effets réels des cycles gel-dégel et de mouillage-drainage sur le comportement hydrogéochimique des RmD-S/S. Cette évaluation aiderait à comprendre et à valider l'efficacité et l'applicabilité de la technique de solidification et de stabilisation.

En plus, pour assurer une réduction de la taille des pores et fournir une meilleure cohésion entre les grains des résidus de la deuxième configuration (dépôt par intercalation de couches), il serait indispensable d'augmenter la proportion du ciment. Car, la réduction de la taille des pores dépend de la quantité du ciment utilisée. Aussi, il serait souhaitable de réaliser ce test pour les différentes teneurs de muscovite. Cet amendement pourrait être efficace et donner de bons résultats dans les conditions climatiques humides réelles de terrain où le ciment aurait le temps d'être entièrement hydraté. Nous suggérons également de réaliser des analyses par microscope électronique par balayage (MEB) et PIM pour déterminer l'évolution de la matrice cimentaire et le degré de fissuration des mélanges. Ces analyses pourraient permettre de comprendre les différents processus de dissolution et de précipitation des phases cimentaires intervenus au cours de l'essai; et de mieux expliquer les causes de l'augmentation de la  $k_{sat}$  et de la désaturation des RmD-S/S.

## RÉFÉRENCES

- Aldhafeeri, Z., & Fall, M. (2016). Time and damage induced changes in the chemical reactivity of cemented paste backfill. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4038-4049.
- Alkire, B. D., & Jashimuddin, J. (1984). Changes in strength of silt due to freeze-thaw. *Journal of technical topics in civil engineering*, 110(1), 48-53.
- Árkai, P. (2002). Phyllosilicates in very low-grade metamorphism: transformation to micas. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 46(1), 463-478.
- Arredondo, E., Suazo, G., & Araya, V. (2020). Surface cracking in thickened tailings: mechanisms and its influence on evaporation and water contents. Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings,
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & 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., 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., Jollette, D., Bussière, B., Chapuis, R., James, M., & Riffon, O. (2002b). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. Défis & Perspectives: Symposium,
- 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.
- Baldeyrou-Bailly, A. (2003). *Etude expérimentale et modélisation de la stabilité des phyllosilicates soumis à un fort gradient thermique. Test dans le contexte du site géothermique de Soultz-sous-Forêts* Université Louis Pasteur-Strasbourg I].
- Bandini, P. M. A. (2009). Effects of Silt Content and Void Ratio on the Saturated Hydraulic Conductivity and Compressibility of Sand-Silt Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1976-1980.
- Barast, Benzaazoua, M., Maqsood, A., & Bussière, B. (2014). Long term hydro-geochemical behaviour of surface paste disposal in field experimental cells. Proceedings of the Conference Canadienne de Géotechnique, GeoRegina, CD-Rom, Regina, Slovakia,
- Barbour, S. L., Wilson, G. W., & St-Arnaud, L. (1993). Evaluation of the saturated–unsaturated groundwater conditions of a thickened tailings deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), 935-946.
- Behera, S., Ghosh, C., Mishra, D., Singh, P., Mishra, K., Buragohain, J., & Mandal, P. K. (2020). Strength development and microstructural investigation of lead-zinc mill tailings based



- paste backfill with fly ash as alternative binder. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103553.
- Behera, S., Mishra, D., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S. K., Ghosh, C., Kumar, R., & Mandal, P. K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, 309, 125120.
- Belem, T. (2022). *Cours de remblais miniers*.
- Belem, T., & Benzaazoua, M. (2008a). Predictive models for prefeasibility cemented paste backfill mix design. Proceedings of the 3rd International Conference on Post-Mining, Nancy, France,
- Belem, T., & Benzaazoua, M. (2008b). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 147-174.
- Belem, T., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2000). Mechanical behaviour of cemented paste backfill. Proc. of 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal,
- Belem, T., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie I: De sa fabrication à sa mise en place sous terre. Symp. int. Apres-mines, GISOS, Gisos ed., Nancy, France,
- Belem, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Dagenais, A. (2002). Effects of settlement and drainage on strength development within mine paste backfill. In *Tailings and Mine Waste'02* (pp. 139-148). CRC Press.
- Belem, T., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2001). The effect of microstructural evolution on the physical properties of paste backfill. In *Tailings and mine waste'01* (pp. 365-374). CRC Press.
- Belem, T., El Aatar, O., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Yilmaz, E. (2007). Hydro-geotechnical and geochemical characterization of column consolidated cemented paste backfill. Proceedings of the 9th International Symposium in Mining with Backfill,
- Belem, T., El Aatar, O., Bussière, B., Benzaazoua, M., Fall, M., & Yilmaz, E. (2006). Characterisation of self-weight consolidated paste backfill. Paste 2006: Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings,
- Belem, T., Peyronnard, O., & Benzaazoua, M. (2010). A model of formulation of blended binders for use in cemented mine backfills. Mine Waste 2010: Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste,
- Benchabane, A. (2006). *Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères: Effets de l'ajout de polymères* Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008)].
- Benson, C. H., & Othman, M. A. (1993). Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 276-294.
- Bentz, D. P., Sant, G., & Weiss, J. (2008). Early-age properties of cement-based materials. I: Influence of cement fineness. *Journal of materials in civil engineering*, 20(7), 502-508.
- Benzaazoua, M., Belem, T., & Bussiere, B. (2002). Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. *Cement and concrete research*, 32(7), 1133-1144.

- Benzaazoua, M., Belem, T., Ouellet, S., & Fall, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement a court, a moyen et a long terme. *Proceedings of Apres-mines*.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., & Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, 21(4), 330-340.
- Benzaazoua, M., Fall, M., & Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152.
- Benzaazoua, M., Fall, M., & Belem, T. (2004a). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152.
- Benzaazoua, M., Fall, M., & Ouellet, S. (2004b). *Étude pluridisciplinaire visant à mettre au point un outil expert pour la prédiction du comportement des remblais en pâte*. IRSST.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., & Bussière, B. (2004). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 17(2), 233-243.
- Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., & Bussière, B. (2004c). The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. *Minerals engineering*, 17(2), 233-243.
- Benzaazoua, M., Perez, P., Belem, T., & Fall, M. (2004d). A laboratory study of the behaviour of surface paste disposal. Proceedings of the 8th International Symposium on Mining with Backfill, The Nonferrous Metals Society of China, Beijing,
- Benzaazoua, M., Peyronnard, O., Belem, T., Fried, E., Stephant, A., & Dublet, G. (2010). Key issues related to behaviour of binders in cemented paste backfilling. Paste 2010: Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings,
- Berger, K. C. (2017). Study of tailings management technologies: Report to Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program, MEND Report 2.50. 1, 164 p. In.
- Beya, F. K. (2016). *Étude du Transfert de chaleur dans les remblais en pâte cimentés curant sous les conditions aux frontières des chantiers miniers dans le pergélisol* Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)].
- Beya, F. K., Mbonimpa, M., Belem, T., Benzaazoua, M., Kalonji, K., & Ouellet, S. (2015). Preliminary study of the influence of temperature and salinity on the thermal properties of hardening cemented paste backfill. Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference, Quebec, QC, Canada,
- BI, C. B. B. (2010). Caractérisation expérimentale des relations entre les bactéries des sols, les phyllosilicates et les solutions: Modélisation et Rôle des Paramètres Environnementaux.
- Boger, D. V. (2012). Personal perspective on paste and thickened tailings: a decade on. *Mining technology*, 121(1), 29-36.
- Boustingorry, P., & Herisson, J. (2021). Matériaux de construction: généralités et caractéristiques physico-chimiques. In *Interactions Matériaux-Microorganismes* (pp. 23-48). EDP Sciences.

- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American chemical society*, 60(2), 309-319.
- Buchwald, A., & Schulz, M. (2005). Alkali-activated binders by use of industrial by-products. *Cement and concrete research*, 35(5), 968-973.
- Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., & Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, 163-169.
- Bull, A. J., & Fall, M. (2020). Curing temperature dependency of the release of arsenic from cemented paste backfill made with Portland cement. *Journal of Environmental Management*, 269, 110772.
- Bussière, 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., 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., Aubertin, M., Zagury, G. J., Potvin, R., & Benzaazoua, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées. Proceedings of the Symposium,
- Caillère, S. (1982). Hénin S., Rautureau M., "Minéralogie des argiles", Tomes 1 et 2, Inra Actualités scientifiques et agronomiques. In: Masson Paris.
- Caner, L. (2011). *Phyllosilicates des sols : De l'identification à la qualification* Université de Poitiers].
- Cao, S., Xue, G., Yilmaz, E., & Yin, Z. (2021). Assessment of rheological and sedimentation characteristics of fresh cemented tailings backfill slurry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(5), 319-335.
- Célini, N. (2004). *Traitement des argiles par plasma froid pour leur utilisation comme charges de nanocomposites argile-polymère* Thèse de doctorat Ph. D soutenu en à l'Université du Maine Faculté des ...].
- Cepuritis, R., Wigum, B., Garboczi, E., Mørtzell, E., & Jacobsen, S. (2014). Filler from crushed aggregate for concrete: Pore structure, specific surface, particle shape and size distribution. *Cement and Concrete Composites*, 54, 2-16.
- Chagnaud, D. (2017). Etalonnage de sondes de mesure de la teneur en eau volumique du sol.
- Chamberlain, E. J., & Gow, A. J. (1979). Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. In *Developments in Geotechnical Engineering* (Vol. 26, pp. 73-92). Elsevier.
- Chen, G., Shah, K. J., Shi, L., Chiang, P.-C., & You, Z. (2019). Red soil amelioration and heavy metal immobilization by a multi-element mineral amendment: performance and mechanisms. *Environmental Pollution*, 254, 112964.

