

Amendement des argiles afin de limiter les effets engendrés par les cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique saturée

Abdessalam Merzouk, Abdelkabir Maqsoud, Tikou Belem,
IRME, Rouyn Noranda, Québec, Canada
Marie-Elise Viger
Fonderie Horne _Glencore, Rouyn-Noranda, QC, Canada



GeoCalgary
2022 October
2-5
Reflection on Resources

RÉSUMÉ

Différentes techniques ont été développées pour la restauration efficace et durable des parcs à résidus. Parmi ces techniques on peut citer : les barrières étanches et les barrières à l'oxygène. Les barrières étanches peuvent être composées d'argiles naturelles compactées ayant une faible conductivité hydraulique (k_{sat}). Toutefois ces matériaux argileux et en raison de leur susceptibilité aux effets de gel-dégel, des modifications importantes au niveau de leur propriétés hydrogéologiques peuvent survenir conduisant ainsi à une augmentation de leur k_{sat} . Ces effets peuvent être minimisés par l'ajout d'amendement.

Afin d'évaluer les possibilités d'utilisation des matériaux argileux abitibiens dans la restauration minière, cette étude a été initiée. Ainsi ces matériaux argileux ont été amendés avec des silts et du sable à différentes proportions; ensuite ces mélanges ont fait l'objet de différents essais hydrogéologiques et géotechniques. Les résultats de ces investigations ont permis de montrer que l'effet de gel-dégel au niveau de k_{sat} peut être réduit et de ce fait ces matériaux argileux peuvent être valorisés comme matériaux de construction dans les barrières hydrauliques étanches.

ABSTRACT

Different techniques have been developed for the reclamation of tailings storage facilities. Among of these technics one can find: hydraulic barriers and oxygen barriers. Hydraulic barrier can be made by compacted natural clays with low hydraulic conductivity (k_{sat}). However, due to the susceptibility of these clay materials to freeze-thaw effects, significant changes in their hydrogeological properties may occur allowing an increase of the k_{sat} . These effects can be minimized by the amendments addition. In order to evaluate the possibilities of using Abitibi clay materials in mine site reclamation, this study was performed. Thus, these materials were amended with silts and sand at different proportions; then these materials were submitted to various hydrogeological and geotechnical tests. Investigation results show that the freeze-thaw effect on the k_{sat} can be reduced and therefore these clayey materials can be used as construction materials in hydraulic barriers.

1 INTRODUCTION

La restauration des parcs à résidus miniers générateurs du drainage minier acide (DMA) constitue est un défi environnemental de taille pour l'industrie minière. Cette restauration a pour objectif l'élimination des risques de génération et de propagation de contaminants.

Ainsi, dans les dernières décennies, plusieurs techniques de restauration ont été développées en climat tempéré et visent à contrôler les principaux facteurs à l'origine de la génération du DMA, soient l'infiltration d'eau, le flux de l'oxygène et les minéraux sulfureux (Aubertin et al., 1995; Maqsoud et al., 2021). Le choix de la technique de restauration dépendra d'un certain nombre de critères dont les principaux sont : la disponibilité des matériaux, le type d'aires d'entreposage de rejets miniers (parc à résidus miniers ou halde à stériles), l'importance de la génération d'acide, le climat, la stabilité géotechnique des ouvrages etc..

L'utilisation des matériaux naturels (tel que le gravier, le sable, le silt et l'argile) ou issus de l'exploitation minière non problématiques au niveau environnemental (ex., rejets miniers non générateurs d'acide, stériles et boues de traitements) s'avère généralement plus avantageuse sur le plan économique que l'utilisation de matériaux synthétiques. Toutefois, des contraintes relatives à la

disponibilité des matériaux ou à la géométrie des aires d'accumulation peuvent faire en sorte que l'utilisation de matériaux synthétiques au sein d'un recouvrement soit avantageuse.

En Abitibi-Témiscamingue et dans le nord du Québec et de l'Ontario, les matériaux argileux sont disponibles sous forme de plaines argileuses dont l'épaisseur peut dépasser dans certains cas les 50 m (Cloutier et al., 2016) (au nord de la Sarre).

Ainsi, pour les sites miniers en exploitation en Abitibi-Témiscamingue, ces matériaux argileux sont fréquemment disponibles. Toutefois en raison de leur susceptibilité aux effets de gel-dégel qui engendrent des modifications importantes au niveau de leur propriétés hydrogéologiques, ces matériaux sont peu utilisés dans la construction des ouvrages miniers et encore moins dans la restauration des sites miniers en tant que barrière hydraulique en raison de l'augmentation de la conductivité hydraulique (k_{sat}) au-delà de la limite permise pour que le matériel soit considéré comme imperméable ($k_{sat} = E-09$ m/s).

L'amendement de ces matériaux argileux peut réduire voire minimiser les effets de gel-dégel. Cet amendement pourrait être réalisé par l'ajout de matériaux silteux et/ou sableux à différentes proportions. De ce fait les mélanges à base d'argile amendés pourraient constituer des matériaux

ayant les propriétés requises pour agir comme barrière hydraulique (voir Maqsood et al. 2021).

Le présent article se penche sur évaluation au laboratoire des propriétés hydrogéologiques et géotechniques des matériaux argileux amendés.

Ainsi dans cet article on trouve une description des matériaux à l'étude, la méthodologie utilisée et les résultats des investigations. Cet article se termine par une conclusion et des recommandations quant à l'utilisation des argiles dans la restauration des sites miniers.

2 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Matériaux

Différents matériaux ont été échantillonnés dans les propriétés de la Fonderie Horne à proximité de la ville de Rouyn-Noranda. Ainsi, de l'argile, du sable et du silt ont été échantillonnés.

