

Évaluation de la migration des résidus et du comportement hydrogéologique du remblayage par co-déposition dans la fosse de la mine Canadian Malartic

Florian Behlke¹⁻², Carlos Ovalle¹⁻², Serge Ouellet³, Li Li¹⁻²

¹ Département des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal

² Institut de recherche en mines et environnement (IRME) UQAT-Polytechnique

³ Mine Canadian Malartic, Agnico Eagle Mines, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Traditionnellement, la Mine Canadian Malartic (MCM) a déposé les roches stériles et les résidus miniers dans deux installations distinctes. Depuis 2023, la gestion des rejets a été complètement transformée en un processus de remblayage de fosse. Tout d'abord, une berme centrale de stériles est construite pour diviser la fosse en deux sections. Ensuite, les résidus sont versés dans leur section séparée, mais restent en contact avec la berme centrale de stériles. L'eau des résidus s'écoule à travers les stériles et est ensuite réutilisée. La captation de l'eau est protégée par un filtre granulaire pour éviter un colmatage aux puits de dénoyage des eaux. Suivant les premiers mois de déposition, la structure principale des stériles est soumise à une migration des résidus (plus spécifiquement les particules fines) prématurée lors de l'infiltration, ce qui affecte sa conductivité hydraulique. Les interactions entre les résidus et les stériles sont cruciales pour une opération de co-déposition efficace, mais elles sont mal comprises et insuffisamment documentées puisque peu de cas de fosse remblayée en co-déposition existent. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la migration des résidus lors des premiers mois de la déposition de ceux-ci dans la fosse Canadian Malartic (CM). Des modèles de consolidation à grandes déformations et d'écoulement sont utilisés pour calibrer les observations de terrain, permettant l'estimation de la migration des résidus par la diminution de la conductivité hydraulique des stériles remblayés. Sans ajustement au concept initial, les résultats indiquent une migration significative des résidus au fil du temps. Les résultats contribuent à améliorer la compréhension des installations de co-déposition et fournissent des informations à l'industrie sur les défis potentiels.

Mots-clés : Remblayage de fosse, co-déposition, résidus, roches stériles, écoulement, consolidation

INTRODUCTION

L'industrie minière génère d'importantes quantités de roches stériles et résidus miniers, qui sont typiquement entreposés dans des installations de stockage séparées. Ceci entraîne souvent d'importants défis géotechniques et environnementaux (Vick 1990, Aubertin et al. 2002, Blight 2010). De nos jours, la demande croissante de matières premières entraîne une augmentation des volumes et souligne l'urgence de trouver des solutions intégrales aux pratiques conventionnelles de gestion des rejets (Reichl et al. 2014, Bowker and Chambers 2015, Owen et al. 2024). Dans ce contexte, les méthodes de co-déposition se sont révélées prometteuses (Wilson et al., 2000). Notamment, le remblayage des fosses en fin de vie avec des résidus co-déposés est une avenue prometteuse pour réduire l'empreinte environnementale des projets miniers.

La Mine Canadian Malartic (MCM), l'une des plus grandes mines d'or du Canada, suivait historiquement les pratiques conventionnelles en déposant les résidus dans un parc et les roches stériles dans des haldes. En 2022, MCM a subi une transformation majeure en transférant la gestion des rejets vers une opération de remblayage en fosse (Ouellet et al. 2021). Grâce à l'avancement de la fosse Barnat, les résidus et les stériles nouvellement produits sont désormais co-déposés dans l'ancienne fosse CM. Cette pratique offre une alternative à la gestion traditionnelle en réduisant les surfaces impactées et en atténuant les impacts environnementaux. Dans le cadre de ce projet, la fosse Canadian Malartic (CM) est divisée en deux sections par une berme centrale construite avec des stériles, les résidus miniers étant déposés sur un côté désigné et confiné par cette berme. La berme sert aussi de voie de drainage, permettant aux eaux des résidus d'être collectées au point bas de la fosse, grâce à un système de pompage conçu pour maintenir une nappe phréatique suffisamment basse et permettre la réutilisation de l'eau. Cependant, le contraste important entre la distribution granulométrique et la teneur en eau des résidus miniers et des roches stériles, entraîne des interactions physiques complexes. Les particules fines contenues dans les résidus sont

susceptibles de migrer et de s'écouler dans la structure de stériles, ce qui peut altérer ses propriétés hydrauliques et obstruer le système de pompage des eaux de dénoyage. Des études antérieures ont porté sur les interactions entre les deux matériaux au sein des inclusions de stériles (James et al. 2017, Saleh-Mbemba and Aubertin 2021) et des essais de migration sur colonne ont été réalisés pour évaluer les variations de la conductivité hydraulique saturée des stériles à cause de la migration des résidus (Essayad 2021, García-Torres et al. 2023). Pourtant, l'interaction entre les résidus et les stériles en co-déposition reste mal comprise et insuffisamment documentée.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la migration des résidus à travers la structure de roches stériles dans le projet de remblayage de fosse à MCM. L'évaluation se fait indirectement en s'appuyant sur les données de monitoring et des modèles numériques. De multiples sources sont utilisées, telles que les nappes phréatiques, les débits de pompage d'eau, les observations photographiques et les relevés LiDAR. Aucune mesure directe de la migration des particules n'est incluse, car aucun échantillon physique à l'intérieur de la berme centrale ni ailleurs n'est possible ou réalisable dans le cadre de l'exploitation en cours. Un modèle unidimensionnel de consolidation à grandes déformations a été réalisé, afin de comparer la hauteur des résidus in situ à celle prédite par les simulations, et la différence est attribuée à la perte de résidus par migration vers la berme centrale. Une deuxième approche comprend la modélisation de l'écoulement des eaux à travers les stériles. L'hypothèse est que la migration des résidus est associée à une réduction de la conductivité hydraulique des stériles, qui est calibrée pour que le modèle d'écoulement corresponde aux nappes phréatiques surveillées. Cela fournit des informations supplémentaires pour mieux comprendre la migration des résidus dans la fosse. Les résultats des simulations sont comparés aux mesures in situ afin d'estimer l'ampleur de la migration et son impact dans le système de pompage.

DESCRIPTION DU PROJET DE REMBLAYAGE ET CO-DÉPOSITION

MCM est situé au sud de la ville de Malartic, Québec, Canada. La fosse Canadian Malartic a environ 2 km de longueur dans la direction ouest-est, 1 km de largeur (nord-sud) et une profondeur d'environ 340 m (élévation de -40 m à la base et de 330 m à la surface, voir Figure 1). L'extraction du minerai de la fosse CM s'est effectuée entre les années 2010 et 2023. Depuis, l'opération se fait à partir de la fosse Barnat, qui est adjacente à la fosse CM, tel qu'indiqué sur la Figure 1. Depuis mai 2023, les rejets des opérations de la fosse Barnat sont utilisés pour remblayer la fosse CM, suivant une séquence prédéfinie pour déposer les résidus et les stériles dans des zones spécifiques séparées, en évitant les mélanges lors des déversements. En 2024, les taux de production moyens de roches stériles et de résidus miniers sont d'environ 133 ktpd et 54 ktpd, respectivement.