- Chen, S., Wu, A., Wang, Y., & Wang, W. (2021). Coupled effects of curing stress and curing temperature on mechanical and physical properties of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 273, 121746.
- Cheng, H., Wu, S., Li, H., & Zhang, X. (2020). Influence of time and temperature on rheology and flow performance of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 231, 117117.
- Chopier, C. (2007). Aptitude des sols au traitement \_ Cas des Micaschistes sériciteux. *Géosciences et Génie Civil–Parcours Hydro-Géo-Mécanique*. Angers, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers. Master II, 76.
- Comparon, L. (2005). *Etude expérimentale des propriétés électriques et diélectriques des matériaux argileux consolidés* Paris, Institut de physique du globe].
- Coussy, S. (2011). *Stabilisation de rejets miniers pollués à l'arsenic à l'aide de sous-produits ciment aires: étude de l'influence de la cristalochimie sur le risque de mobilisation des polluants*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada).
- Crowder, J. J. (2004). Deposition, consolidation, and strength of a non-plastic tailings paste for surface disposal.
- Dalla Santa, G., Cola, S., Secco, M., Tateo, F., Sassi, R., & Galgaro, A. (2019). Multiscale analysis of freeze–thaw effects induced by ground heat exchangers on permeability of silty clays. *Géotechnique*, 69(2), 95-105.
- Dashti, J., & Nematzadeh, M. (2020). Compressive and direct tensile behavior of concrete containing Forta-Ferro fiber and calcium aluminate cement subjected to sulfuric acid attack with optimized design. *Construction and Building Materials*, 253, 118999.
- De Bel, R., Bollens, Q., Duvigneaud, P.-H., & Verbrugge, J.-C. (2005). Influence of curing time, percolation and temperature on the compressive strength of a loam treated with lime. Tremti 2005,
- Deb, D., Dey, G. K., & Panchal, S. (2017). Paste backfill technology: essential characteristics and assessment of its application for mill rejects of uranium ores. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(2), 487-495.
- Demers, I., & Pabst, T. (2021). 13 Alternative and Innovative Integrated Mine Waste Management Approaches.
- Dempsey, B. J., & Thompson, M. R. (1967). *Durability properties of lime-soil mixtures* (University of Illinois, Urbana-Champaign Urbana, IL United States 61801)
- Deng, X., Klein, B., Hallbom, D., de Wit, B., & Zhang, J. (2018). Influence of particle size on the basic and time-dependent rheological behaviors of cemented paste backfill. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(7), 3478-3487.
- Deramne, R. S. (2021). *Elaboration de céramiques silicatées à base des matières premières argileuses et d'un déchet végétal de Centrafrique: Caractéristiques physicochimiques et frittage* Université de Limoges; Université de Lomé (Togo)].
- Deschamps, T. (2009). *Study of the Physical and Hydrogeochemical behaviour of surface paste disposal* (These de Doctorat, p.161). Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Aubertin, M. (2009). Les effets d'amendements alcalins sur des résidus miniers sulfureux entreposés en surface: Cas des dépôts en pâte. *Déchets Sciences et Techniques*, 54, 19-30.
- Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M., & Belem, T. (2008). Microstructural and geochemical evolution of paste tailings in surface disposal conditions. *Minerals Engineering*, 21(4), 341-353.
- Di, W., Cai, S.-j., & Huang, G. (2014). Coupled effect of cement hydration and temperature on rheological properties of fresh cemented tailings backfill slurry. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(9), 2954-2963.
- Dikonda, R., Mbonimpa, M., & Belem, T. (2018). Influence de la procédure de malaxage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du remblai en pâte cimenté. Proceedings of the 71st Canadian Geotechnical Conference: GeoEdmonton,
- Ding, L.-q., Han, Z., Zou, W.-l., & Wang, X.-q. (2020). Characterizing hydro-mechanical behaviours of compacted subgrade soils considering effects of freeze-thaw cycles. *Transportation Geotechnics*, 24, 100392.
- Djellal, S. (2019). L'Effet de la Stabilisation par la chaux sur les Propriétés géotechniques des sols fins. (Mémoire de maitrise, P.23) Université Larbi Ben M'hidi O.E.B
- Dong, L., Tong, X., Li, X., Zhou, J., Wang, S., & Liu, B. (2019). Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1562-1578.
- Dorricott, M., & Grice, A. (2002). Backfill—the environmentally friendly tailings disposal system. *Green Proceedings 2002*, pp265-270 (*The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne*).
- Eagle, A. (2021). *Rapport sommaire de 2021 sur la gestion des résidus*, p.1
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411-420.
- Egloffstein, T. (1997). Geosynthetic clay liners, part six: Ion exchange. *Geotechnical Fabrics Report*, 15(5).
- Eigenbrod, K. (1996). Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 529-537.
- Eker, H., & Bascetin, A. (2022). Influence of silica fume on mechanical property of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 317, 126089.
- El Ouahabi, M. (2013). Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc. *Université de Liège* (Thèse de doctorat)
- Elghali, A., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Genty, T. (2019). In situ effectiveness of alkaline and cementitious amendments to stabilize oxidized acid-generating tailings. *Minerals*, 9(5), 314.

- Elghali, A., Benzaazoua, M., Couvidat, J., Taha, Y., Darricau, L., Neculita, C. M., & Chatain, V. (2022). Stabilization/solidification of sediments: challenges and novelties. In *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes* (pp. 93-112). Elsevier.
- Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., & Deveci, H. (2017). Practical importance of tailings for cemented paste backfill. In *Paste tailings management* (pp. 7-32). Springer.
- Erismann, F., & Hansson, M. (2021). Efficient paste mix designs using new generation backfill admixtures—perception versus reality. In *Minefill 2020-2021* (pp. 3-12). CRC Press.
- Éthier, M.-P. (2011). *Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine Raglan* [École Polytechnique de Montréal].
- Faisandier, K. (1997). *Analyse multiechelle de dispersions de montmorillonites par diffusion des rayons x: relation entre structure, texture et propriétés macroscopiques de gonflement* [Tese de Doctorat 1997ORLE2038, Université d'Orléans, France].
- Fall, M., Adrien, D., Célestin, J., Pokharel, M., & Touré, M. (2009). Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 22(15), 1307-1317.
- Fall, M., & Benzaazoua, M. (2003). Advances in predicting performance properties and cost of paste backfill. *Talings and mine waste'03*,
- Fall, M., Benzaazoua, M., & Ouellet, S. (2004). Effect of tailings properties on paste backfill performance. *Proceedings of the 8th International Symposia on Mining with Backfill*, Beijing, China,
- Fall, M., Benzaazoua, M., & Ouellet, S. (2005a). Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 18(1), 41-44.
- Fall, M., Benzaazoua, M., & Saa, E. (2008). Mix proportioning of underground cemented tailings backfill. *Tunnelling and Underground space technology*, 23(1), 80-90.
- Fall, M., Célestin, J., Pokharel, M., & Touré, M. (2010). A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill. *Engineering Geology*, 114(3-4), 397-413.
- Fall, M., Célestin, J., Pokharel, M., & Touré, M. (2010a). A contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill. *Engineering Geology*, 114(3-4), 397-413.
- Fall, M., & Pokharel, M. (2010b). Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills: Portland cement-paste backfill. *Cement and Concrete Composites*, 32(10), 819-828.
- Fang, K., & Fall, M. (2019). Chemically induced changes in the shear behaviour of interface between rock and tailings backfill undergoing cementation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9), 3047-3062.
- Fang, K., Fall, M., & Cui, L. (2021). Thermo-chemo-mechanical cohesive zone model for cemented paste backfill-rock interface. *Engineering Fracture Mechanics*, 244, 107546.

- Fitton, T., & Roshdieh, A. (2013a). Filtered tailings versus thickened slurry: four case studies. *Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*,
- Fitton, T., & Seddon, K. (2013b). Paste and thickened tailings—myth busting and clarification. *Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*,
- Fontes, W. C., de Carvalho, J. M. F., Andrade, L. C., Segadães, A. M., & Peixoto, R. A. (2019). Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”. *Construction and Building Materials*, 206, 111-121.
- Fourie, A. (2012). Perceived and realized benefits of paste and thickened tailings for surface deposition. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(11), 919-926.
- Fränkle, B., Morsch, P., Kessler, C., Sok, T., Gleiß, M., & Nirschl, H. (2022). Iron Ore Tailings Dewatering: Measurement of Adhesion and Cohesion for Filter Press Operation. *Sustainability*, 14(6), 3424.
- Fredlund, D., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546.
- Furnell, E., Bilaniuk, K., Goldbaum, M., Shoaib, M., Wani, O., Tian, X., Chen, Z., Boucher, D., & Bobicki, E. R. (2022). Dewatered and Stacked Mine Tailings: A Review. *ACS ES&T Engineering*, 2(5), 728-745.
- Gautier, M. (2008). *Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes*. (These de Doctorat) Université d'Orléans.
- Godbout, J. (2005). *Évolution des propriétés hydriques des remblais miniers cimentés en pâte durant le curage*. École Polytechnique de Montréal.
- Godbout, J., Bussière, B., & Belem, T. (2007). Evolution of cemented paste backfill saturated hydraulic conductivity at early curing time.
- Gravel, S. (2015). *Étude expérimentale de la filtration sous haute pression de résidus miniers en suspension* [Université du Québec à Chicoutimi].
- Grice, T. (1998). Underground mining with backfill. *2nd Annual Summit on Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Nov, 24-25*.
- Grosso, A., Kaswalder, F., & Hawkey, A. (2021). Clay-bearing mine tailings analysis and implications in large filter press design. *Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*,
- Guillemot, J. (1986). *Éléments de géologie*. Éditions Technip.
- Guo, Z., Qiu, J., Jiang, H., Zhang, S., & Ding, H. (2021). Improving the performance of superfine-tailings cemented paste backfill with a new blended binder. *Powder Technology*, 394, 149-160.

- Hadimi. (2014). *Étude du comportement hydrogéochimique à long terme d'un dépôt de rejets miniers sulfureux et des effets d'amendements cimentaires: simulations expérimentales au laboratoire École Polytechnique de Montréal*].
- Hadimi, Mostafa, B., Abdelkadir, M., & Bruno, B. (2016). Effect of cementitious amendment on the hydrogeological behavior of a surface paste tailings' disposal. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 1-15.
- Hamberg, e. a. (2015). The use of low binder proportions in cemented paste backfill—effects on As-leaching. *Minerals Engineering*, 78, 74-82.
- Hamberg, R., Maurice, C., & Alakangas, L. (2015). The use of low binder proportions in cemented paste backfill—effects on As-leaching. *Minerals engineering*, 78, 74-82.
- Hane, I., Belem, T., Benzaazoua, M., & Maqsoud, A. (2017). Laboratory characterization of cemented tailings paste containing crushed waste rocks for improved compressive strength development. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(2), 645-662.
- Ho, V. D., Gholampour, A., Losic, D., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Enhancing the performance and environmental impact of alkali-activated binder-based composites containing graphene oxide and industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 284, 122811.
- Hohmann-Porebska, M. (2002). Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters. *Applied clay science*, 21(1-2), 77-87.
- Horta, A. (2011). Impacts of Using Crushed Rocks in Concrete. In.
- Huang, Z., Yilmaz, E., & Cao, S. (2021). Analysis of strength and microstructural characteristics of mine backfills containing fly ash and desulfurized gypsum. *Minerals*, 11(4), 409.
- Ichrak, H., Mostafa, B., Abdelkadir, M., & Bruno, B. (2016). Effect of cementitious amendment on the hydrogeological behavior of a surface paste tailings' disposal. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1, 1-15.
- Janadi, R., RIVARD, P., BELEM, T., Robert, M., & Mbonimpa, M. (2021). Valorisation des résidus miniers et des roches stériles concassées comme matériaux de construction
- Jewell, R. (2010). Ensuring the credibility of thickening technology. Paste 2010: Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings,
- Jiang, H., Ren, L., Zhang, Q., Zheng, J., & Cui, L. (2022). Strength and microstructural evolution of alkali-activated slag-based cemented paste backfill: Coupled effects of activator composition and temperature. *Powder Technology*, 401, 117322.
- Jiang, L., & Guan, Y. (1999). Pore structure and its effect on strength of high-volume fly ash paste. *Cement and concrete research*, 29(4), 631-633.
- Jiang, Q., He, Y., Wu, Y., Dian, B., Zhang, J., Li, T., & Jiang, M. (2022). Solidification/stabilization of soil heavy metals by alkaline industrial wastes: A critical review. *Environmental Pollution*, 120094.
- Jouini, M., Benzaazoua, M., & Neculita, C. M. (2022). Stabilization/solidification of acid mine drainage treatment sludge. In *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes* (pp. 175-199). Elsevier.