Ensuite, différents mélanges à base de matériau argileux ont été conçus par l'ajout d'amendement à base de silt et/ou du sable à différentes proportions. Ainsi, les proportions des mélanges (Mél. # – argile amendée) qui ont été préparés sont présentés au Tableau 1, soit au total 8 mélanges (Mél.#) en plus de l'argile naturelle.

Les matériaux naturels et les mélanges conçus ont été préalablement séchés au four et ont fait l'objet de caractérisations détaillées.

Tableau 1. Proportion des matériaux utilisés dans les mélanges à l'étude

	Mél. #0	Mél. #1	Mél. #2	Mél. #3	Mél. #4	Mél. #5	Mél. #6	Mél. #7	Mél. #8
Argile (%)	100	95	90	85	95	90	85	90	80
Silt (%)	0	5	10	15	0	0	0	5	10
Sable (%)	0	0	0	0	5	10	15	5	10

2.2 Caractérisations des matériaux

2.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée à l'aide du granulomètre laser Malvern Mastersizer pour les différents matériaux échantillonnés. Cet appareil mesure la déviation d'un faisceau laser lorsqu'il passe au travers d'une suspension aqueuse du matériau à analyser. La déviation du faisceau laser dépend de la géométrie du grain avec lequel il y a eu incidence (Henk, 2009).

Le granulomètre laser est recommandé pour les fractions granulométriques comprises entre 0,05 µm et 879 µm. La précision de mesure est de ±2% pour le diamètre des particules.

En plus de ces analyses au granulomètre laser, les courbes granulométriques des mélanges ont été prédites,

en se basant sur celles des constituants du mélange, c'est-à-dire l'argile et le silt et/ou le sable. Cette courbe a été prédite à l'aide de la formule suivante (Kanteyé, 2019) :

$$P(d) = \frac{P(d_{argile})\alpha(1+w_{silt\ ou\ sable})+P(d_{silt\ ou\ sable})(1+w_{argile})}{(1+w_{argile})+\alpha(1+w_{argile})} \quad [1]$$

Où :

- $P(d_{argile})$: le pourcentage de passant au diamètre d pour l'argile;
- $P(d_{silt\ ou\ sable})$: le pourcentage de passant au diamètre d pour le silt 1 ou sable 1;
- $w_{silt\ ou\ sable}$: la teneur en eau initiale du silt ou sable;
- w_{argile} : la teneur en eau initiale de l'argile;
- α : le pourcentage d'argile dans le mélange

L'équation [1] sert à estimer les courbes granulométriques des mélanges de matériaux humides, cependant dans ces travaux les matériaux utilisés étaient secs ($w_{silt\ ou\ sable} = w_{argile} = 0$). Cette prédiction est faite dans le but de la validation de l'équation 1 afin de réduire le nombre d'analyse pour les futurs travaux sur les mélanges.

2.2.2 Densité relative

La densité relative des grains solides caractérise la masse volumique des grains solides d'un échantillon par rapport à la masse volumique de l'eau. La densité relative des grains solides (G_s) a été mesurée en utilisant un pycnomètre à hélium (erreur de l'ordre de ± 0,01 %) Quantachrome Instruments, UltraPyc 1200e (Micromeritics Instrument Corporation, 2001). La procédure est celle qui a été élaborée par l'ASTM D5550-14 (ASTM 2014). Cette méthode utilise le principe du déplacement des fluides d'Archimède et la loi de Boyle sur la dilatation des gaz, afin de déterminer la densité d'un matériel. Cette mesure nécessite que le matériau soit complètement sec. L'hélium est utilisé comme gaz d'essai en raison de sa forte diffusivité dans les petits pores (Analytical, 2017). L'appareil est couplé à un programme d'acquisition micrométrique qui affiche les résultats de l'analyse. Il est important de mentionner que les matériaux doivent être préalablement broyés permettant ainsi d'avoir des particules dont la taille est inférieure à 500 µm.

2.3 Caractérisation hydrogéotechnique des matériaux et des mélanges

2.3.1 Limite de liquidité

La limite de liquidité (LL) a été déterminée en utilisant l'appareil de Casagrande. On estime de façon arbitraire que le sol a atteint la LL lorsque la coupelle tombant d'une hauteur de 10 mm, doit frapper la base 25 fois pour refermer (sur une distance de 13 mm) une rainure qui a été pratiquée dans l'échantillon de sol.

2.3.2 Limite de plasticité

La limite plasticité (LP) est la teneur en eau à laquelle un échantillon de matériau commence à se désintégrer en morceaux de 3 à 10 mm de long lorsqu'il est enroulé dans

un cylindre de 3 mm de diamètre. Ainsi, l'échantillon est roulé en forme de fuseau ensuite aminci progressivement. Le test est arrêté lorsque l'échantillon aminci a atteint des morceaux ayant un diamètre de 3 mm et une longueur de 3 à 10 mm. Finalement, la teneur en humidité de l'échantillon est déterminée.

Le test est réalisé consécutivement sur 5 échantillons et la LP est déterminée en calculant la moyenne arithmétique des 5 taux d'humidité obtenus.

2.3.3 Essai Proctor

Le test de compactage Proctor modifié a été effectué pour les trois matériaux naturels et les mélanges. Le compactage consiste à appliquer suffisamment d'énergie au sol pour réduire l'indice des vides, augmentant ainsi sa compacité. Par conséquent, la densité sèche (ρ_d) du sol compacté qui est déterminée à l'aide de l'équation 2 sera supérieure à celle du sol non compacté. C'est cette caractéristique qui permet de vérifier l'efficacité du compactage.

$$\rho_d = \frac{G_s \rho_w}{\omega G_s + \rho_w} \quad [2]$$

Où :

ρ_d : masse volumique sec;

G_s : densité relative des grains solides;

S_r : degré de saturation;

ρ_w : masse volumique de l'eau;

ω : teneur en eau.