La première étape du remblayage a consisté en la construction d'une berme centrale, achevée en septembre 2024. Cette berme est une grande halde à stériles qui divise la fosse CM en deux sections, atteignant une hauteur de 200 m. La berme centrale a été construite par déversement et poussée des stériles depuis l'élévation 160 m, en commençant par le côté sud de la fosse et en progressant vers le côté nord, tel que montré sur la Figure 2. Le déversement des stériles génère des pentes à l'angle de repos des stériles, d'environ 37°. Ainsi, la section ouest de la fosse est destinée au remblayage avec des résidus, et la section est avec des stériles. La Figure 1 présente l'emplacement de la berme centrale dans la fosse, et la Figure 2 est une photo prise par drone à la fin de sa construction.

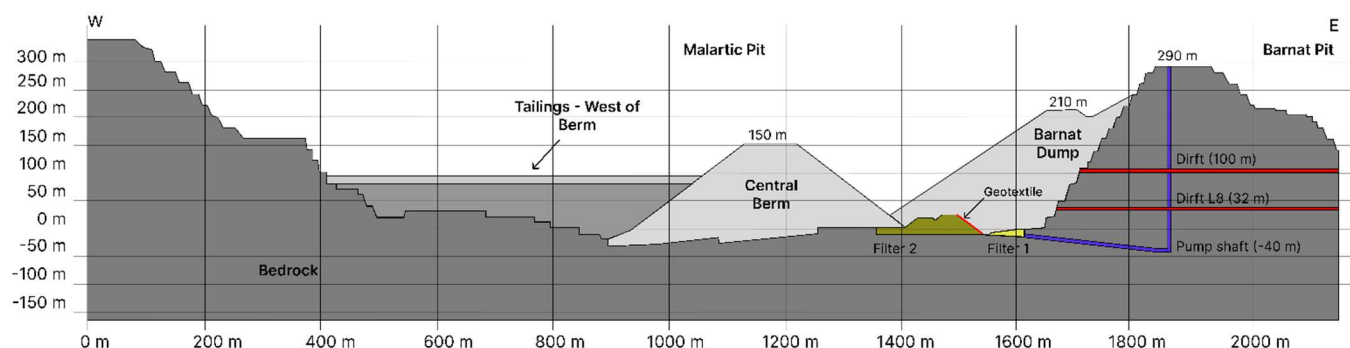


Figure 1: Coupe transversale ouest-est de la fosse CM

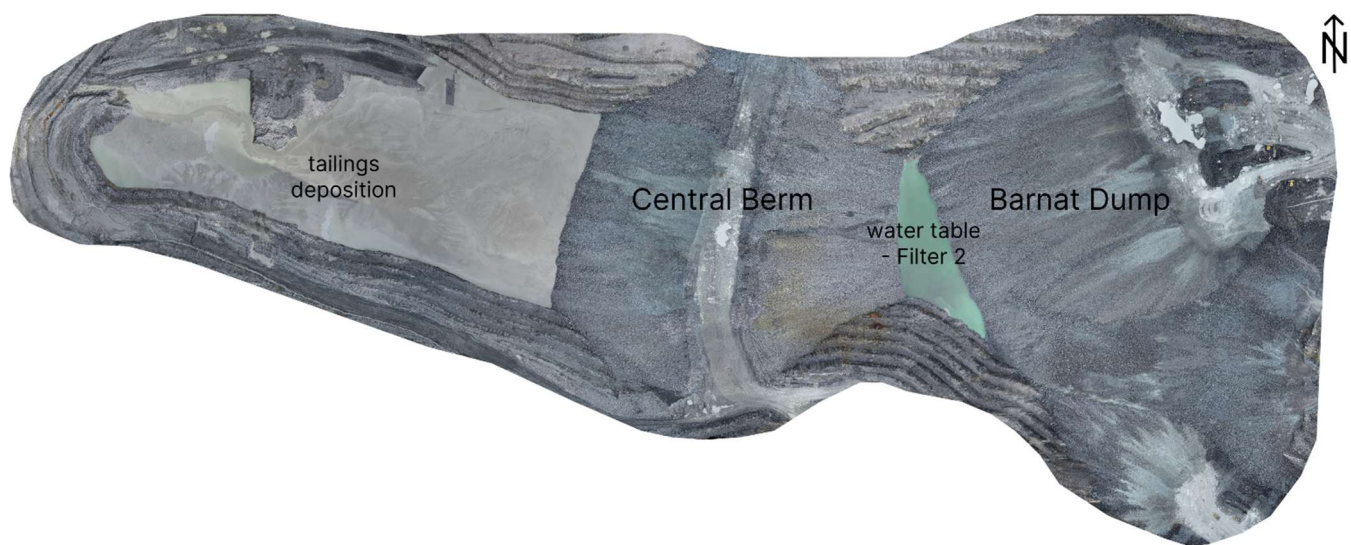


Figure 2: Fosse CM, photo prise par drone le 26 septembre 2024, après la fin de la construction de la berme centrale

La deuxième étape du remblayage, liée à la déposition des stériles, consiste en la construction d'une halde depuis le bord est de la fosse CM, adjacente à la fosse Barnat (*Barnat dump* sur les Figures 1 et 2). Ce remblai de stériles atteindra finalement la berme centrale pour compléter le remblayage avec des stériles dans le côté est de la fosse CM. Ensuite, la déposition de stériles sera avancée en hauteur jusqu'à la surface. Les deux phases de construction comprennent le monitoring des tassements afin de garantir la stabilité physique des pentes de roches stériles pendant les opérations. En utilisant une caractérisation mécanique des stériles in-situ (Girumugisha et al. 2024), des retro-analyses de stabilité sont périodiquement faits à l'aide de modélisations numériques (García-Torres et al. 2024).

La fosse CM constitue un piège hydraulique garantissant que les eaux provenant des résidus ne s'infiltreront pas dans les eaux souterraines. Un système de pompage est installé pour pomper l'eau contenue dans la fosse et maintenir le niveau d'eau à un niveau suffisamment bas. Tel que montré sur la Figure 1, le système de pompage comprend un puits situé à la base de la fosse CM, sur le bord est, avec une légère pente qui se termine à une altitude de -40 m dans un puits orthogonal. Le puits orthogonal mène à quatre puits de pompage verticaux jusqu'à la surface, à une élévation de 290 m. De là, l'eau est pompée hors de la fosse pour être réutilisée dans l'usine ou à d'autres fins. Le système comprend également deux filtres construits devant l'entrée du puits de drainage (filtre 1) et en amont (filtre 2), en direction de la berme centrale (voir Figure 1). Le filtre 1 est constitué de plusieurs matériaux granulaires, dont des stériles, du gravier et une couche de sable. Le filtre 2, beaucoup plus grand que le filtre 1, est constitué de stériles compactés, incluant un géotextile sur la face aval, et atteint une hauteur maximale à une élévation de 25 m.