- Jozja, N. (2003). *Étude de matériaux argileux albanais. Caractérisation" multi-échelle" d'une bentonite magnésienne* Université d'Orléans].
- Jumassultan, A., Sagidullina, N., Kim, J., Ku, T., & Moon, S.-W. (2021). Performance of cement-stabilized sand subjected to freeze-thaw cycles. *Geomechanics and Engineering*, 25(1), 41-48.
- Kalonji, A. K. (2014). *Étude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effet de barrière capillaire faites entièrement de matériaux miniers* École Polytechnique de Montréal].
- Kalonji, K. (2016). *Étude des propriétés rhéologiques et du transport du remblai cimenté en pâte en conditions nordiques*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Kasap, T., Yilmaz, E., & Sari, M. (2022). Physico-chemical and micro-structural behavior of cemented mine backfill: Effect of pH in dam tailings. *Journal of Environmental Management*, 314, 115034.
- Kesimal, A., Yilmaz, E., Ercikdi, B., Alp, I., & Deveci, H. (2005). Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill. *Materials Letters*, 59(28), 3703-3709.
- Khaldoun, A., Ouadif, L., Bahi, L., & Baba, K. (2018). Underground Cemented Backfill, a Design Procedure for an Integrated Mining Waste Management. MATEC Web of Conferences,
- Khoshand, A., Alishirinpourfarkhad, A., Solhianari, M., & Tabiatnejad, B. (2022). Characterization and mechanism analysis of stabilized/solidified oil-contaminated soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(15), 1-14.
- Konrad, J.-M. (2010). Hydraulic conductivity changes of a low-plasticity till subjected to freeze–thaw cycles. *Géotechnique*, 60(9), 679-690.
- Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M., & Thomann, R. (2005). Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 65(14), 2259-2268.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A., & Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste management*, 28(1), 215-225.
- Lagerblad, B., Gram, H.-E., & Westerholm, M. (2014). Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production. *Construction and Building Materials*, 67, 121-126.
- Landriault, D., Verburg, R., Cincilla, W., & Welch, D. (1997). Paste technology for underground backfill and surface tailings disposal applications. Short course notes, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Technical workshop œ april,
- Lara, J., Pornillos, E., & Muñoz, H. (2013). Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits—state-of-the-art. Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings,
- Larochelle, C. G. (2018). *Utilisation de stériles générateurs d'acide comme couche de bris capillaire dans une couverture avec effets de barrière capillaire*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).

- Le Borgne, T. (2010). *Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols* Institut National Polytechnique de Lorraine].
- Le Runigo, B. (2008). *Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques: comportements hydraulique, microstructural et mécanique* Ecole Centrale de Nantes (ECN)/Université de Nantes].
- Létourneau, M. (2012). Effet du gel et du dégel sur les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux.
- Li, A., Been, K., Ritchie, D., & Welch, D. (2009). Stability of large thickened, non-segregated tailings slopes. *Paste 2009: Proceedings of the Twelfth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*,
- Li, H., Wu, A., & Wang, H. (2019). Evaluation of short-term strength development of cemented backfill with varying sulphide contents and the use of additives. *Journal of Environmental Management*, 239, 279-286.
- Li, L. (2014). Generalized solution for mining backfill design. *International Journal of Geomechanics*, 14(3), 04014006.
- Li, W., & Fall, M. (2016). Sulphate effect on the early age strength and self-desiccation of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 106, 296-304.
- Li, X., Zhou, S., Zhou, Y., Min, C., Cao, Z., Du, J., Luo, L., & Shi, Y. (2019). Durability evaluation of phosphogypsum-based cemented backfill through drying-wetting cycles. *Minerals*, 9(5), 321.
- Lidstrom, L., & Westerberg, B. (2003). Fine ground cement in concrete—properties and prospects. *Materials Journal*, 100(5), 398-406.
- Loorents, K.-J., Johansson, E., & Arvidsson, H. (2007). Free mica grains in crushed rock aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4), 441-447.
- Lopes, R., Bahia, R., Jefferies, M., & Oliveira, M. (2013). Paste deposition over an existing subaqueous slurry deposit of high sulphide content tailings—the Neves Corvo experience. *Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*,
- Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612.
- Lwin, C. S., Seo, B.-H., Kim, H.-U., Owens, G., & Kim, K.-R. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—A critical review. *Soil science and plant nutrition*, 64(2), 156-167.
- Ma, D., Kong, S., Li, Z., Zhang, Q., Wang, Z., & Zhou, Z. (2021). Effect of wetting-drying cycle on hydraulic and mechanical properties of cemented paste backfill of the recycled solid wastes. *Chemosphere*, 282, 131163.
- Ma, L.-H., Chen, J., Zhao, Y.-F., Zhang, C., Liu, R., & Ren, S. (2022). Water Content and Bedding Angle Effects on the Mechanical Properties and Micro-/Macro-Failure Mechanism of Phyllite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-19.

- Malviya, R., & Chaudhary, R. (2006). Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. *Journal of hazardous materials*, 137(1), 267-276.
- Mamy, J. (1968). *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite: Propriétés diélectriques et structure du film d'eau* [Institut National de la Recherche Agronomique].
- Maqsoud, & Bussière, A. (2009). Transient hydrogeological behaviour of the LTA cover with capillary barrier effects.
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2012). Predicting hysteresis of the water retention curve from basic properties of granular soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1147-1159.
- Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Hysteresis effects on the water retention curve: a comparison between laboratory results and predictive models. Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference, 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference,
- Maqsoud, A. B., Bruno, & Aubertin, M. (2002). L'hysteresis des sols non saturés utilisés dans les couvertures avec effet de barrière capillaire.
- Marques, A., Oliveira, S., Paes, B., Paes, I., & Coelho, A. (2020). Evaluation of the Liquefaction Susceptibility of Filtered Iron Ore Tailings from the Iron Quadrangle (Brazil). Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings,
- Martin, V., Aubertin, M., & McMullen, J. (2006). Surface disposal of paste tailings. 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,
- 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,
- 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., Bussière, B., & Maqsoud, A. (2006a). A predictive function for the water retention curve of compressible soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1121-1132.
- Mbonimpa, M., Kwizera, P., & Belem, T. (2019). Mine backfilling in the permafrost, part II: Effect of declining curing temperature on the short-term unconfined compressive strength of cemented paste backfills. *Minerals*, 9(3), 172.
- Mehenni, A. (2015). *Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités* [Université de Lorraine].
- Melboucl, B. (2017). Etude comparative du traitement du sol marneux à la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées. *Communication Science and technology*, 18.
- Mering, J. (1971). Oberlin (1971)–The smectites. Electron optical investigation of Clays. *Mineralogical Society*, 135-145.

- Miskovsky, K. (2004). Enrichment of fine mica originating from rock aggregate production and its influence on the mechanical properties of bituminous mixtures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13(5), 607-611.
- Mitchell, R. J., Olsen, R. S., & Smith, J. D. (1982). Model studies on cemented tailings used in mine backfill. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(1), 14-28.
- Mun, K., Hyoun, W., Lee, C., So, S., & Soh, Y. (2007). Basic properties of non-sintering cement using phosphogypsum and waste lime as activator. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1342-1350.
- Nachbaur, L. (1997). *Etude de l'influence d'électrolytes sur l'hydratation et la prise du silicate tricalcique, composant principal du ciment Portland: Caractérisation des interactions à l'origine de la prise* Dijon].
- Newman, P., White, R., & Cadden, A. (2001). Paste, the future of tailings disposal. Proceedings of the 2nd International Conference on Mining and the Environment, Skelleftea, Sweden,
- Niroshan, N., Yin, L., Sivakugan, N., & Veenstra, R. L. (2018). Relevance of SEM to long-term mechanical properties of cemented paste backfill. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(4), 2171-2187.
- Norrish, K. (1954). The swelling of montmorillonite. *Discussions of the Faraday society*, 18, 120-134.
- Ouellet, S., Bussiere, B., Aubertin, M., & Benzaazoua, M. (2008). Characterization of cemented paste backfill pore structure using SEM and IA analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2), 139-152.
- Ouellet, S., Bussière, B., Aubertin, M., & Benzaazoua, M. (2007). Microstructural evolution of cemented paste backfill: Mercury intrusion porosimetry test results. *Cement and concrete research*, 37(12), 1654-1665.
- Ouellet, S., Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., & Belem, T. (2004). Effect of binder type and mixing water chemistry on microstructural evolution of cemented paste backfill. Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint CGS-LAH Conference, Quebec, Canada,
- Ouellet, S., Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., Fall, M., & Belem, T. (2003). Sulphide reactivity within cemented paste backfill: oxygen consumption test results. Proceedings of 56th Canadian geotechnical conference,
- Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Aubertin, M. (2006). Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 19(5), 407-419.
- Ouffa, N. (2019). *Solubilité de différents minéraux aluminosilicatés en vue de leur contribution à la géopolymérisation dans les remblais miniers en pâte*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Oxenford, J., & Lord, E. (2006). Canadian experience in the application of paste and thickened tailings for surface disposal. Paste 2006: Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings,

- Padilla, F., & Villeneuve, J.-P. (1989). Simulation des effets de l'hiver sur les chaussées du Québec pour une meilleure planification des techniques de protection et de réhabilitation.
- Paria, S., & Yuet, P. K. (2006). Solidification–stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: a literature review. *Environmental reviews*, 14(4), 217-255.
- Pédro, G. (1994). Les minéraux argileux dans Pédologie (2-Constituants et propriétés du sol). Eds. Duchaufour Ph. et Southier B. In: Masson, Paris 665p.
- Peyronnard, O., & Benzaazoua, M. (2012). Alternative by-product based binders for cemented mine backfill: Recipes optimisation using Taguchi method. *Minerals Engineering*, 29, 28-38.
- Pigeot, L., Dufour, N., Soive, A., Dermenonville, F., & Loukili, A. (2022). Comportement dynamique et cyclique des limons traités à la chaux et au liant hydraulique: approche expérimentale et modélisations. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur,
- Pokharel, M., & Fall, M. (2013). Combined influence of sulphate and temperature on the saturated hydraulic conductivity of hardened cemented paste backfill. *Cement and Concrete Composites*, 38, 21-28.
- Pons, C., Rousseaux, F., & Tchoubar, D. (1981). Utilisation du rayonnement synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des smectites: I. Etude du système eau-montmorillonite-Na en fonction de la température. *Clay Minerals*, 16(1), 23-42.
- Pons, C., Rousseaux, F., & Tchoubar, D. (1982). Utilisation du rayonnement synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des smectites: II. Etude de différents systèmes eau-smectites en fonction de la température. *Clay Minerals*, 17(3), 327-338.
- Porathur, J., Sekhar, S., Godugu, A., & Bhargava, S. (2022). Stability analysis of a free-standing backfill wall and a predictive equation for estimating the required strength of a backfill material-a numerical modelling approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122(5), 227-233.
- Qi, C., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 144, 106025.
- Qi, J., Vermeer, P. A., & Cheng, G. (2006). A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost and periglacial processes*, 17(3), 245-252.
- Qiu, J., Guo, Z., Yang, L., Jiang, H., & Zhao, Y. (2020). Effect of tailings fineness on flow, strength, ultrasonic and microstructure characteristics of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 263, 120645.
- Rankine, R., Pacheco, M., & Sivakugan, N. (2007). Underground mining with backfills. *Soils and Rocks*, 30(2), 93-101.
- Reiffsteck, P., & Pham, N. (2005). Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,
- Ren, J., Vanapalli, S. K., Han, Z., Omenogor, K. O., & Bai, Y. (2019). The resilient moduli of five Canadian soils under wetting and freeze-thaw conditions and their estimation by using an artificial neural network model. *Cold Regions Science and Technology*, 168, 102894.