2.3.4 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) a été déterminée au laboratoire dans une cellule de pression (appelée Tempe cell) pour le sable et le silt et par la méthode de cellule de pression (Pressure plate) pour l'argile et les mélanges à base d'argile (Mél. #1, Mél #2, ..., Mél #8). Les points expérimentaux obtenus exprimant la teneur en eau volumique (θ) en fonction de la succion (Ψ) ont été lissés avec l'équation de van Genuchten en utilisant le logiciel RETC. La pression d'entrée d'air AEV est déterminée graphiquement à l'aide de la méthode des tangentes (Fredlund et Xing, 1994).

2.3.5 Conductivité hydraulique saturée

Pour déterminer la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) d'un matériau, on peut utiliser les perméamètres à parois rigides (sous charges constantes et variables) et les perméamètres à parois flexibles (en unités triaxiales, sous charges variables). Pour les deux types de dispositifs expérimentaux, une pression d'eau positive a été appliquée aux échantillons considérés comme saturés.

Il est important de mentionner que k_{sat} ne dépend que de l'indice de vide (e) et de la taille des grains (Chapuis, 2002). Le perméamètre à parois rigides avec essai à charge constante a été utilisé pour les matériaux granulaires (sable) dont $k_{sat} > 10^{-5}$ m/s, alors que le perméamètre à parois rigides avec essai à charge variable a été utilisé pour mesurer k_{sat} pour le silt. Quant à celle des matériaux

argileux ainsi que les mélanges, elle a été mesurée en utilisant le perméamètre à parois flexibles.

2.3.6 Essais de gel-dégel

Les matériaux argileux ainsi que les mélanges ont été soumis aux cycles de gel-dégel. Ainsi les cellules triaxiales qui ont été utilisées pour les mesures de k_{sat} (k_{sat} initiale) ont été conservées et soumises à 10 cycles de gel-dégel unidirectionnel (voir Figure 1). Comme le montre la figure 1, la cellule a été isolée pour limiter la sublimation, l'évaporation et pour favoriser le gel unidirectionnel. Une attention particulière a également été portée à la décongélation des échantillons pour limiter l'exposition à la température ambiante et à l'évaporation.

Après les cycles de gel-dégel, k_{sat} ont été mesurés afin d'évaluer l'impact de ces cycles sur ce paramètre hydrogéologique. Ainsi, k_{sat} a été mesurée après 1, 2, 4, 6, 8 et 10 cycles de gel-dégel.

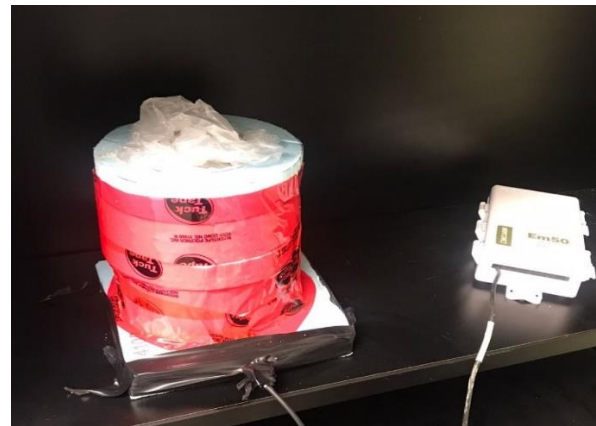


Figure 1. Cellule de perméamètre isolé et utilisée pour l'essai de la conductivité hydraulique saturée soumis à des cycles de gels et dégels.

3 RÉSULTATS DE LA CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET DES MÉLANGES

3.1 Propriétés physiques

Les résultats pour la densité relative des grains solides et les limites de consistance (LL et LP) pour les matériaux et les mélanges à base d'argile sont présentés dans le tableau 2.

La densité relative des grains solide G_s correspond respectivement à 2.61, 2.68 et 2.7 pour l'argile, le silt et le sable. La LL correspond à 35,43% et 36,13% respectivement pour le silt et l'argile. La LP quant à elle correspond à 26,52% et 18,02% respectivement pour le silt et l'argile.

Pour les mélanges amendés avec du silt (Mél. #1, 2 et 3) le G_s correspond respectivement à 2.68, 2.63 et 2.66 pour Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3. La LL correspond à 40.76%, 35.8% et 35.75% respectivement pour Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3 et la LP correspond à 27.13%, 26.35% et 23.04% respectivement pour Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3.

Pour l'argile mendée avec le sable, le Gs correspond respectivement à 2.68, 2.61 et 2.65 pour Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6. La LL correspond à 38.88%, 34.97% et 31.6% respectivement pour Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6 et la LP correspond à 24.95%, 24.91% et 25.76% respectivement pour Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6.

Pour L'argile amendée avec du silt et de sable, le Gs correspond respectivement à 2.68 et 2.65 pour Mél. #7 et Mél. #8, la LL correspond à 34.56% et 33.88% respectivement pour Mél. #7 et Mél. #8. La LP correspond à 29.59% et 26.12% respectivement pour Mél. #7 et Mél. #8.