MONITORING DE TERRAIN

Les données de monitoring de mai à novembre 2024 ont été analysées, notamment les niveaux de la nappe phréatique présentés dans la Figure 3a, les débits de pompage (Figure 3b) et la masse de résidus déversée au fil du temps (Figure 3c). Le monitoring comprend également des images LiDAR de l'ensemble de la fosse, enregistrées périodiquement par drone. Les scans LiDAR ont été utilisés aux endroits où la surface de l'eau était exposée, au-dessus du filtre 2 (voir Figure 2) et au point de déposition des résidus (i.e., à l'ouest de la berme centrale). La nappe phréatique au niveau du filtre 1 et dans le puits de la pompe a été mesurée par piézomètre.

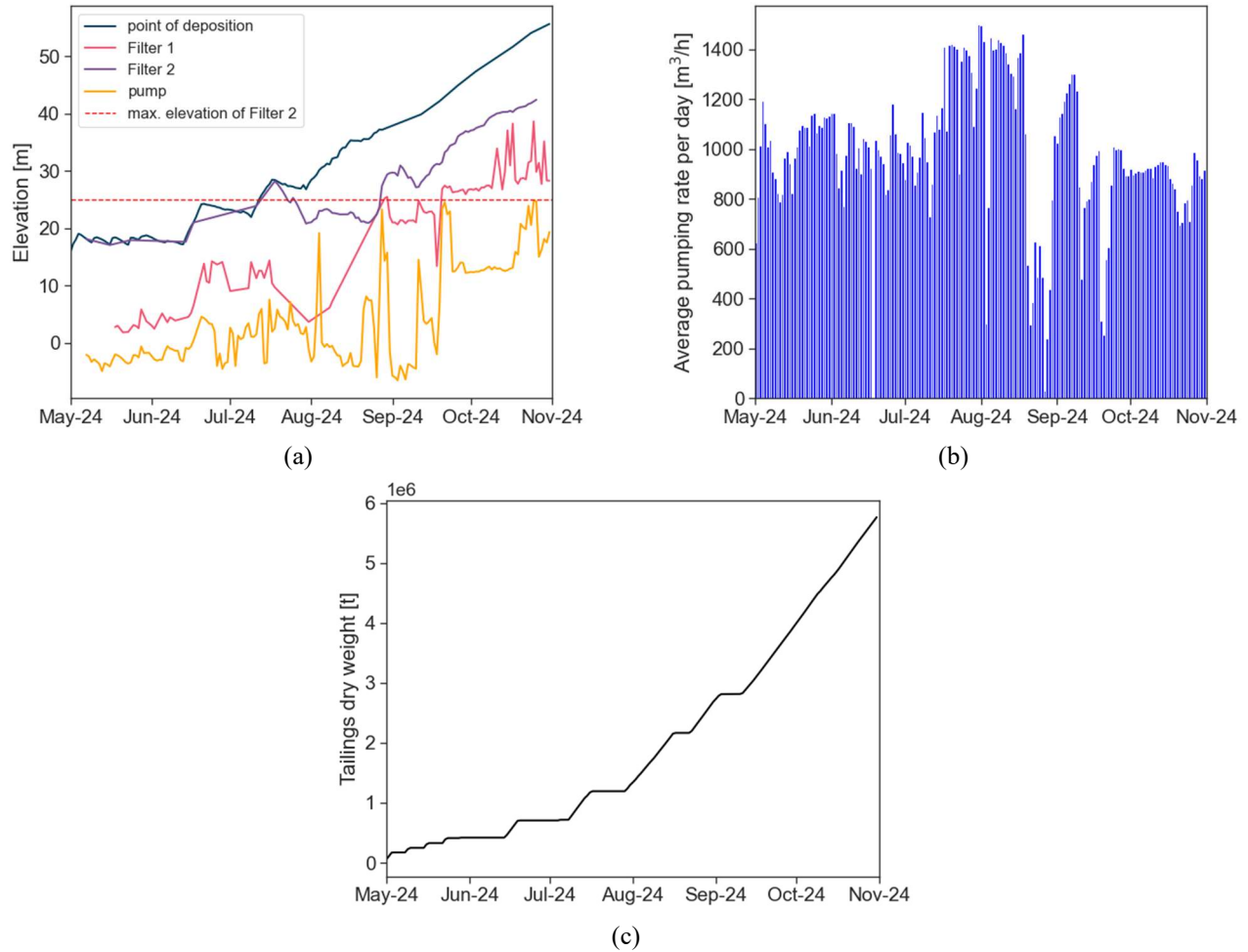


Figure 3: Résultats du monitoring de mai 2024 à novembre 2024 : (a) nappes phréatiques; (b) débit de pompage moyen par jour; (c) poids sec des résidus déversés dans la fosse CM

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

La Figure 4 présente les granulométries des résidus, principalement constitués de silt et de sable fin. Les résidus ont été déposés avec une teneur en solides comprise entre 57% et 61% en poids, ce qui est qualifié de résidus épaissis. La compressibilité des résidus, ainsi que la rigidité en fonction de la contrainte et l'évolution de la conductivité hydrauliques en fonction de l'indice de vides, sont montrées sur la Figure 5a-c. Ces paramètres sont issus de plusieurs résultats d'essais en laboratoire sur les résidus de CM et de Barnat obtenus par nombreuses études et recherches précédentes sur les rejets de MCM (Bolduc 2012, Bonin et al. 2014, Golder 2014, Doucet et al. 2015, Essayad 2015, Saleh-Mbemba 2016, Boudrias 2018, Nguyen and Pabst 2020, 2024, Qin et al. 2021, WSP 2022). Les résidus de Barnat et de CM provenant de la même configuration géologique, présentant peu de différences et produits dans la même usine, leur comportement à la consolidation est supposé très similaire.