- Robinsky, E. (1975). Thickened discharge. A new approach to tailings disposal.
- Robinsky, E. (1999). Tailings dam failures need not be disasters: the thickened tailings disposal (TTD) system. *CIM bulletin*, 92(1028), 140-142.
- Robinsky, E. I. (1999). *Thickened tailings disposal in the mining industry*. Robinsky Associates.
- Roy, M., Tardif, J., Leroueil, S., Larose, G., & Rochelle, P. L. (1992). Effets du gel sur les infrastructures routières argileuses au Québec. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(1), 131-142.
- Sadrossadat, E., Basarir, H., Luo, G., Karrech, A., Durham, R., Fourie, A., & Elchalakani, M. (2020). Multi-objective mixture design of cemented paste backfill using particle swarm optimisation algorithm. *Minerals Engineering*, 153, 106385.
- Saeed, K. A., Kassim, K. A., & Eisazadeh, A. (2012). Interferences of cement based-solidification/stabilization and heavy metals: A review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2555-2565.
- Safarizadeh, A., & Taheri, A. (2021). The effect of changing grinding cycle on the flow-ability of cemented paste backfill: effect of particle size distribution. Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings,
- Sahi, A., Belem, T., & Benzaazoua, M. (2015). Mise en évidence expérimentale du dosage optimal des ciments composés (liants) utilisés dans la fabrication des remblais en pâte cimentés. *GEOQuébec2015*.
- Said, S. F., Loorents, K.-J., & Hakim, H. (2009). Impact of mica content on water sensitivity of asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(1), 1-8.
- Santana, J., Andrade, E., Milagres, L., & Balbys, V. (2020). Use of paste Fill on cycle at Turmalina Mine. Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings,
- Sari, M., Yilmaz, E., Kasap, T., & Guner, N. U. (2022). Strength and microstructure evolution in cemented mine backfill with low and high pH pyritic tailings: Effect of mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 328, 127109.
- Saussaye, L. (2012). *Traitement des sols aux liants hydrauliques: aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification* Université de Caen].
- Schmitz, K. S. (2018). *Physical chemistry: multidisciplinary applications in society*. Elsevier.
- Segui, P., Safhi, A. e. M., Amrani, M., & Benzaazoua, M. (2023). Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. *Minerals*, 13(1), 90.
- Shi, C., & Spence, R. (2004). Designing of cement-based formula for solidification/stabilization of hazardous, radioactive, and mixed wastes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 34(4), 391-417.
- Shihata, S., & Baghdadi, Z. (2001). Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement. *Journal of materials in civil engineering*, 13(4), 243-247.
- Sofrá, F., & Boger, D. V. (2002). Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. *Chemical Engineering Journal*, 86(3), 319-330.

- Spence, R. D., & Shi, C. (2004). *Stabilization and solidification of hazardous, radioactive, and mixed wastes*. CRC press.
- Sterpi, D. (2015). Effect of freeze–thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy. *Soils and foundations*, 55(5), 1326-1332.
- Tan, Y.-y., Davide, E., Zhou, Y.-c., Song, W.-d., & Meng, X. (2020). Long-term mechanical behavior and characteristics of cemented tailings backfill through impact loading. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(2), 140-151.
- Termkhajornkit, e. a. (2012). Modeling the coupled effects of temperature and fineness of Portland cement on the hydration kinetics in cement paste. *Cement and concrete research*, 42(3), 526-538.
- Tessier, D. (1978). Technique d'etude de l'orientation des particules argileuses utilisables sur des echantillons sec ou humides
- Theriault, J. A., Frostiak, J., & Welch, D. (2003). Surface disposal of past tailings at the Bulyanhulu gold mine, Tanzania. Mining & the Environment III Conference,
- Touret, O., Pons, C., Tessier, D., & Tardy, Y. (1990). Etude de la répartition de l'eau dans des argiles saturées  $Mg^{2+}$  aux fortes teneurs en eau. *Clay Minerals*, 25(2), 217-233.
- Traoré, L. B., Ouellet-Plamondon, C., Fabbri, A., McGregor, F., & Rojat, F. (2021). Experimental assessment of freezing-thawing resistance of rammed earth buildings. *Construction and Building Materials*, 274, 121917.
- Tugrul, A., Hasdemir, S., & Yılmaz, M. (2015). The effect of feldspar, mica and clay minerals on compressive strength of mortar. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5* (pp. 93-96). Springer.
- Tyagi, S., & Annachatre, A. P. (2023). A review on recent trends in solidification and stabilization techniques for heavy metal immobilization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-25.
- 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.
- Vargas, & Pulido, A. (2022). Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance. *Sustainability*, 14(17), 10901.
- Veenstra, R., & Grobler, J. (2021). Optimising the design stability of cemented paste backfilled stopes. Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings,
- Vietti, A. (2021). Revaluing paste and thickened tailings for large tonnage applications.
- Wang, D., Yang, D., & Yuan, Y. (2023). Strength improvement and micromechanism of inorganic/organic additive-modified magnesium oxychloride cement solidified sludge. *Construction and Building Materials*, 366, 130159.
- Wang, K., Shah, S. P., & Mishulovich, A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. *Cement and concrete research*, 34(2), 299-309.

- Wang, S., Song, X., Wei, M., Liu, W., Wang, X., Ke, Y., & Tao, T. (2021). Strength characteristics and microstructure evolution of cemented tailings backfill with rice straw ash as an alternative binder. *Construction and Building Materials*, 297, 123780.
- Wang, Y., Fall, M., & Wu, A. (2016). Initial temperature-dependence of strength development and self-desiccation in cemented paste backfill that contains sodium silicate. *Cement and Concrete Composites*, 67, 101-110.
- Wiles, C. C. (1987). A review of solidification/stabilization technology. *Journal of hazardous materials*, 14(1), 5-21.
- Wu, D., Fall, M., & Cai, S. (2013). Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 42, 76-87.
- Wu, D., Sun, W., Liu, S., & Qu, C. (2021). Effect of microwave heating on thermo-mechanical behavior of cemented tailings backfill. *Construction and Building Materials*, 266, 121180.
- Xu, W., Cao, P., & Tian, M. (2018). Strength development and microstructure evolution of cemented tailings backfill containing different binder types and contents. *Minerals*, 8(4), 167.
- Xu, W., Chen, W., Tian, M., & Guo, L. (2021). Effect of temperature on time-dependent rheological and compressive strength of fresh cemented paste backfill containing flocculants. *Construction and Building Materials*, 267, 121038.
- Xu, W., Han, M., & Li, P. (2020). Influence of freeze–thaw cycles on mechanical responses of cemented paste tailings in surface storage. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(5), 326-342.
- Xue, X., Ke, Y., Kang, Q., Zhang, Q., Xiao, C., He, F., & Yu, Q. (2019). Cost-effective treatment of hemihydrate phosphogypsum and phosphorous slag as cemented paste backfill material for underground mine. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- Xue, Z., Gan, D., Zhang, Y., & Liu, Z. (2020). Rheological behavior of ultrafine-tailings cemented paste backfill in high-temperature mining conditions. *Construction and Building Materials*, 253, 119212.
- Yilmaz, E. (2010). *Investigating the hydrogeotechnical and microstructural properties of cemented paste backfill using the cuaps apparatus*. Universite du Quebec en Abitibi-Temiscamingue (Canada).
- Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M. (2014b). Effects of curing and stress conditions on hydromechanical, geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill. *Engineering Geology*, 168, 23-37.
- Yilmaz, E., Belem, T., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2008). Consolidation characteristics of early age cemented paste backfill. Proceedings of the 61st Canadian geotechnical conference and the 9th joint CGS/IAH-CNC groundwater conference, Edmonton, Canada,
- Yilmaz, E., Belem, T., Bussière, B., & Benzaazoua, M. (2011). Relationships between microstructural properties and compressive strength of consolidated and unconsolidated cemented paste backfills. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 702-715.



- Yilmaz, E., Belem, T., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Benzaazoua, M. (2015a). Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents. *Construction and Building Materials*, 75, 99-111.
- Yilmaz, E., Benzaazoua, M., Bussière, B., & Pouliot, S. (2014a). Influence of disposal configurations on hydrogeological behaviour of sulphidic paste tailings: A field experimental study. *International Journal of Mineral Processing*, 131, 12-25.
- Yilmaz, E., & Guresci, M. (2017b). Design and characterization of underground paste backfill. In *Paste Tailings Management* (pp. 111-143). Springer.
- Zhang, X., Lin, J., Liu, J., Li, F., & Pang, Z. (2017). Investigation of hydraulic-mechanical properties of paste backfill containing coal gangue-fly ash and its application in an underground coal mine. *Energies*, 10(9), 1309.
- Zhao, Y., Taheri, A., Karakus, M., Chen, Z., & Deng, A. (2020). Effects of water content, water type and temperature on the rheological behaviour of slag-cement and fly ash-cement paste backfill. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(3), 271-278.
- Zivica, V. (1997). Hardening and properties of cement-based materials incorporating heavy metal oxides. *Bulletin of materials science*, 20(5), 677-683.

## ANNEXE A COMPOSITION MINERALOGIQUE ET CHIMIQUE DES RESIDUS MINIER

### A1. Identification des minéraux par DRX dans les résidus de la mine Méliadine

Tableau A1.1 Proportions des minéraux identifiés par DRX dans les résidus de la mine Méliadine

Minéraux	Proportions (%)
Quartz ( $\text{SiO}_2$ )	42,7
Chlorite ( $\text{Fe, Mg, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	21,2
Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	15,5
Muscovite ( $\text{K (Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2$ )	9,5
Dolomite ( $\text{CaMg (CO}_3)_2$ )	8,4
Magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	1,9
Total	99,2