Tableau 2. Les paramètres physiques et géotechniques des matériaux et des mélanges

Mélanges		Limite liquidité (%)	Limite Plasticité (%)	Indice de plasticité (%)	Densité relative des grains Gs
matériaux	Silt	35,43	26,52	8,91	2,68
	Sable	-	-	-	2,7
	Mél. #0	36,13	18,02	18,11	2,61
Argile amendé avec silt	Mél. #1	40,76	27,13	13,63	2,68
	Mél. #2	35,8	26,35	9,45	2,63
	Mél. #3	35,75	23,04	12,71	2,66
Argile amendé avec sable	Mél. #4	38,88	27,95	10,93	2,68
	Mél. #5	34,97	24,91	10,06	2,61
	Mél. #6	31,6	25,76	5,84	2,65
Argile amendé avec silt et sable	Mél. #7	34,56	29,59	4,97	2,68
	Mél. #8	33,88	26,12	7,76	2,65

Ces caractérisations ont montré que IP des différents mélanges qui est évalué à partir de LL et de LP a subi une certaine réduction par rapport à celle de l'argile non amendée. Ainsi IP est passé de 18,11 à 4.97 % respectivement pour l'argile non amendée et celle qui a été amendée avec du sable (5%) et du silt (5%).

3.2 Analyses granulométriques

Les courbes granulométriques des matériaux utilisés sont présentées à la figure 2a. Ces courbes montrent clairement le contraste granulométrique entre les différents matériaux utilisés. La figure 2b montre également que les courbes prédites sont similaires à celles des courbes mesurées. Les courbes mesurées ont également été utilisées pour la détermination des différents paramètres granulométriques (Voir Tableau 3).

Pour les matériaux de base, les D_{10} , D_{30} et D_{60} , correspondent respectivement à 0,96 μm , 2,22 μm et 5,73 μm pour l'argile; 24,34 μm , 54,74 μm et 98,28 μm pour le silt et 81,87 μm , 158,40 μm et 261,90 μm pour le sable. Les C_U et C_C correspondent respectivement à 5,98 et 0,90 pour l'argile, 3,20 et 1,17 pour le sable et 4,04 et 1,25 pour le silt. La granulométrie est serrée pour le silt et le sable ($2 \leq C_u \leq 5$) alors qu'elle peut être considérée comme semi-étalée pour l'argile ($C_u \leq 20$) McCarthy (1982).

Les matériaux étudiés ont été classés en utilisant la classification de l'USCS-ASTM (Unified Soil Classification System). Cette classification tient compte des résultats des analyses granulométriques et des limites d'Atterberg. Ainsi, l'argile est classifiée comme une argile à faible plasticité (CL), le silt correspond à un sable silteux (SM) et le sable correspond à un sable mal gradué (SP).

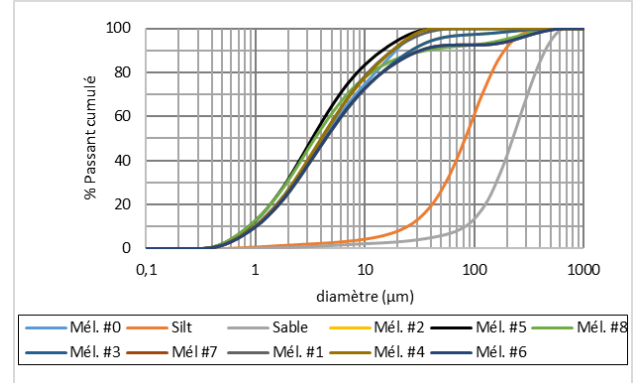


Figure 2a. La courbe granulométrique des matériaux étudiés et des mélanges

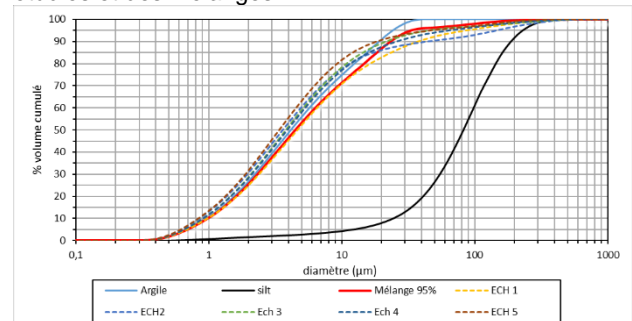


Figure 2b. La courbe granulométrique prédites des matériaux étudiés et des mélanges

Tableau 3. Paramètres granulométriques des mélanges étudiés

Mélanges		D_{10} (μm)	D_{30} (μm)	D_{60} (μm)	Coefficient d'uniformité	Coefficient de courbure
Matériaux	Silt	24,34	54,74	98,28	4,04	1,25
	Sable	81,87	158,4	261,9	3,2	1,17
Argile amendée avec silt	MEL #0	0,96	2,22	5,73	5,98	0,9
	MEL #1	1,05	2,32	6,32	6,02	0,81
	MEL #2	1,12	2,62	7,1	6,34	0,86
Argile amendée avec sable	MEL #3	1,24	2,75	8,06	6,5	0,75
	MEL #4	1,09	2,45	6,22	5,7	0,88
	MEL #5	1,14	2,69	7,25	6,36	0,87
Argile amendée avec silt et sable	MEL #6	1,22	2,86	8,42	6,9	0,8
	MEL #7	1,13	2,57	7,01	6,2	0,83
	MEL #8	1,32	2,84	10,2	7,72	0,6

Pour l'argile amendée avec du silt, le D_{10} correspond respectivement à 1.05, 1.12 et 1.24 pour Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3. le D_{30} correspond à 2,32, 2,62 et 2,75 respectivement pour Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3 et le D_{60} correspond à 6,32, 7,1 et 8,06 respectivement pour Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3. Le C_U et le C_C qui correspondent respectivement à 6,02 et 0,81 pour Mél. #1 et 6,34 et 0,86 pour Mél. #2 et 6,5 et 0,75 pour Mél. #3.