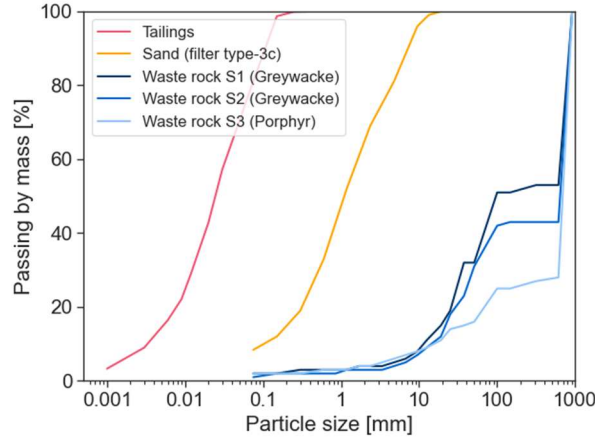


Figure 4: Granulométries des résidus, des roches stériles et des filtres

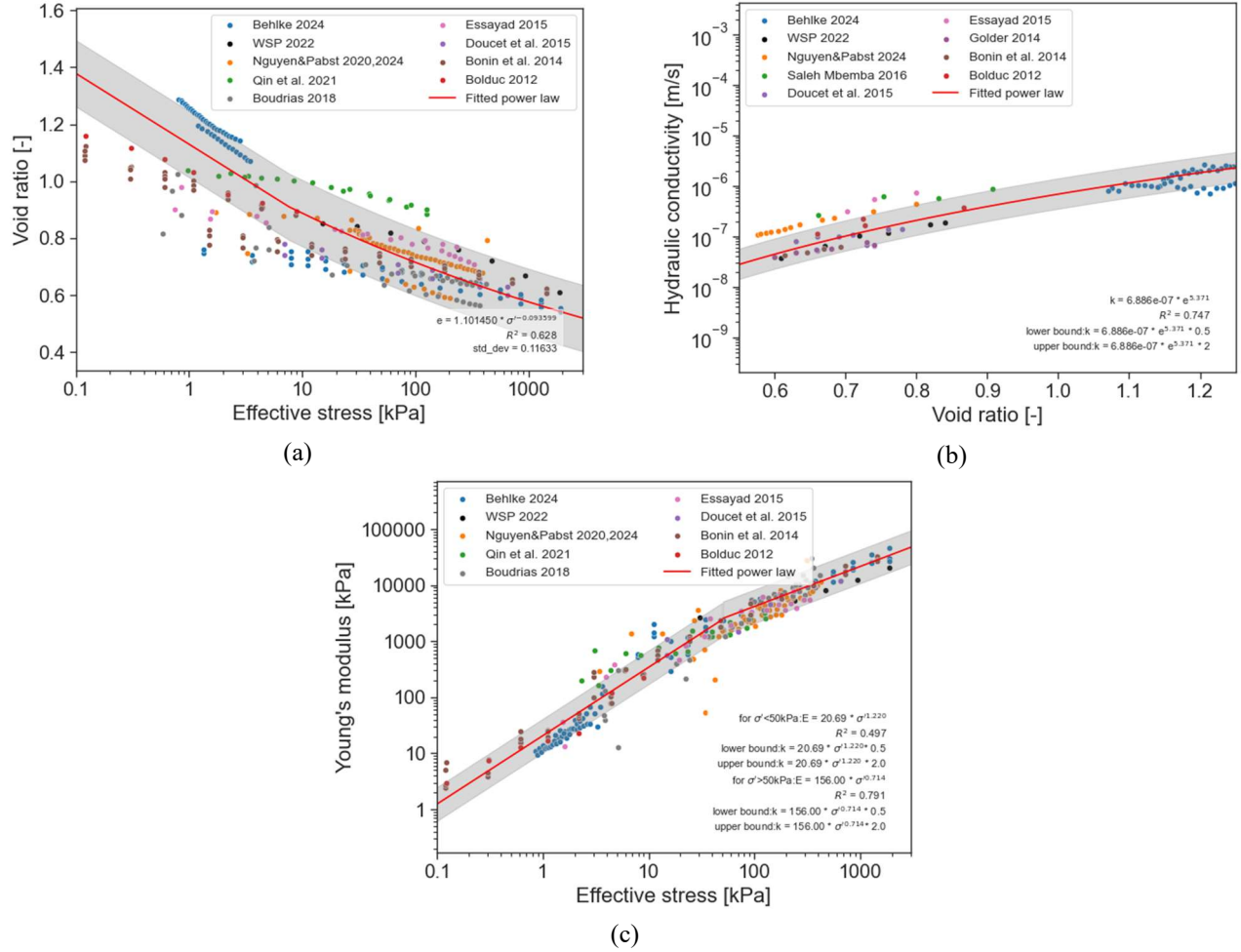


Figure 5: Résultats de laboratoire de (a) la compressibilité, (b) la conductivité hydraulique et (c) le module de déformation

La granulométrie des stériles présentée dans la Figure 4 montre que les particules varient de quelques micromètres à plusieurs dizaines de centimètres, avec un d_{10} de 14 mm et un d_{60} de 700 mm, ainsi qu'un coefficient d'uniformité $C_u = d_{60}/d_{10} = 50$. Sur le terrain, les stériles sont significativement affectés par la ségrégation et la rupture des grains, ce qui les rend très hétérogènes (WSP 2022).

Le filtre 2 est constitué de stériles compactés avec ajout d'un géotextile. Le filtre 1 est composé de plusieurs matériaux granulaires, allant des stériles granulaires en termes de granulométrie au sable grossier, avec une faible fraction de sable (voir Figure 4). Le géotextile (TEXEL 934) utilisé dans le filtre 2 est en polypropylène et présente une permittivité hydraulique de 0,27 selon la norme ASTM D4491 (ASTM D4491 2020), ce qui équivaut à une conductivité hydraulique de $1,35E-02$ m/s.

MODÈLE DE CONSOLIDATION

La consolidation des résidus sous grandes déformations a été simulée à l'aide de FLAC3D (Itasca Consulting Group 2024), un logiciel lagrangien explicite à différences finies capable de résoudre des analyses couplées fluide-mécanique. La théorie de consolidation à grandes déformations s'appuie sur des relations fortement non linéaires régissant la compressibilité et la conductivité hydraulique (Ahmed et Siddiqua, 2014). Contrairement à la théorie classique des petites déformations de Terzaghi, qui suppose un sol incompressible, une conductivité hydraulique constante et un poids propre négligeable (Terzaghi 1943), la consolidation à grandes déformations prend en compte l'évolution de l'indice des vides et son impact sur la perméabilité. Elle est régie par deux relations constitutives non linéaires: la relation contrainte effective vs indice des vides (compressibilité) et la relation indice des vides vs conductivité hydraulique. Ces fonctions sont dérivées de données expérimentales et sont généralement exprimées sous forme de fonction en puissance (Somogyi 1980, Carrier III et al. 1983, Townsend et McVay 1990, Ahmed et Siddiqua 2014). Une analyse de consolidation entièrement couplée dans FLAC3D résout simultanément les équations de déformation du sol (équilibre mécanique) et d'écoulement de l'eau interstitielle (bilan de masse du fluide) de manière couplée basée sur la théorie de Biot. Le logiciel utilise des coordonnées lagrangiennes, où le maillage se déplace avec la géométrie du système, ce qui est essentiel pour suivre les grandes déformations afin de garantir un couplage précis entre la déformation et l'écoulement (Itasca Consulting Group 2024).