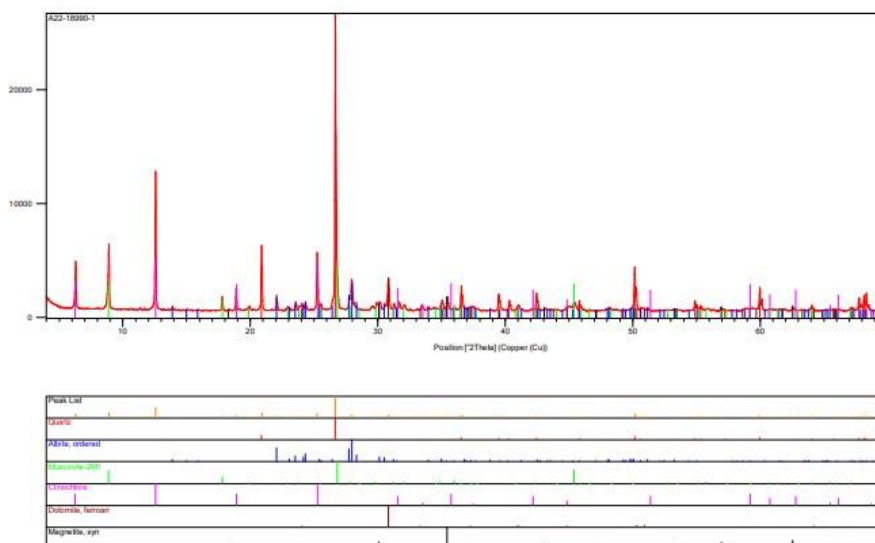


Figure A1.1 Modèle de diffraction des rayons X des résidus de la mine Meliadine

### A2. Détermination des zones de stabilité des éléments chimiques à l'aide du diagramme de Pourbaix

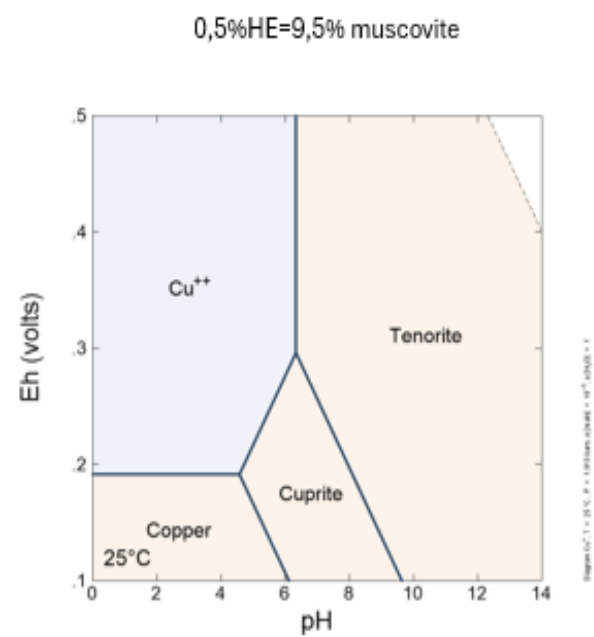
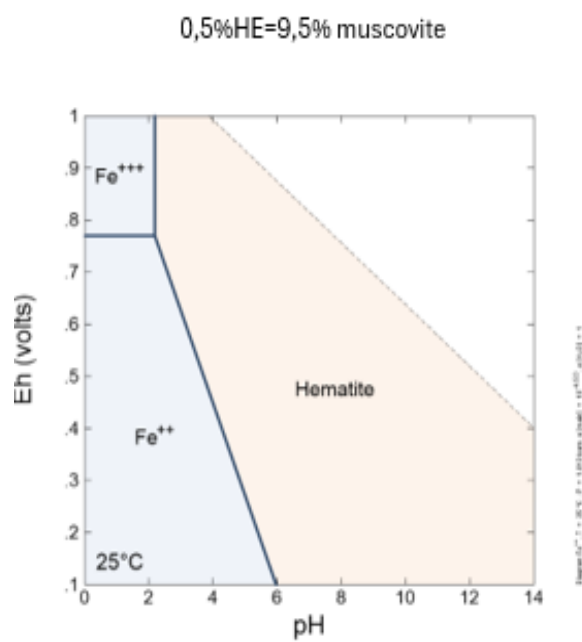
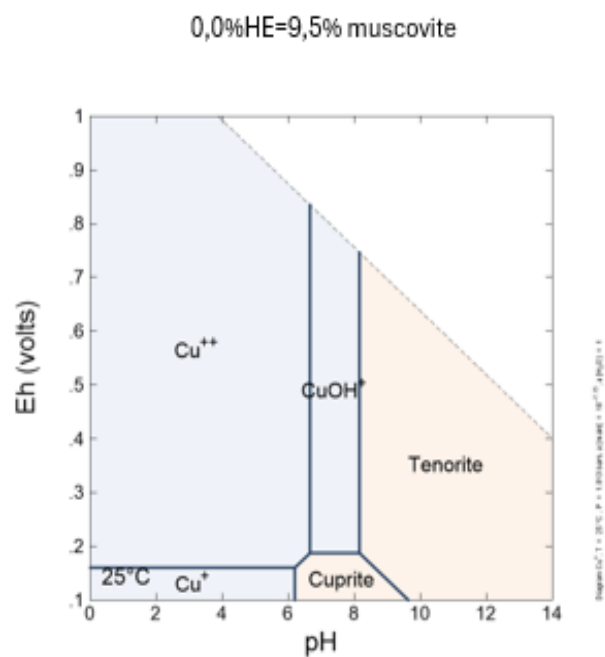
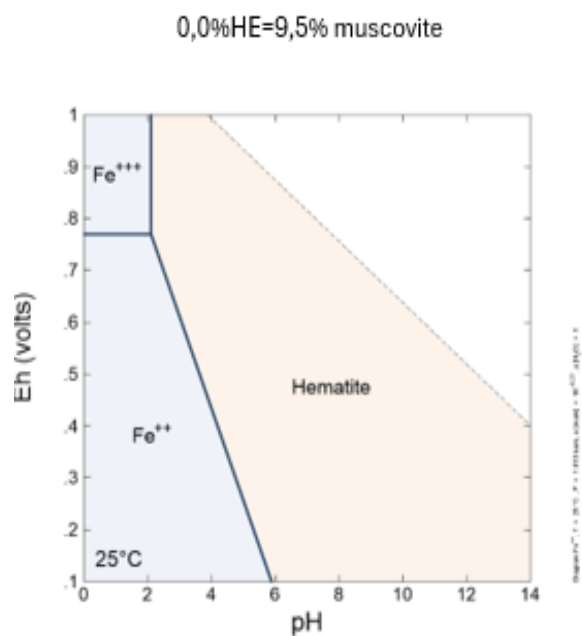


Figure A2.1 Mélanges avec 9,5% de muscovite

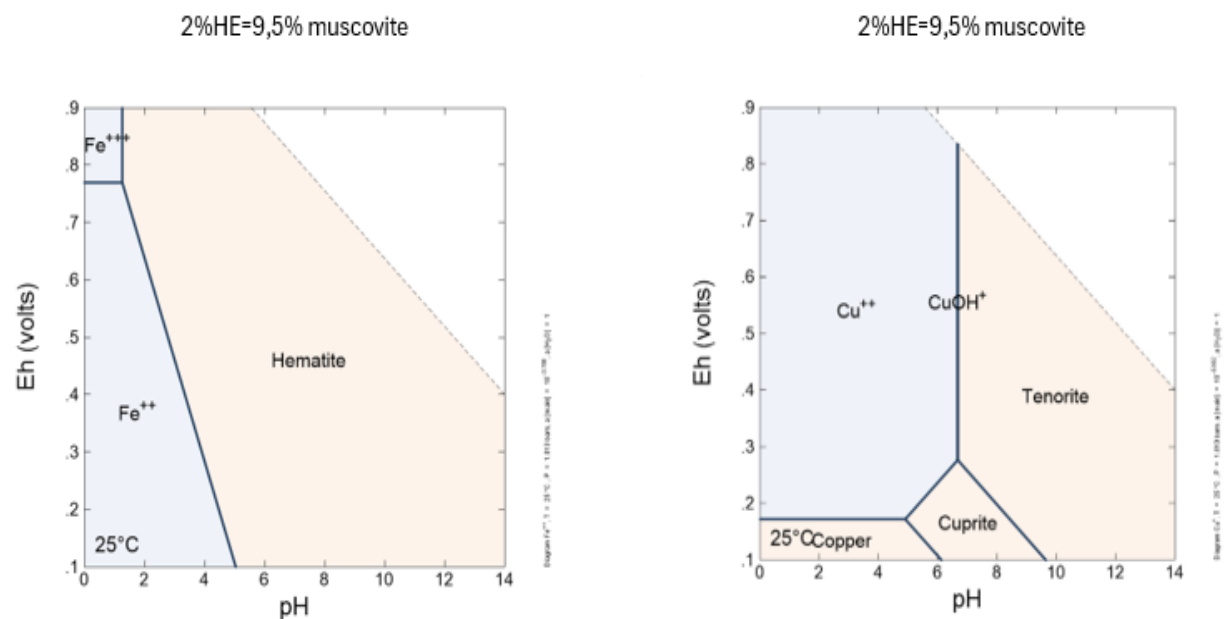


Figure A2.1 Mélanges avec 9,5% de muscovite (suite)

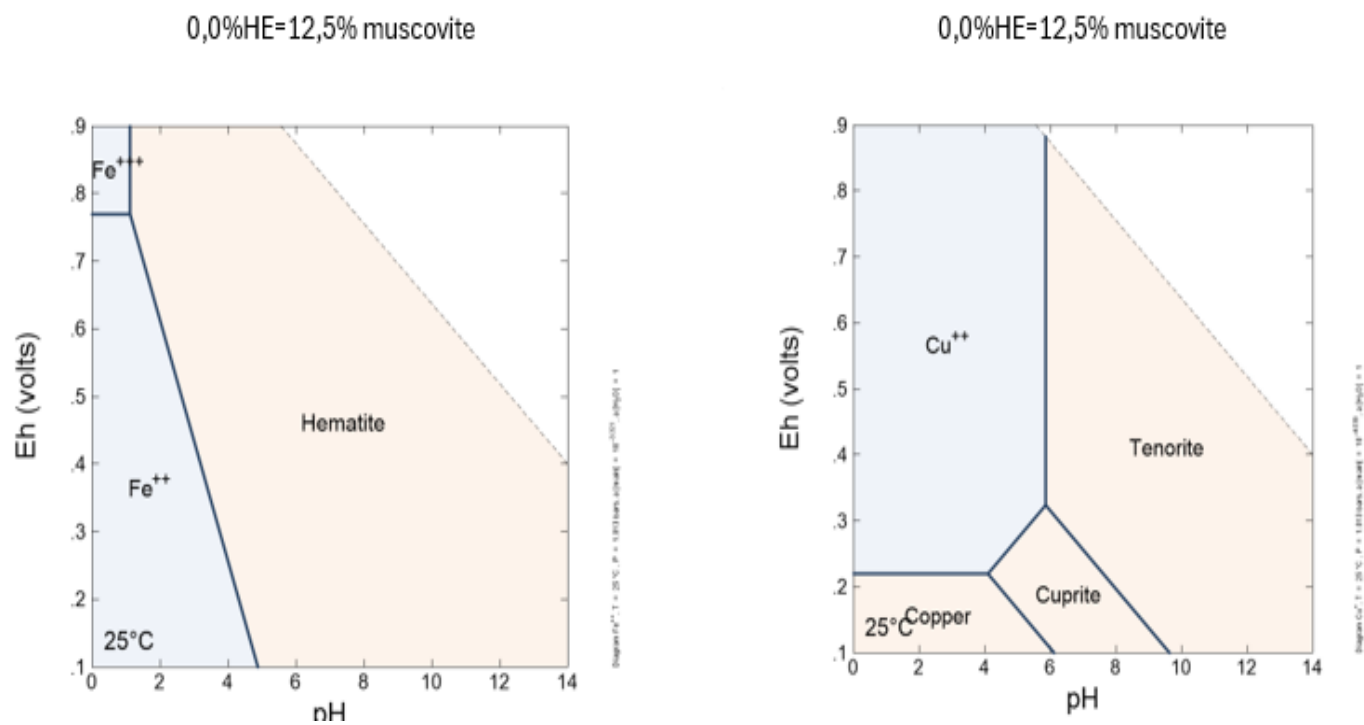


Figure A2.2 Mélanges avec 12,5% de muscovite

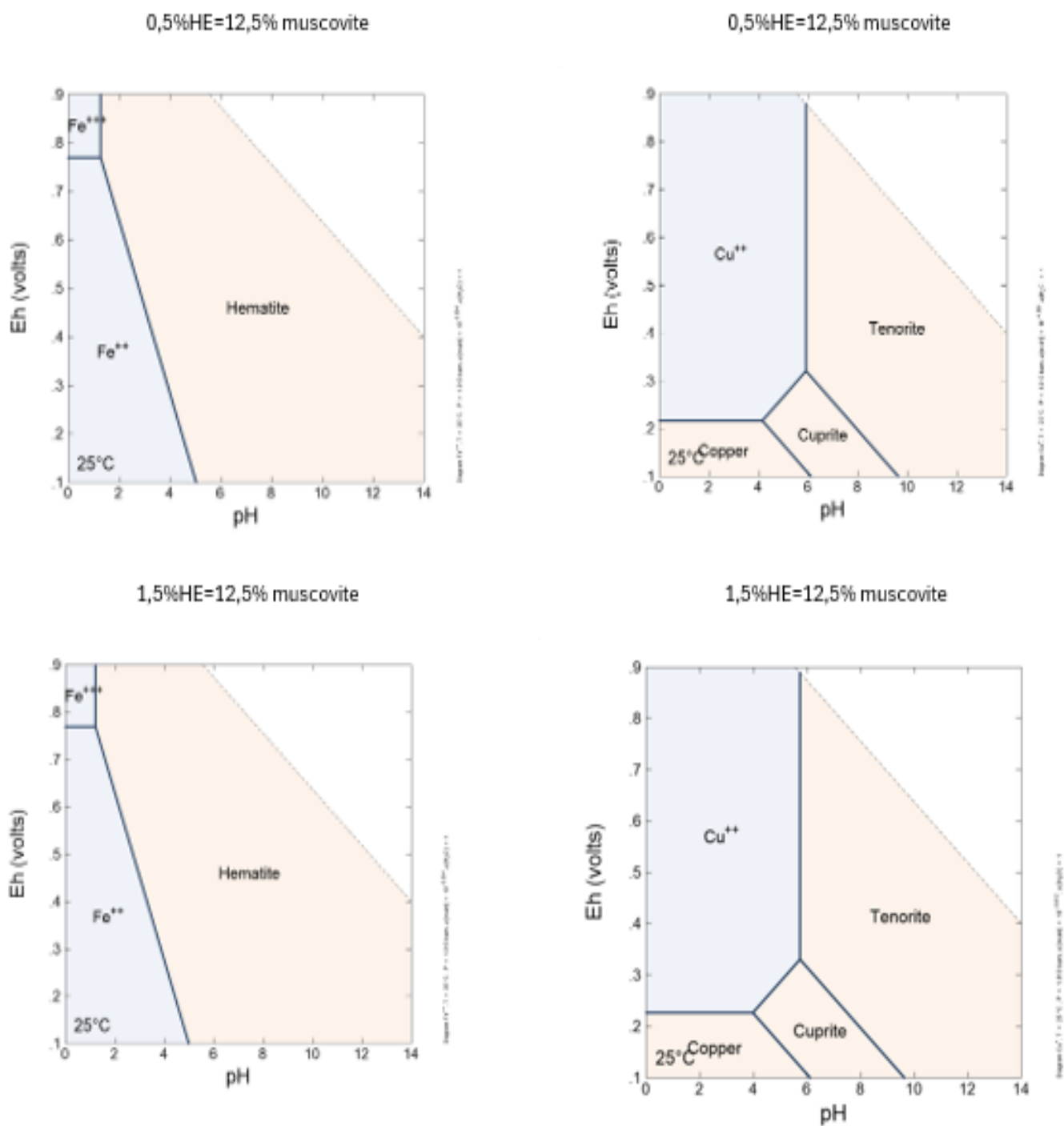


Figure A2.2 Mélanges avec 12,5% de muscovite (suite)