Pour l'argile amendée avec du sable, le D_{10} correspond à 1,09, 1,14 et 1,22 respectivement pour Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6; le D_{30} correspond à 2,45, 2,69 et 2,86 respectivement pour Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6. Le D_{60} correspond à 6,22, 7,25 et 8,42 respectivement pour Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6. Les C_U et C_C correspondent respectivement à 5,7 et 0,88 pour Mél. #4, 6,36 et 0,87 pour Mél. #5 et 6,9 et 0,8 pour Mél. #6.

Pour l'argile amendée avec du sable et du silt, le D_{10} correspond à 1,13 et 1,32 respectivement pour Mél. #7 et Mél. #8; le D_{30} correspond à 2,57 et 2,84 respectivement pour Mél. #7 et Mél. #8; le D_{60} correspond respectivement à 7,01 et 10,2 pour Mél. #7 et Mél. #8. Le C_U et C_C correspondent à 6,2 et 0,83 respectivement pour Mél. #7 et 7,72 et 0,6 pour Mél. #8.

La granulométrie des mélanges à base d'argile amendée avec le silt et/ou le sable est semi-étalée ($5 \leq C_U \leq 20$) McCarthy (1982). Selon la classification USCS les mélanges d'argile amendée avec de silt et/ou sable sont considérés comme des argiles à faible plasticité (CL).

Il est important de mentionner que l'ajout d'amendement a engendré une augmentation du C_U et une baisse de C_C .

3.3 Essai de Proctor

La figure 3 présente les résultats obtenus pour les essais Proctor sur l'argile. Ainsi cette figure présente la variation de densité sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau w . La figure présente également la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau.

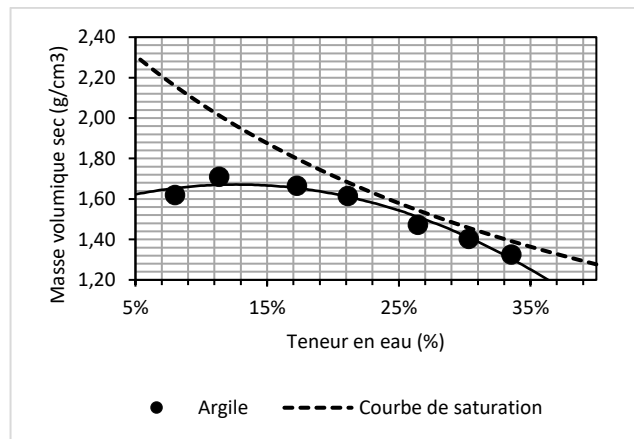


Figure 3. Courbe Proctor pour l'argile

Le tableau 4 résume les principales caractéristiques des matériaux et des différents mélanges à base des matériaux argileux à l'optimum Proctor, à savoir, la teneur en eau (w_{opt}), la masse volumique sèche maximale (ρ_{d-max}) et l'indice des vides (e_{opt}).

L'argile non amendée présente une w_{opt} de 12,8% pour un e_{opt} de 0,45 et un poids unitaire sec de 17,49 kN/m³. Le silt présente une w_{opt} de 11,2% pour un e_{opt} de 0,38 et un

poids unitaire sec de 16,28 kN/m³. Le sable présente une w_{opt} de 15,5% pour un e_{opt} de 0,52 et un poids unitaire sec de 17,36 kN/m³.

Pour l'argile amendée avec du silt, on peut observer que le Mél. #1 présente une w_{opt} de 9,5% pour un e_{opt} de 0,32 et un poids unitaire sec de 1,82 g/cm³. Le Mél. #2 présente une w_{opt} de 10,9% pour un e_{opt} de 0,31 et un poids unitaire sec de 1,79 g/cm³. Le Mél. #3 présente une w_{opt} de 12,5% pour un e_{opt} de 0,32 et un poids unitaire sec de 1,81 g/cm³.

Tableau 4. Résultats des essais Proctor des matériaux et des mélanges étudiés.

Mélanges		e opt (-)	w opt (%)	pd (g/cm ³)
Matériaux	Silt	0,38	11,2	1,66
	Sable	0,52	15,5	1,77
	Mél. #0	0,45	12,8	1,79
Argile amendée avec silt	Mél. #1	0,32	9,5	1,82
	Mél. #2	0,31	10,9	1,791
	Mél. #3	0,32	12,5	1,81
Argile amendée avec sable	Mél. #4	0,34	10,6	1,77
	Mél. #5	0,31	8,8	1,78
	Mél. #6	0,32	11,9	1,793
Argile amendée avec silt et sable	Mél. #7	0,3	10,2	1,86
	Mél. #8	0,28	11,1	1,91

Pour l'argile amendée avec du sable on peut observer que le Mél. #4 présente une w_{opt} de 10,6% pour un e_{opt} de 0,34 et un poids unitaire sec de 1,7 g/cm³. Le Mél. #5 présente une w_{opt} de 8,8% pour un e_{opt} de 0,31 et un poids unitaire sec de 1,78 g/cm³. Le Mél. #6 présente une w_{opt} de 11,9% pour un e_{opt} de 0,32 et un poids unitaire sec de 1,79 g/cm³.

Finalement pour l'argile amendée avec le silt et le sable On observe que le Mél. #7 présente une w_{opt} de 10,2% pour un e_{opt} de 0,30 et un poids unitaire sec de 1,86 g/cm³. Le Mél. #8 présente une w_{opt} de 11,1% pour un e_{opt} de 0,28 et un poids unitaire sec de 1,91 g/cm³.