Le modèle de consolidation utilisé est uni-dimensionnel et simule une colonne de résidus qui est rehaussée selon les données des quantités déversées et la géométrie de la fosse. Le modèle comprend 21 étapes et simule la consolidation depuis le début de la déposition (mai 2024) jusqu'à novembre 2024. Le fond de la fosse est représenté comme une limite imperméable. La pression interstitielle est nulle à la surface des résidus, créant ainsi un drainage ascendant libre avec une base imperméable. D'après l'analyse en laboratoire des résidus déposés, leur indice de vide après sédimentation est de $e = 1.228$ (WSP 2022). Sur la base de cette valeur initiale, la hauteur des résidus au fil du temps a été estimée. La Figure 6 montre la hauteur des résidus dans la fosse au fil du temps. Dans le modèle, un niveau est créé après le calcul du niveau précédent et est généré en fonction du tassement de ce dernier. À chaque nouvelle étape, les conditions initiales et aux limites sont définies avec les paramètres d'entrée mécaniques (module de cisaillement/volume, masse volumique, angle de frottement, module de Poisson) et de phase fluide (perméabilité, porosité) de la nouvelle étape.

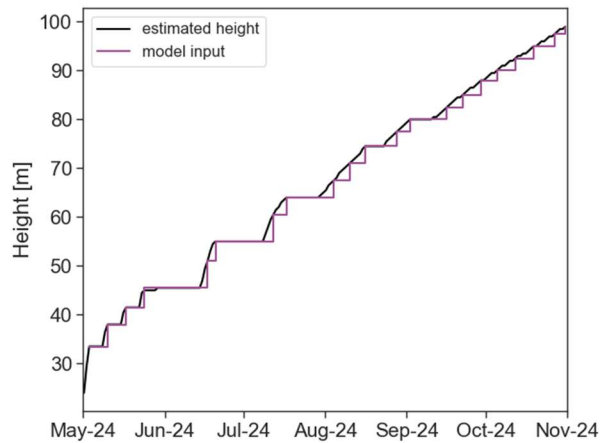


Figure 6 : Augmentation de la hauteur de la couche de résidus au fil du temps

L'analyse de chaque étape commence par le calcul des conditions initiales en coupant l'écoulement du fluide et en calculant uniquement les boucles mécaniques pour atteindre l'équilibre et vérifier la convergence du modèle. La deuxième étape est le calcul couplé, au cours de laquelle les fonctions sont introduites pour mettre à jour tous les paramètres requis. Par conséquent, l'indice des vides, la masse volumique sèche, la conductivité hydraulique et le module d'élasticité sont mis à jour après chaque cycle de calcul. Les paramètres d'entrée initiaux sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1: paramètre du modèle de consolidation à grandes déformations

Initial input paramters		Value	Unit	References
Mechanical-phase				
Dry density	ρ_{dry}	1239	[kg/m3]	(WSP 2022)
Specific gravity	G_s	2.76	[-]	
E-modulus	E	5	[kPa]	
Effective friction angle	ϕ'	38	[°]	(Boudrias 2018)
Cohesion	c	0	[kPa]	(Nguyen&Pabst 2024)
Poisson ratio	ν	0.28	[-]	
Fluid-phase				
Water density	ρ_{water}	1000	[kg/m3]	(WSP 2022)
Hydraulic conductivity	k_{sat}	2.08E-06	[m/s]	
Void ratio	e	1.228	[-]	
Updated paramters		Function	Unit	
Mechanical-phase				
Dry density	ρ_{dry}	$= G_s / (1 + e)$	[kg/m3]	
Young's modulus	E	$= 20.7 \sigma'^{1.220}$ (for $\sigma' < 50\text{kPa}$) $= 156 \sigma'^{0.714}$ (for $\sigma' > 50\text{kPa}$)	[kPa]	
Fluid-phase				
Void ratio	e	$= 1.1 \sigma'^{-0.0926}$	[-]	
Hydraulic conductivity	k_{sat}	$= 6.89 e^{-7} e^{5.27}$	[m/s]	

MODÈLE D'ÉCOULEMENT STATIONNAIRE

Plusieurs modèles d'écoulement stationnaire 2D utilisant SEEP/W (GeoStudio 2024) ont été construits pour simuler les conditions hydrogéologiques dans la fosse CM, afin d'étudier l'impact de la migration des résidus. L'analyse de l'écoulement dans SEEP/W est basée sur la loi de Darcy, et l'équation régissant est l'équation de Laplace qui est résolue à l'état stationnaire (GeoStudio 2024). L'hypothèse est qu'une migration importante des particules fines dans les résidus dans les pores des stériles modifie les conditions hydrogéologiques des stériles. Les modèles stationnaires simulent le régime d'écoulement dans la fosse sur une courte période. L'analyse du régime d'écoulement à plusieurs moments de la période d'étude permet d'observer les changements hydrogéologiques dans la fosse. La géométrie des modèles est basée sur des relevés LiDAR hebdomadaires. La section transversale représentative de la Figure 7 a été implémentée dans SEEP/W. Les conditions aux limites sont la charge hydraulique au point de déposition des résidus (à l'ouest de la berme centrale) et le débit de pompage obtenu à partir des données de monitoring. Le débit de pompage a été mis à l'échelle pour considérer la taille du modèle 2D, dont la profondeur est de 1 m.

L'ensemble du matériau de la fosse a été supposé comme des stériles homogènes. Sur la base de la distribution granulométrique, un modèle prédictif a été utilisé pour établir une courbe de rétention d'eau des stériles, avec un très faible potentiel de rétention. La conductivité hydraulique saturée du matériau a ensuite été calibrée sur les niveaux des nappes phréatiques mesurées dans les filtres 1 et 2, montrées dans la Figure 8a. Dans un premier temps, le matériau de l'ensemble du système a été calibré sur la nappe phréatique du filtre 2, située à l'est de la berme

centrale. Ensuite, la conductivité hydraulique de la berme centrale a été conservée, et le matériau à l'est de cette dernière a été calibré pour correspondre à la nappe phréatique du filtre 1.