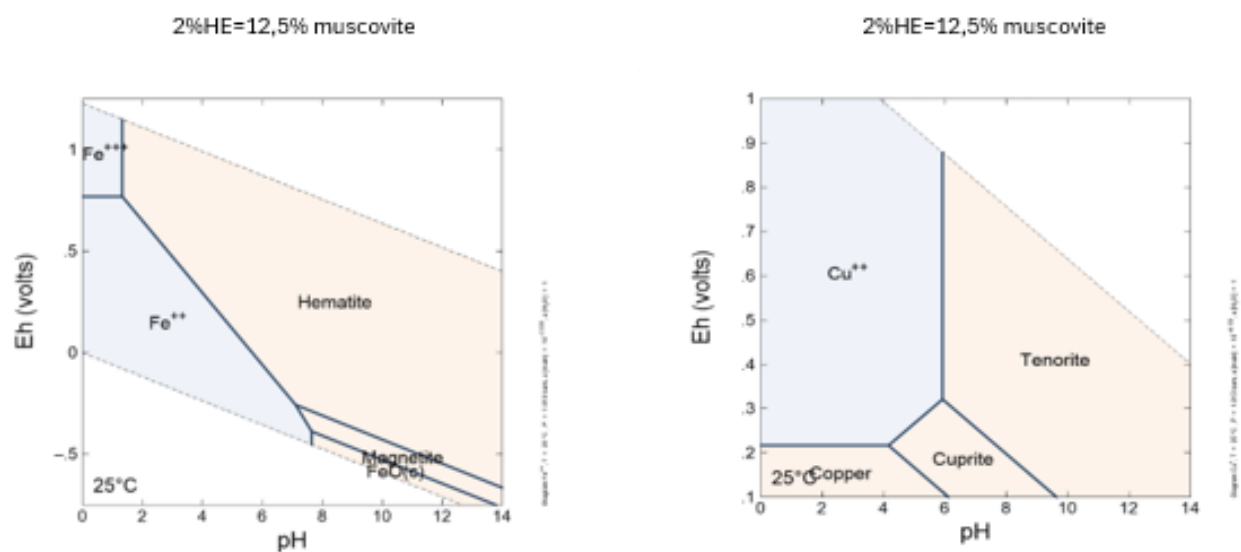


Figure A2.2 Mélanges avec 12,5% de muscovite (fin)

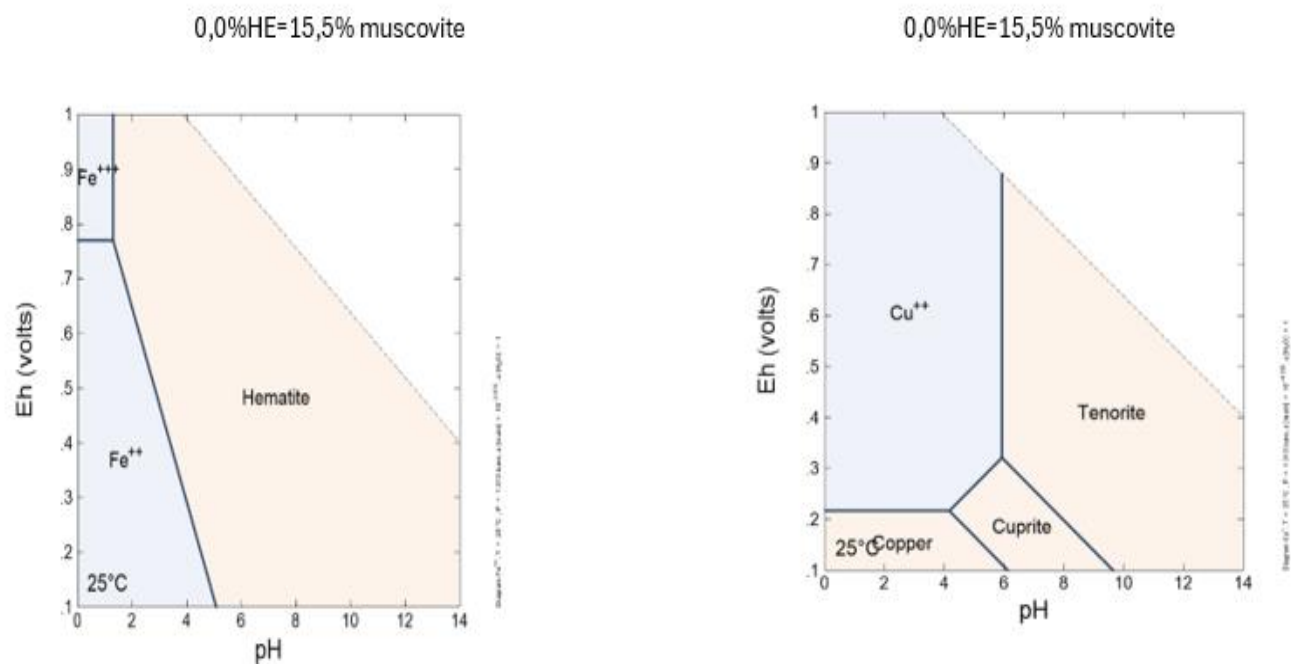


Figure A2.3 Mélanges avec 15,5% de muscovite

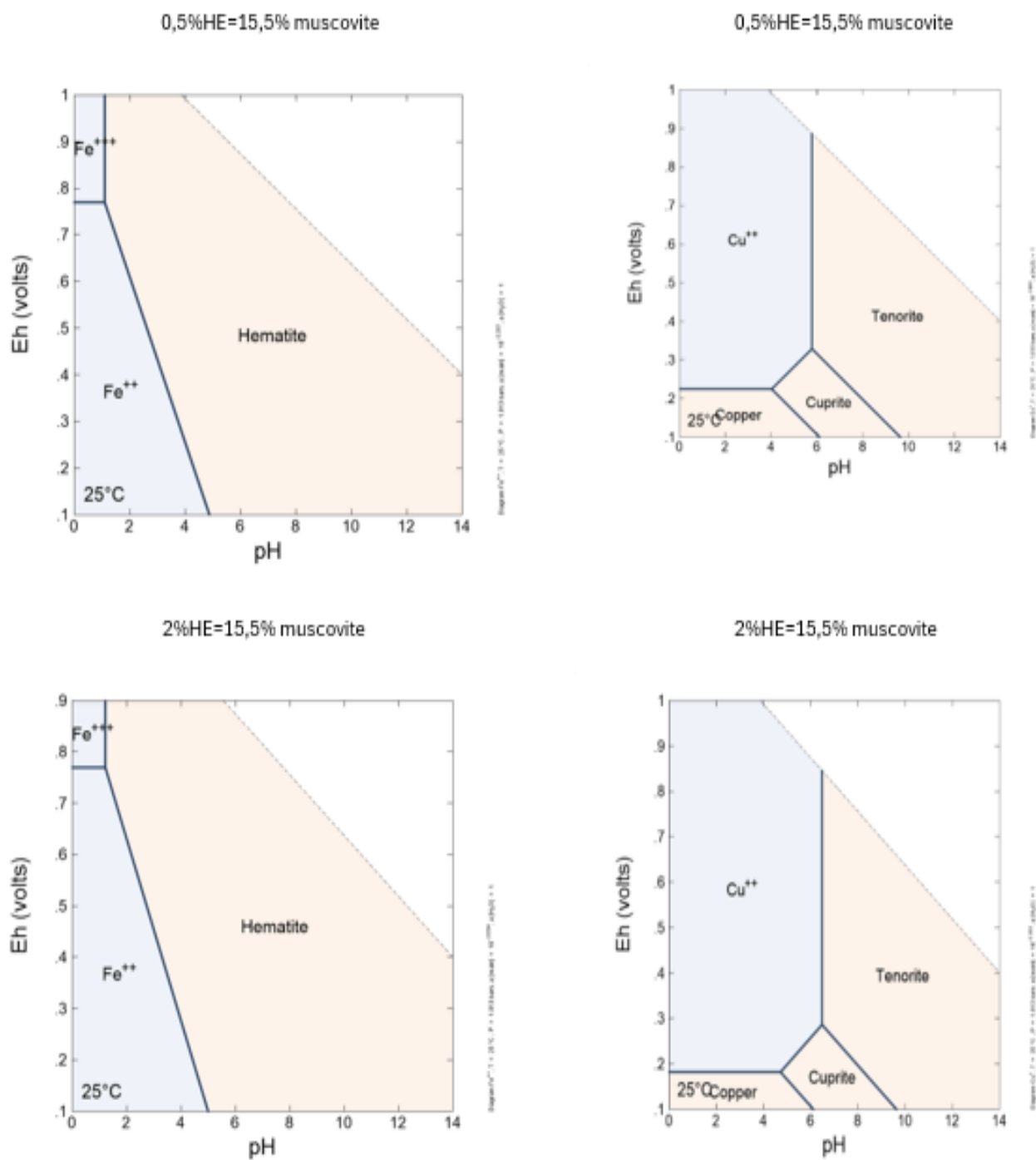


Figure A2.3 Mélanges avec 15,5% de muscovite (suite)