Ainsi l'amendement a engendré une baisse de l'indice des vides et une augmentation de la teneur en eau à l'optimum Proctor

3.4 Essais de CRE

Les paramètres clés obtenus à partir des CRE expérimentales sont présentés au tableau 5.

Pour les matériaux de base on observe que la teneur en eau à saturation du sable, du silt et de l'argile correspond respectivement à 37 %, 35% et 44%. Quant à la pression d'entrée de l'air (AEV) du sable, du silt et de l'argile, elle correspond respectivement à 5,2 kPa, 7,8 kPa et 65 kPa.

Pour l'argile amendée avec du silt, les résultats montrent que la teneur en eau à saturation du Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3 correspond respectivement à 40 %, 41% et 37%. La AEV du Mél. #1, Mél. #2 et Mél. #3 correspond respectivement à 300 kPa, 200 kPa et 130 kPa.

Pour l'argile amendée avec du sable la teneur en eau à saturation du Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6 correspond respectivement à 37 %, 37% et 38%. La pression d'entrée AEV du Mél. #4, Mél. #5 et Mél. #6 correspond respectivement à 125 kPa, 190 kPa et 198 kPa.

Pour l'argile amendée avec du silt et du sable, le Mél. #7 présente une teneur en eau à saturation de 38% et une AEV de 140 kPa quant au Mél. #8 sa teneur en eau à saturation est de 40% et sa AEV est de 240 kPa.

Ainsi pour tous les mélanges on peut constater une augmentation de la AEV par rapport à celle de l'argile non amendée. Également pour les mélanges à base de silt, on peut constater une réduction de la pression d'entrée de l'air lorsque le pourcentage de silt augmente. Finalement pour les mélanges à base de sable, on observe une augmentation de la pression d'entrée de l'air lorsque le pourcentage de sable augmente.

Tableau 5. Résultats des paramètres de la courbe de rétention pour les matériaux et les mélanges.

Mélanges		AEV (kPa)	teneur en eau saturation (%)
Matériaux	Silt	7,8	35
	Sable	5,2	37
	Mél. #0	65	44
Argile amendée avec silt	Mél. #1	300	40
	Mél. #2	200	41
	Mél. #3	130	37
Argile amendée avec sable	Mél. #4	125	37
	Mél. #5	190	38
	Mél. #6	198	37
Argile amendée avec silt et sable	Mél. #7	140	38
	Mél. #8	240	40

3.5 Conductivité hydraulique saturée

Les données de conductivité hydraulique saturée mesurées pour l'argile, sable et silt sont présentées au tableau 6.

Les k_{sat} mesurées correspondent à 1,2 E-03, 1,10 E-04 et 4,44E-09 m/s respectivement pour le sable, silt et l'argile. Pour les argiles amendées avec le silt, elles correspondent à 5,15 E-11, 5,00E-11 et 1,54 E-11 m/s respectivement pour le Mél. #1, le Mél. #2 et Mél. #3. Pour les argiles amendées avec le sable, les valeurs mesurées correspondent à 3,43E-10, 7,41 E-11 et 8,25 E-11 m/s respectivement pour le Mél. #4, le Mél. #5 et Mél. #6. Pour les argiles amendées avec le silt et le sable, elles correspondent à 4,03E-10 et 3,49E-10 respectivement pour le Mél. #7 et Mél. #8.

Tableau 6. Résultats des essais de perméabilité réalisés pour les matériaux de base et les mélanges étudiés

	Matériaux	k_{sat} (m/s)
Matériaux de base	Sable	1,2 E-05
	Silt	1,10 E-06
	Mél. #0	4,45 E-11
Argile amendée avec du silt	Mél. #1	5,15 E-11
	Mél. #2	5,00E-11
	Mél. #3	1,54 E-11
Argile amendée avec du sable	Mél. #4	3,43E-10
	Mél. #5	7,41 E-11
	Mél. #6	8,25 E-11
Argile amendée avec du sable et du silt	Mél. #7	4,03E-10
	Mél. #8	3,49E-10

Ainsi on peut conclure que l'amendement de l'argile avec du silt a engendré une légère augmentation de k_{sat} alors que pour les mélanges à base de sable et de silt on observe une baisse de k_{sat} .

3.6 Essai de gel-dégel

L'effet des cycles de gel-dégel sur la k_{sat} a été investigué sur les différents mélanges conçus à base d'argiles (voir Tableau 1 pour les proportions des matériaux). Les résultats des essais de gel-dégel sont présentés au tableau 7.

Tableau 7. Résultats des essais de gel-dégel pour les mélanges

	Argile	Argile amendée avec silt				Argile amendée avec sable			Argile amendée avec silt et sable	
	Mél. #0	Mél. #1	Mél. #2	Mél. #3	Mél. #4	Mél. #5	Mél. #6	Mél. #7	Mél. #8	
k_{sat} (m/s)										
1GD	5,29	3,77	3,23	2,09	2,59	3,07	6,2	-	-	
	E-10	E-10	E-10	E-11	E-09	E-10	E-10			
2GD	1,05	1,46	1,98	2,78	3,35	2,87	6,43	2,31	4,07	
	E-09	E-10	E-09	E-10	E-09	E-09	E-10	E-10	E-10	
4GD	4,87	1,56	1,63	3,88	1,35	2,74	5,4	2,7	1,72	
	E-09	E-10	E-08	E-09	E-08	E-09	E-10	E-10	E-10	
6GD	4,17	4,87	1,44	3,4	2,15	2,14	3,19	2,73	2,77	
	E-09	E-09	E-08	E-09	E-08	E-09	E-10	E-10	E-10	
8GD	3,92	5,84	1,29	1,58	2,35	1,06	3,07	6,54	4,12	
	E-09	E-09	E-08	E-09	E-08	E-09	E-10	E-10	E-10	
10GD	5,19	4,91	1,51	1,08	7,91	1,31	4,01	4,92	5,16	
	E-09	E-09	E-08	E-09	E-09	E-09	E-10	E-10	E-10	

Les résultats des essais de gel-dégel ont montré une augmentation de k_{sat} du Mél. #0 qui est composé de 100% d'argile; ainsi k_{sat} est passée de 4,45 E-11 m/s à 4,87 E-9 m/s après 4 cycles de gel-dégel; après cette augmentation, une stabilité de k_{sat} a été observée jusqu'à 10 cycles de gel-dégel. Il s'agit du comportement typique des matériaux argileux (voir Figure 4).