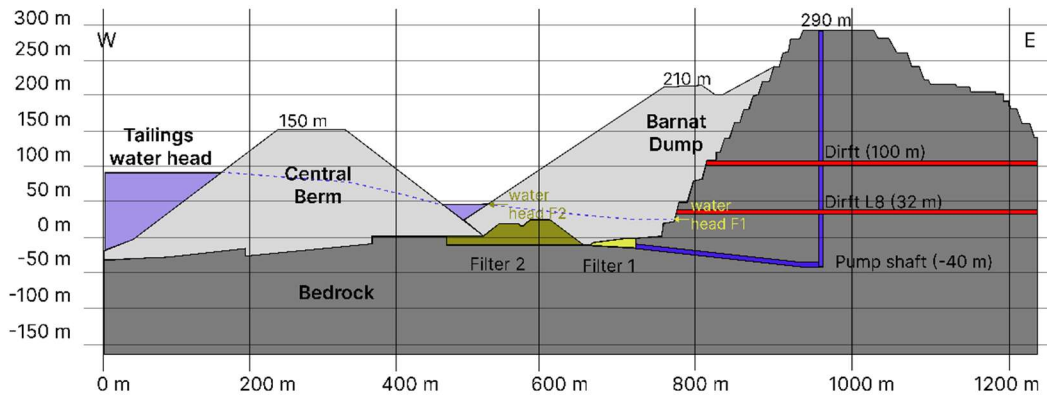


Figure 7 : Section du modèle d'écoulement stationnaire

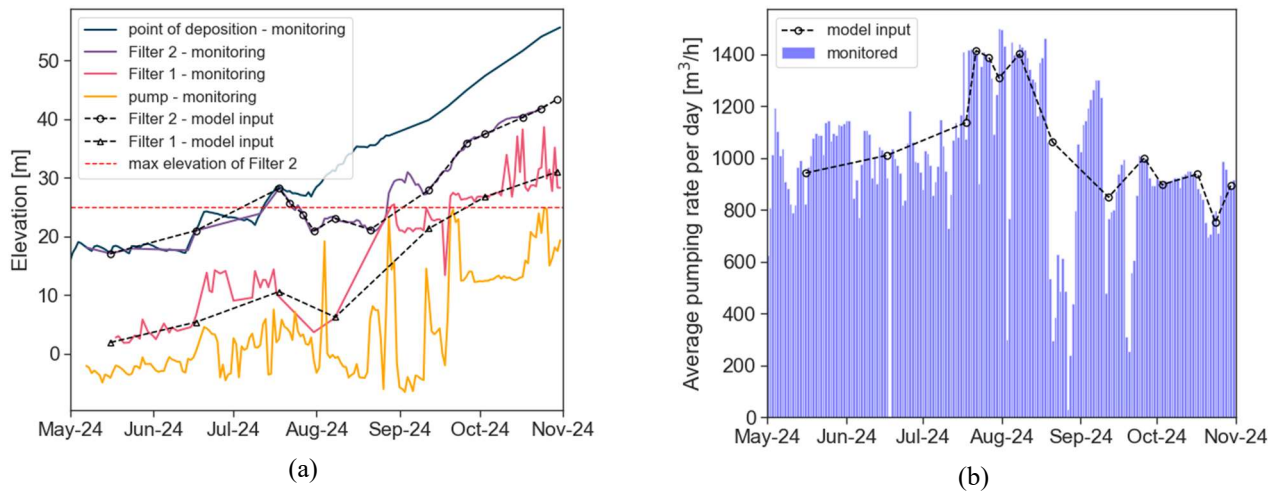


Figure 8 : Données d'entrée du modèle provenant du monitoring : (a) nappes phréatiques ; (b) débit de pompage moyen par jour

RÉSULTATS

Modèle de consolidation

La Figure 9a montre l'élévation de la surface des résidus surveillée et celle obtenue par le modèle numérique dans la fosse CM. L'élévation des résidus sur le premier mois et demi est inférieure à l'altitude mesurée par LiDAR sur le terrain, mais les valeurs se rejoignent à la mi-juin 2024. L'écart entre les deux graphiques commence à se situer autour de 2 à 3 m et augmente en juillet et août pour atteindre environ 11 m. Cette différence d'élévation reste quasiment constante jusqu'à fin novembre.

La densité de poids sèche moyenne des résidus déposés, obtenue à partir de la masse effectivement déversée et le volume de la fosse, et celle estimée par le modèle numérique sont présentées dans la Figure 9b. Les résultats montrent que la densité moyenne donnée par le modèle est presque égale à celle des résidus totaux déposés jusqu'au 8 juillet 2024. Peu après le 8 juillet, les graphiques commencent à dévier, la densité estimée des simulations étant inférieure à la densité sèche totale déposée. Ensuite, les courbes sont restées quasiment parallèles. Sur la base des estimations antérieures, la quantité de résidus en poids sec migrée a été calculée et se trouve dans la Figure 11. Les

résultats suggèrent que la migration des résidus a débuté à la mi-juillet 2024, avec une légère augmentation jusqu'à la fin juillet. À partir d'août 2024, l'estimation de la quantité de résidus migrés augmente constamment, passant de 221 339 t le 29 juillet à 1 393 003 t le 30 octobre. La moyenne des résidus migrés sur la période étudiée par rapport au total des résidus déposés est de 26%. Cette migration a comme effet une diminution significative de la conductivité hydraulique des stériles, tel qu'estimé dans la suite de cet article.

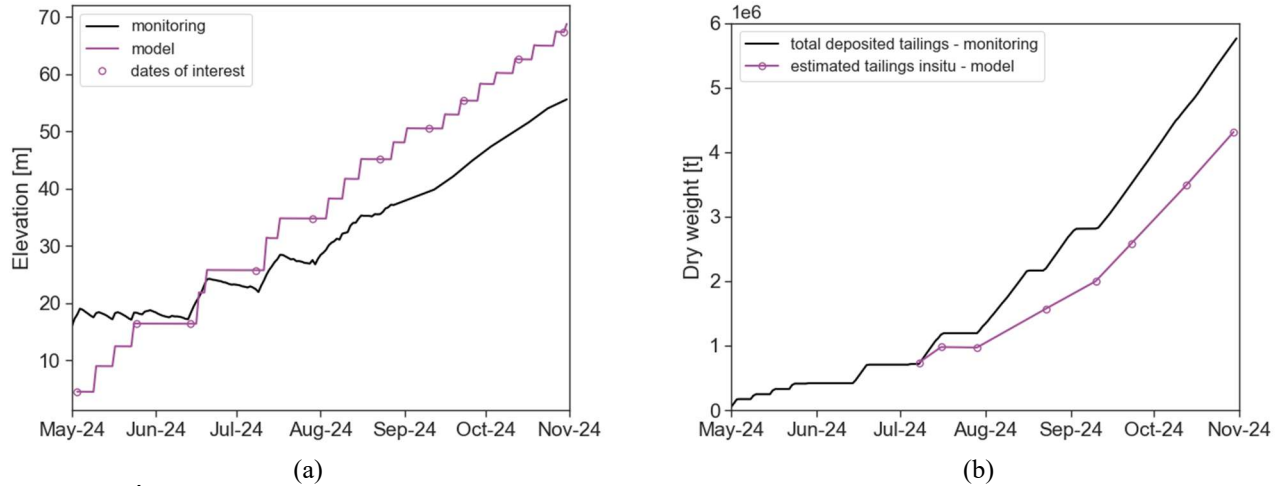


Figure 9 : (a) Élévation calculée à partir du modèle numérique par rapport à l'élévation mesurée dans la fosse; (b) densité de poids sèche moyenne estimée des résidus dans la fosse par rapport à la densité donnée par la masse sèche totale déposée.