### A3. Graphiques des éléments chimiques

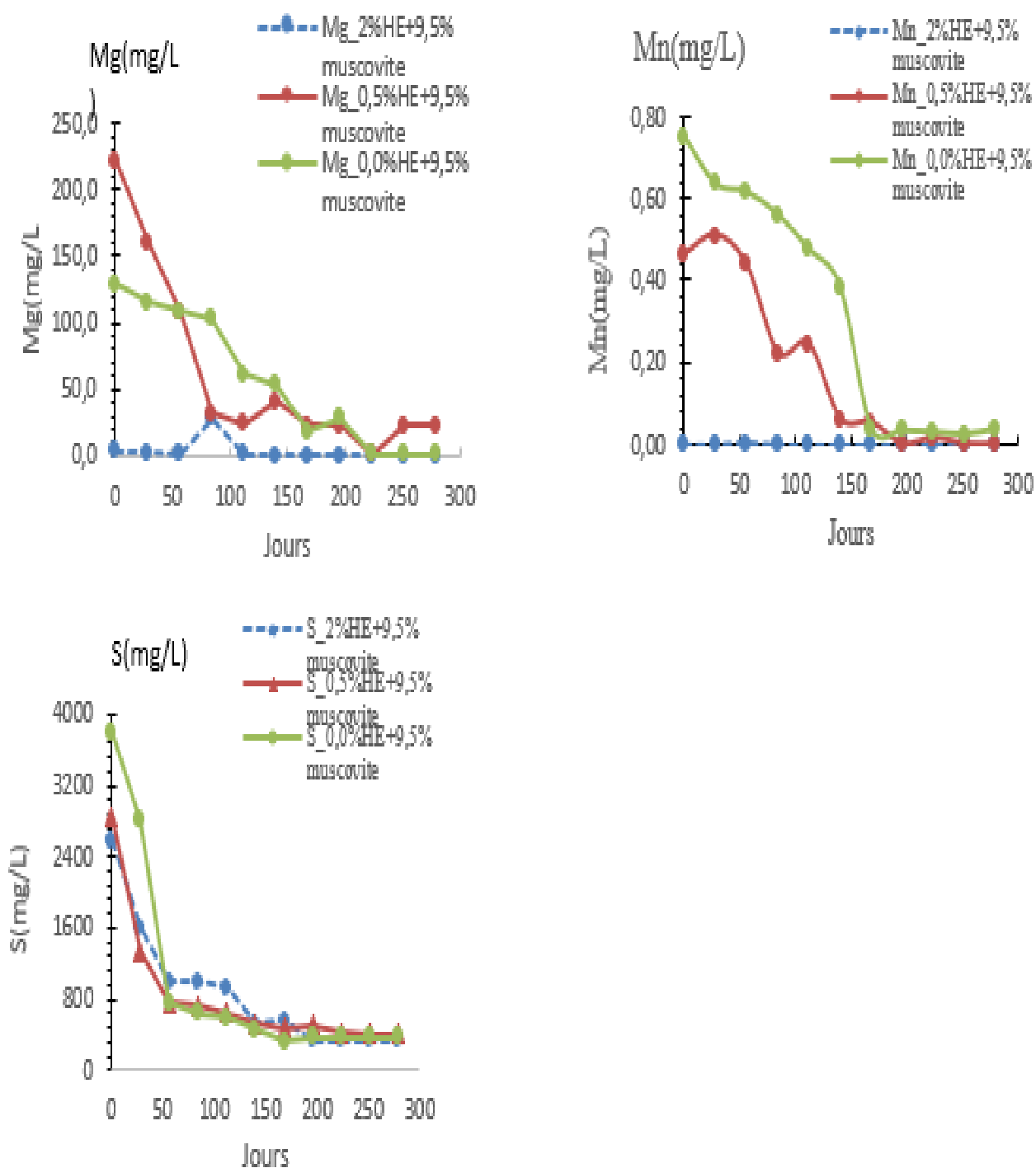


Figure A3.1 Mélanges avec 9,5% de muscovite



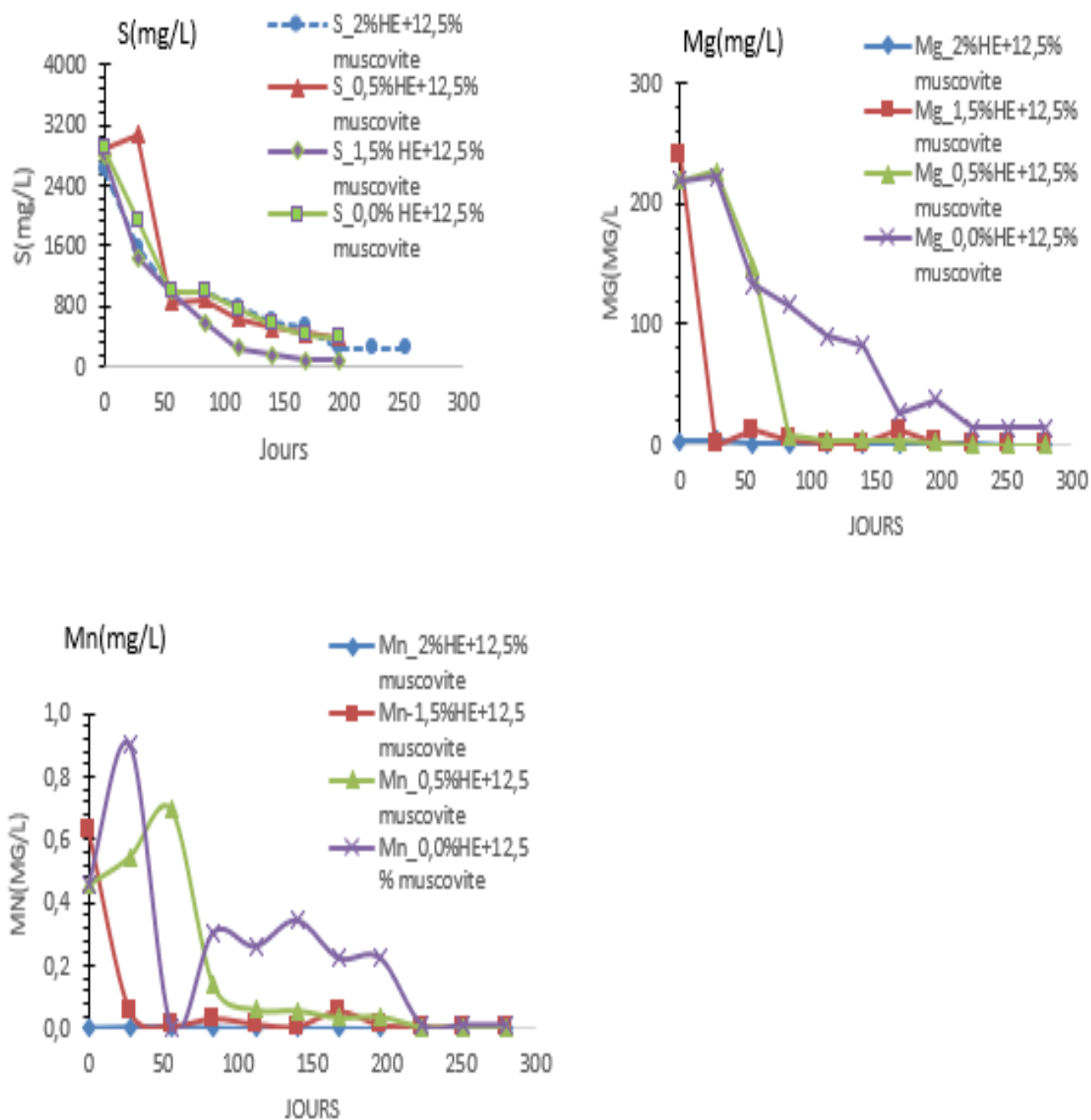


Figure A3.2 Mélanges avec 12,5% de muscovite

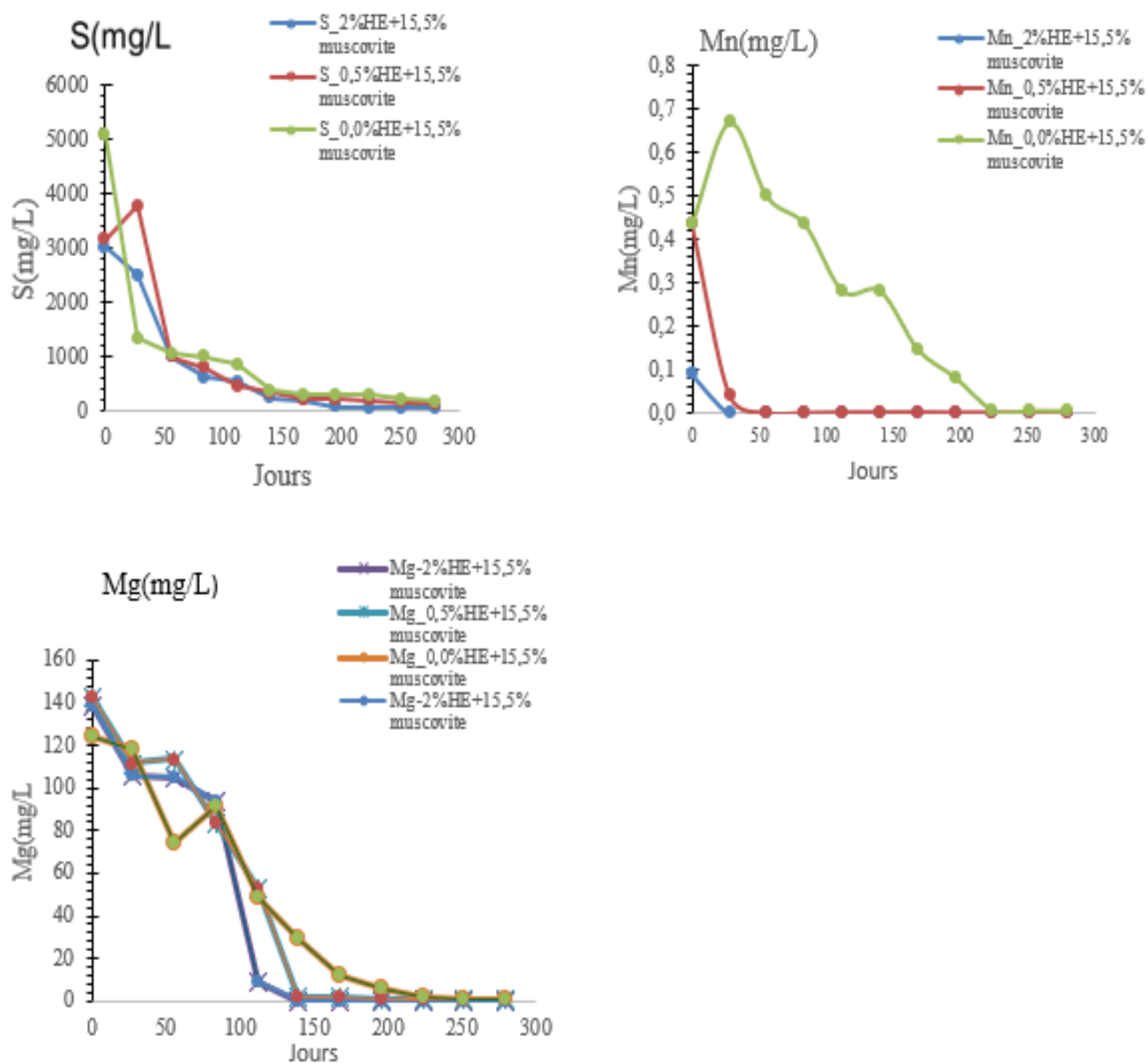


Figure A3.3 Mélanges avec 15,5% de muscovite

## ANNEXE B DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE PAR CYCLE (C1-C10) DE MOUILLAGE-DRAINAGE

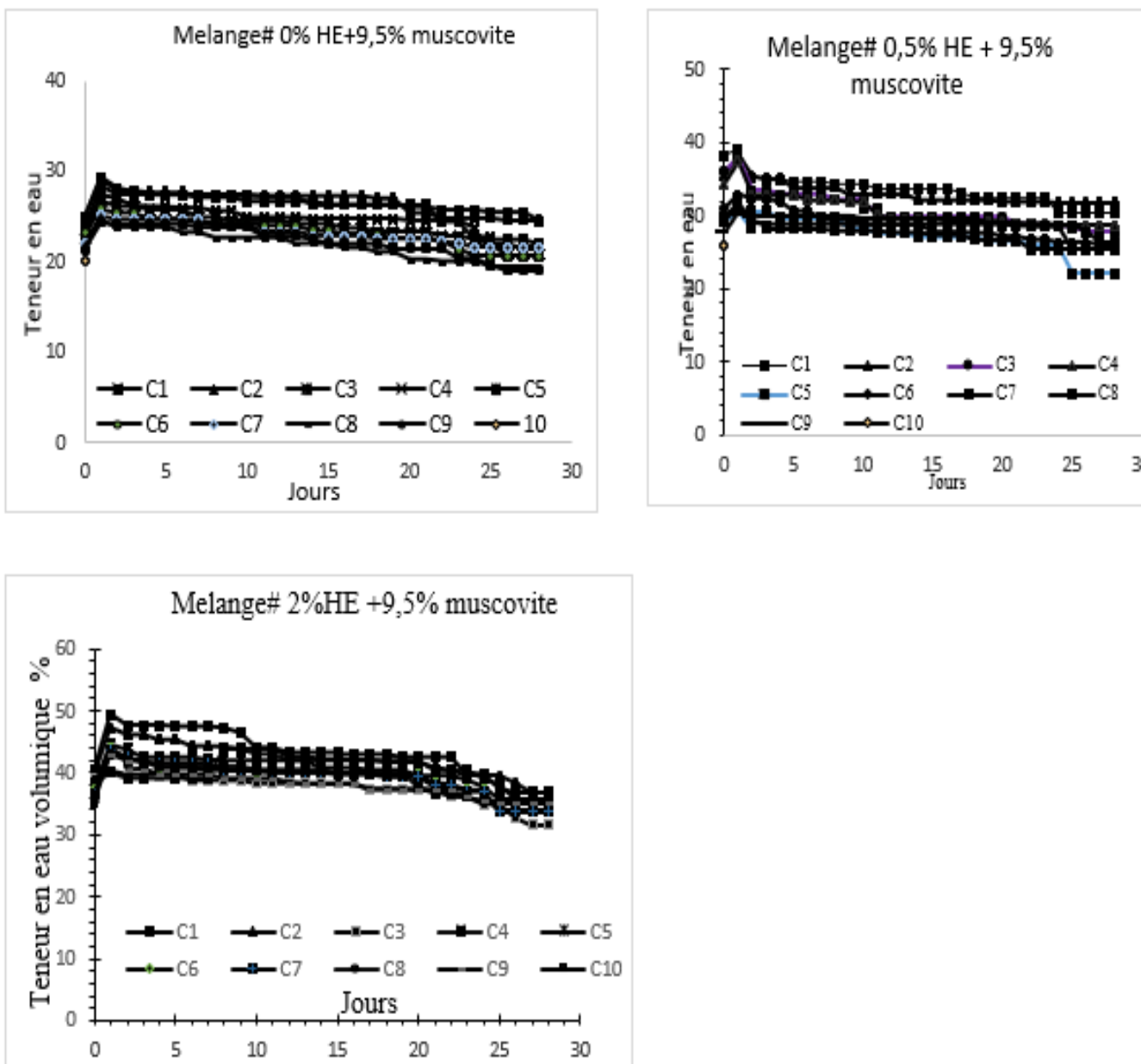


Figure B1 Mélanges avec 9,5% de muscovite

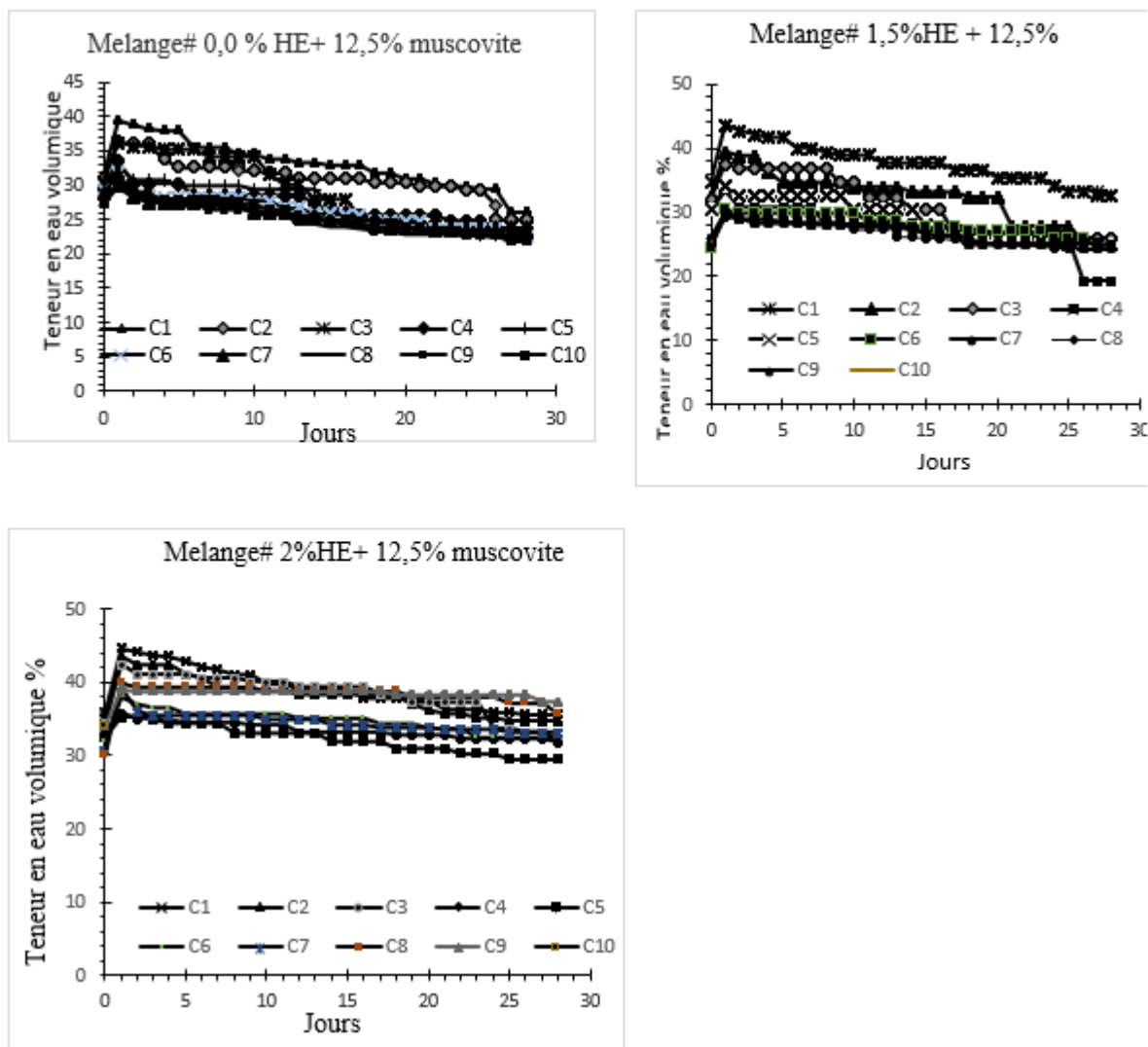


Figure B2 Mélanges avec 12,5% de muscovite

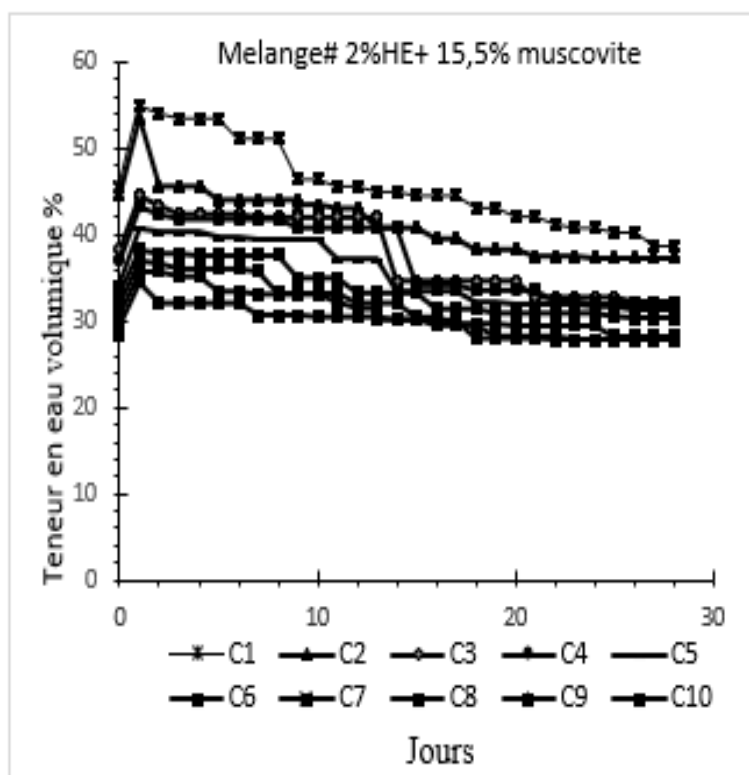
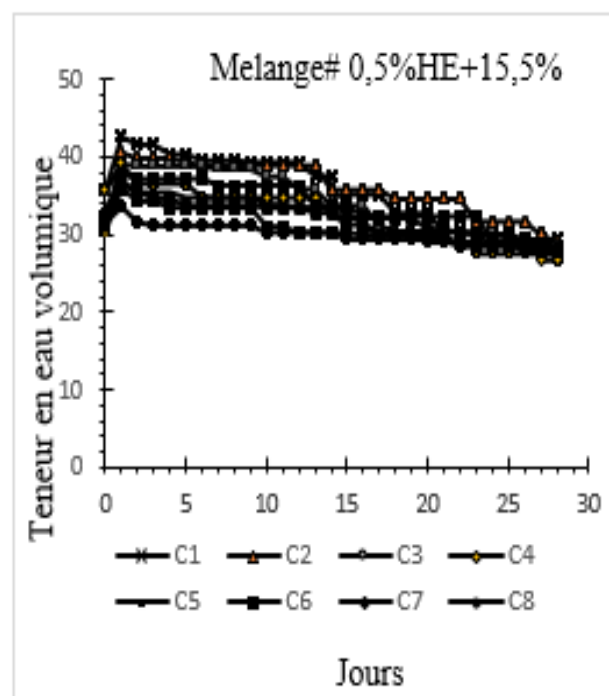
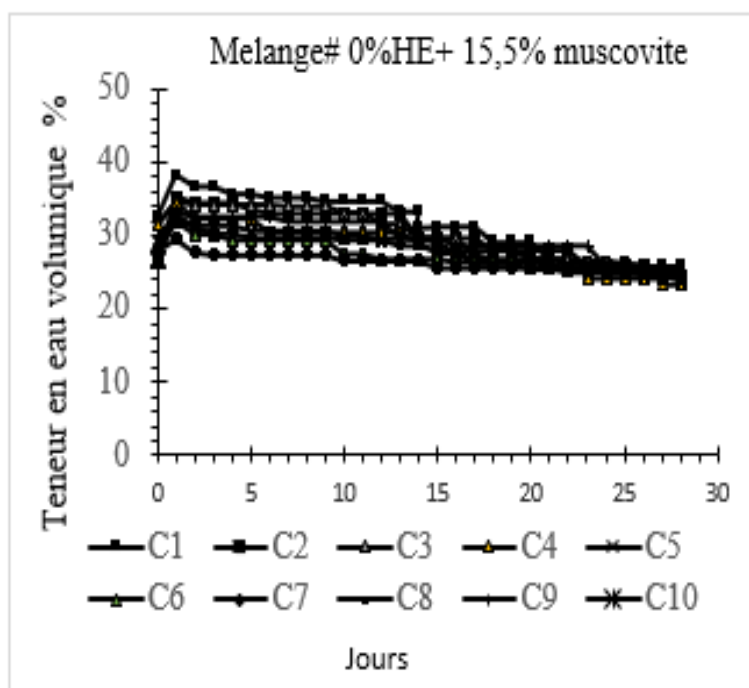


Figure B3 Mélanges avec 15,5% de muscovite