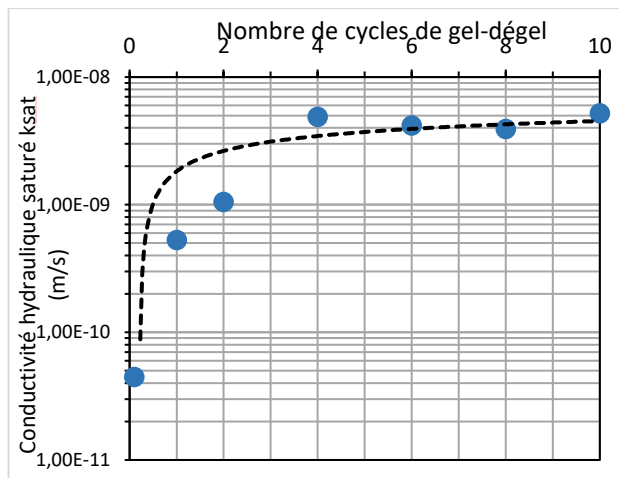


Figure 4. Évolution de k_{sat} en fonction de nombre des cycles gel-dégel pour Mél. #0

Pour le Mél. #1, une augmentation après 6 cycles de gel-dégel a été observée; ainsi k_{sat} est passée de 5,15 E-11 m/s à 4,87 E-9 m/s (voir Figure 4).

Pour Mél. #2 (90% argile et 10% silt), k_{sat} est passée de 5,00 E-11 m/s à 1,63 E-08 m/s après 4 cycles de gel-dégel ensuite une certaine stabilité a été observée jusqu'au 10 cycles de gel-dégel.

Pour le Mél. #3, après 6 cycles de gel-dégel une augmentation a été observée; ainsi k_{sat} est passée de 1,54 E-11 m/s à 3,40 E-9 m/s.

Pour le Mél. #4 une augmentation a été observée après 4 cycles de gel-dégel; k_{sat} est passée de 3,43 E-10 m/s à 1,35 E-8 m/s; ensuite une stabilité a été observée. Pour le Mél. #5, k_{sat} a montré une augmentation de 7,41 E-11 m/s à 2,87 E-09 m/s après 2 cycles de gel-dégel ensuite une stabilité a été observée et qui s'est maintenue jusqu'au 10 cycles de gel-dégel.

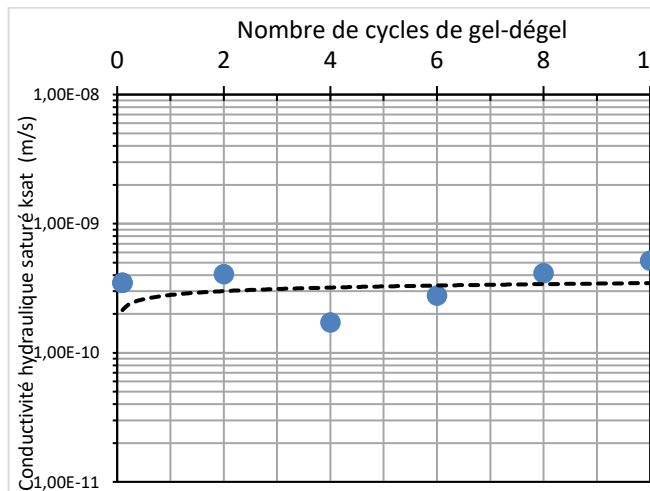


Figure 5. Évolution de k_{sat} en fonction de nombre des cycles gel-dégel pour Mél. #7

Pour les Mél. #6; Mél. #7 et Mél. #8, on observe une légère variation de k_{sat} ; toutefois les valeurs mesurées se situaient

entre 2 et 6 E-10 m/s après 10 cycles de gel-dégel (voir Figure 5).

Les résultats des essais au laboratoire ont montré que les effets des cycles gel-dégel sur k_{sat} ont été minimisés par l'ajout d'amendement (sable et/ou silt). Les mélanges les plus performant (c'est-à-dire ceux qui n'ont pas subi une augmentation importante de k_{sat}) sont les suivants : Mél #1,7; Mél #1,8 et Mél #1,9 et pour lesquels k_{sat} mesurée se situait entre 2 et 6 E-10 m/s après 10 cycles de gel-dégel.

4 Discussion

Les résultats des essais au laboratoire ont montré que les effets des cycles gel-dégel sur k_{sat} ont été minimisés par l'ajout d'amendement (sable et/ou silt). Les mélanges les plus performant en termes de k_{sat} (c'est-à-dire qui n'ont pas subi une augmentation importante) sont : Mél #1,7; Mél #1,8 et mél #1,9 pour lesquels les valeurs mesurées ont demeuré en dessous de E-9 m/s (entre 2 et 6 E-10 m/s après 10 cycles de gel-dégel).