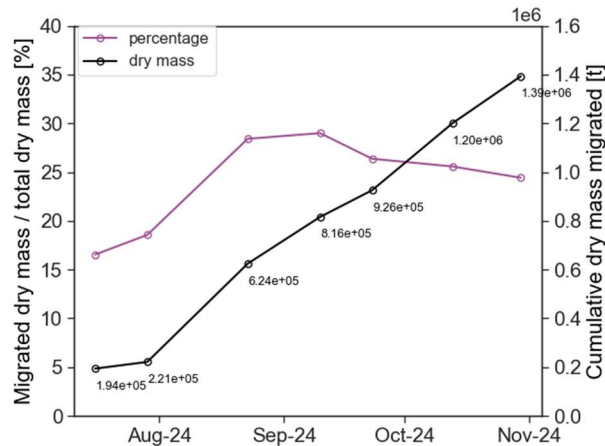


Figure 10 : Estimation des résidus migrés par masse sèche cumulée et pourcentage de la masse migrée

Modèle d'écoulement en régime permanent

Les résultats des retro-analyses avec le modèle d'écoulement en régime permanent présentés dans la Figure 11 montrent que, pour que le modèle puisse représenter les niveaux phréatiques mesurés sur le terrain aux filtres 1 et 2, et au point de pompage, la conductivité hydraulique de la berme centrale doit être relativement élevée au cours des trois premiers mois, comprise entre $1\text{E-}01$ et $1\text{E-}02$ m/s; ces valeurs sont typiques pour des sols grossiers, des enrochements et des roches stériles grossières (Aubertin et al. 2002, Gamache-Rochette 2004, Ghabchi et al. 2015). En juillet 2024, la conductivité hydraulique commence à diminuer significativement, atteignant une valeur de $1\text{E-}03$ m/s à la mi-août. Au cours des trois derniers mois de l'étude, la conductivité hydraulique s'est stabilisée, avec une légère baisse, atteignant une valeur minimale de $6,3\text{E-}04$ m/s. En ce qui concerne les stériles à l'est de la berme centrale, leur conductivité hydraulique est plus faible au début de la période d'étude, ce qui est probablement dû au géotextile du filtre 2 et à la couche de sable du filtre 1. Ensuite, les valeurs sont relativement stables du début à la fin de la période étudiée, comprises entre $1,5\text{E-}03$ m/s et $5,6\text{E-}04$ m/s, avec seulement une légère baisse au fil du temps.

On suppose que la diminution de la conductivité hydraulique est due à la migration des résidus dans les vides de stériles. Par conséquent, compte tenu de cette corrélation, les résultats suggèrent qu'une migration significative des résidus s'est produite vers la mi-juillet 2024, ce qui est cohérent avec les résultats du modèle de consolidation présentés précédemment. Par la suite, la conductivité hydraulique a rapidement diminué, puis s'est stabilisée, ce qui pourrait indiquer une diminution de la migration due au colmatage des pores dans les stériles.

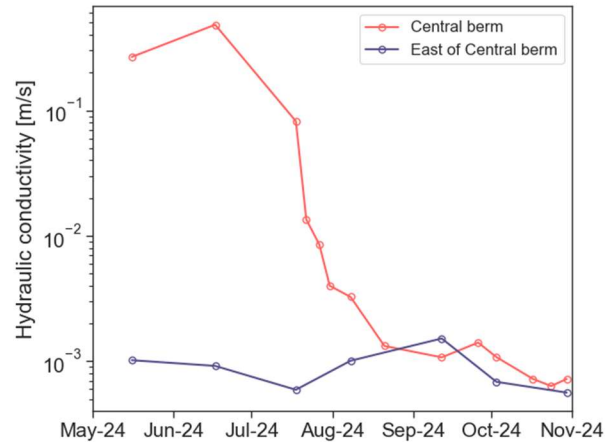


Figure 11 : Conductivité hydraulique saturée de la berme centrale et des stériles à l'est de la berme centrale

CONCLUSIONS

MCM a fait évoluer sa stratégie de gestion des rejets miniers, passant des méthodes conventionnelles à une approche novatrice, en déposant conjointement les résidus et les stériles dans la fosse CM. Cette méthode implique une interaction des rejets en co-déposition. Les résidus ont tendance à s'écouler et à migrer dans les stériles, ce qui pourrait altérer les propriétés hydrauliques et compromettre l'efficacité de l'installation en obstruant le système de pompage si aucune mesure de rétention des particules fines est mise en place. Cette étude visait à évaluer la migration des résidus dans la fosse CM, afin de mieux comprendre les interactions des matériaux et de promouvoir une gestion plus durable des rejets par le biais de la co-déposition.

L'étude s'est appuyée sur des données de monitoring recueillies de mai 2024, date du début du déversement des résidus, à novembre 2024. Ces données ont servi à supporter une série d'analyses numériques, notamment des modèles de consolidation à grandes déformations et d'écoulement stationnaire. Les résultats ont ensuite permis de corréler les paramètres obtenus à partir des données de monitoring avec la migration des résidus. Les résultats des simulations de consolidation indiquent qu'une quantité importante de résidus a migré vers la berme centrale, environ 25% en poids. Ils suggèrent également qu'une migration significative des résidus a débuté dans la première quinzaine de juillet 2024. Les modèles d'écoulement sont cohérents avec ces résultats, et montrent une nette diminution de la conductivité hydraulique dans la berme centrale aux mêmes dates. La conductivité hydraulique des stériles passe d'environ 5×10^{-1} m/s, initialement, à 1×10^{-3} m/s après 3 mois, pour se stabiliser finalement à environ $6,3 \times 10^{-4}$ m/s, 6 mois après le début de l'opération.