Il est important de rappeler que pour qu'un recouvrement ou une barrière hydraulique soit efficace, les critères suivants doivent être satisfaits (Voir Maqsood et al. 2021) :

- La k_{sat} doit être égale ou inférieure à E-9 m/s;
- Le pourcentage des particules fines doit être supérieur à 30 %;
- Le pourcentage de fraction argileuse (<2 μ m) doit être supérieur à 15 %;
- L'indice de plasticité doit être supérieur à 7 % mais inférieur à 20 % si des cycles de gel-dégel et d'humide-sec sont prévus;
- La limite de liquidité doit être supérieure à 20 %;
- Teneur en gravier inférieure à 50 %.

Ainsi dans le tableau 8 on présente si les critères ont été satisfaits ou non pour tous les mélanges testés.

Tableau 8. Comparaison des mélanges par rapport aux critères de barrière hydraulique (x = critère satisfait)

Critères barrière hydraulique	Mél. #0	Mél. #1	Mél. #2	Mél. #3	Mél. #4	Mél. #5	Mél. #6	Mél. #7	Mél. #8
La conductivité hydraulique k_{sat} est égale ou inférieure à 10 ⁻⁹ m/s	-	-	-	-	-	-	X	X	X
Le pourcentage de particules fines doit être supérieur à 30 %	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Le pourcentage de fraction argileuse (<2 μ m) doit être supérieur à 15 %	X	X	X	X	X	X	X	X	X
L'indice de plasticité doit être supérieur à 7 % mais inférieur à 20 %	X	X	X	X	X	X	-	-	X
La limite de liquidité doit être supérieure à 20 %	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Teneur en gravier inférieure à 50 %	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Comme le montre le tableau on peut constater que :

- les Mél. #0 à 6 n'ont pas satisfaits le critère relatif à k_{sat} ;
- les Mél. #6 et 7 n'ont pas satisfait le critère relatif à IP
- seul le Mél. #8 qui est constitué d'argile, de sable et de silt qui répond à tous les critères. Par

conséquent, ce mélange peut être utilisé comme barrière hydraulique.

5 CONCLUSION ET TRAVAUX À VENIR

Les caractérisations physiques ont montré que :

- L'indice de plasticité des différents mélanges a subi une certaine réduction par rapport à celle de l'argile non amendée. Ainsi cet indice est passé de 18,11 à 4,97 % respectivement pour l'argile non amendée et celle qui a été amendée avec du sable (5%) et du silt (5%).
- L'ajout d'amendement a engendré une augmentation du C_u et une baisse de C_c .
- L'amendement a engendré une baisse de l'indice des vides et une augmentation de la teneur en eau à l'optimum Proctor.
- Pour tous les mélanges on constate une augmentation de la AEV par rapport à celle de l'argile;
- Pour les mélanges à base de silt, une réduction de la AEV est constaté lorsque le pourcentage de silt augmente;
- Les résultats des essais au laboratoire ont montré que les effets des cycles gel-dégel sur k_{sat} ont été minimisés par l'ajout d'amendement (sable et/ou silt).
- Le mélange le plus performant qui répond à tous les critères pour constituer une barrière hydraulique efficace est celui qui est constitué de 80% d'argile, 10% de silt et 10% de sable

Ces mélanges peuvent être utilisés et valorisés dans la restauration des sites minières ainsi que dans la construction d'ouvrages miniers.

Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour valider ces travaux de laboratoire avec des échantillons in situ exposés aux des conditions climatiques réelles. De même que des travaux doivent être réalisés afin de tester la performance de ces recouvrements à l'échelle de colonnes de cellules de terrain et simulant des recouvrements.

6 REFERENCES

- AUBERTIN, M., CHAPUIS, R. P., AACHIB, M., BUSSIÈRE, B., RICARD, J. F., TREMBLAY, L. 1995. Étude en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. (NEDEM 2.22a). Montréal: CANMET.
- AUBERTIN, M., PABST, T., BUSSIÈRE, B., JAMES, M., MBONIMPA, M., BENZAAZOUA, M. & MAQSOU, A. 2015. *Revue technique des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA*.
- BENSON, C. H., ÖREN, A. H. & GATES, W. P. 2010. Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 206-218.
- BENSON, C. H. & OTHMAN, M. A. 1993. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Frozen and Thawed In Situ. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 276-294.
- BENSON, C. H., ZHAI, H. & WANG, X. 1994. Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120, 366-387.
- CHAPUIS, R. P. 2002. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 417-439.
- CHAPUIS, R. P. 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 401-434.
- CLOUTIER, V., ROSA, E., ROY, M., NADEAU, S., BLANCHETTE, D., DALLAIRE, P.-L., DERRIEN, G. & VEILLETTE, J. 2016. *Atlas hydrogéologique de l'Abitibi-Témiscamingue*.
- FREDLUND, D. G. 2006. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 286-321.
- FREDLUND, D. G., XING, A. & HUANG, S. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533-546.
- HOLTZ, R. D. K. W. D. S. T. C. 2011. *An introduction to geotechnical engineering*, Upper Saddle River (NJ), Pearson.
- MAQSOU, A., BUSSIÈRE, B. & AUBERTIN, M. 2022. L'HYSTÉRÉSIS DE SOLS NON SATURÉS UTILISÉS DANS LES COUVERTURES AVEC EFFETS DE BARRIÈRE CAPILLAIRE.
- MAQSOU, A., BUSSIÈRE, B. & MBONIMPA, M. 2020. Low Saturated Hydraulic Conductivity Covers. *Hard Rock Mine Reclamation*.
- MCCARTHY, D. F. Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics. 1982.
- VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.