Dans d'autres domaines géotechniques où la migration des particules est préoccupante, des lignes directrices et des normes sont formulées pour la prévenir. Ces critères de filtrage reposent sur des travaux de laboratoire, où la migration des particules a pu être étudiée à petite échelle et où l'échantillonnage physique du matériau filtrant et de l'écoulement est possible. En revanche, l'échantillonnage dans un projet de co-déposition et remblayage de fosse à grande échelle est quasiment impossible. Ainsi, étudier la migration des résidus miniers en contact avec des roches stériles ayant des granulométries grossières pose des défis significatifs. La difficulté d'avoir des mesures directes oblige à faire des estimations à l'aide de modélisations numériques capables de représenter adéquatement les observations de terrain.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a bénéficié du soutien financier de Mines Agnico Eagle, du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Consortium de recherche et d'innovation en transformation métallique (CRITM) [projet 2021 – 068] et des partenaires industriels de l'Institut de Recherche en Mines et Environnement (IRME) UQAT-Polytechnique (www.irme.ca).

RÉFÉRENCES

- Ahmed, S.I., and Siddiqua, S. 2014. A review on consolidation behavior of tailings. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **8**(1): 102–111.
- ASTM D4491/D4491M-20e1. 2020. Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA,.
- Aubertin, M., Bussière, B., and Bernier, L. 2002. Environnement et gestion des rejets miniers. Les Presses Internationales de Polytechnique, Montréal, Quebec.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jollette, D., Bussière, B., Chapuis, R.P., James, M., and Riffon, O. 2002. Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle. *In* Défis and Perspectives : Symposium 2002 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Développement Économique Canada/Ministère des Ressources Naturelles du Québec/CIM.
- Blight, G.E. 2010. Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Bolduc, F. 2012. Une étude sur l'utilisation des roches stériles comme inclusions drainantes dans les résidus miniers. PhD Thesis, École Polytechnique de Montréal.
- Bonin, M.D., Nuth, M., Dagenais, A.-M., and Cabral, A.R. 2014. Experimental study and numerical reproduction of self-weight consolidation behavior of thickened tailings. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **140**(12): 04014068.
- Boudrias, G. 2018. Évaluation numérique et expérimentale du drainage et de la consolidation de résidus miniers à proximité d'une inclusion de roches stériles. Ecole Polytechnique de Montreal (Canada).
- Bowker, L.N., and Chambers, D.M. 2015. The risk, public liability, & economics of tailings storage facility failures. *Earthwork Act*, **24**: 1–56.
- Carrier III, W.D., Bromwell, L.G., and Somogyi, F. 1983. Design capacity of slurried mineral waste ponds. *Journal of Geotechnical Engineering*, **109**(5): 699–716.
- Doucet, K., Pepin, N., Kissiova, M., and Pednault, C. 2015. Thickened tailings characterization program for a tailings storage facility design update-case study. Communication présentée à Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC.
- Essayad, K. 2015. Développement de protocoles expérimentaux pour caractériser la consolidation de résidus miniers saturés et non saturés à partir d'essais de compression en colonne. PhD Thesis, École Polytechnique de Montréal.
- Essayad, K. 2021. Évaluation multi-échelle de l'instabilité interne et de la migration des résidus à travers les inclusions de roches stériles. PhD Thesis, Polytechnique Montréal.
- Gamache-Rochette, A. 2004. Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles. Master's Thesis, École Polytechnique de Montréal.
- García-Torres, S., Behlke, F., Ovalle, C., Ouellet, S. (2023): Effect of tailings migration on hydraulic conductivity of mine waste rock. Annual conference of the Canadian Geotechnical Society, Geosaskatoon 2023, October 1-4.
- García-Torres, S., Ovalle, C., Ouellet, S. (2024): Stability assessment of an open-pit waste rock backfilling: field monitoring and numerical back analysis. Annual conference of the Canadian Geotechnical Society, GeoMontréal 2024, September 15-18, Montreal, Canada.
- GeoStudio. 2024. SEEP/W User Manual.
- Ghabchi, R., Zaman, M., Kazmee, H., and Singh, D. 2015. Effect of Shape Parameters and Gradation on Laboratory-Measured Permeability of Aggregate Bases. *International Journal of Geomechanics*, **15**(4): 04014070.

- Girumugisha, G., Ovalle, C., and Ouellet, S. 2024. Grading scalping and sample size effects on critical shear strength of mine waste rock through laboratory and in-situ testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **183**: 105915.
- Golder. 2014. Rapport de caractérisation des résidus miniers. Mine Canadian Malartic, Malartic, Québec - Projet d'extension Canadian Malartic. Golder Associés.
- Itasca Consulting Group, Inc. 2024. FLAC3D User Manual.
- James, M., Aubertin, M., Bussière, B., Pednault, C., Pépin, N., and Limoges, M. 2017. A research project on the use of waste rock inclusions to improve the performance of tailings impoundments. *Proceedings of GeoOttawa2017*.
- Nguyen, D., and Pabst, T. 2020. Comparative experimental study of consolidation properties of hard rock mine tailings. *In 73rd Canadian Geotechnical Conference (GeoVirtual 2020)*.
- Nguyen, N.D., and Pabst, T. 2024. Numerical Study of consolidation of Slurry tailings considering continuous update of Material Properties. *Geotechnical and Geological Engineering*, **42**(5): 3251–3267.
- Ouellet, S., Chapuis, S., and Ovalle, C. 2021. Le projet de co-déposition dans la fosse Canadian Malartic. *In Symposium Rouyn-Noranda 2021 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, QC.
- Owen, J.R., Kemp, D., Lechner, A.M., Ern, M.A.L., Lèbre, É., Mudd, G.M., Macklin, M.G., Saputra, M.R.U., Witra, T., and Bebbington, A. 2024. Increasing mine waste will induce land cover change that results in ecological degradation and human displacement. *Journal of Environmental Management*, **351**: 119691.
- Qin, J., Zheng, J., and Li, L. 2021. An analytical solution to estimate the settlement of tailings or backfill slurry by considering the sedimentation and consolidation. *International Journal of Mining Science and Technology*, **31**(3): 463–471.
- Reichl, C., Schatz, M., and Zsak, G. 2014. World mining data. Minerals Production International Organizing Committee for the World Mining Congresses, **32**(1): 1–261.
- Saleh-Mbemba, F. 2016. Analyse et optimisation de la performance des inclusions rigides durant la consolidation, le drainage et la dessiccation des résidus miniers. Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Saleh-Mbemba, F., and Aubertin, M. 2021. Physical and numerical modelling of drainage and consolidation of tailings near a vertical waste rock inclusion. *Canadian Geotechnical Journal*, **58**(9): 1263–1276.
- Somogyi, F. 1980. Large strain consolidation of fine grained slurries. *In Canadian Society for Civil Engineering 1980 Annual Conference*, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Terzaghi, K. 1943. *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.
- Townsend, F., and McVay, M. 1990. SOA: Large strain consolidation predictions. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**(2): 222–243.
- Vick, S.G. 1990. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.
- Wilson, G.W., Ferguson, and Newman., L.L. 2000. The co-disposal of waste rock and tailings. *In Proceedings of the 5th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD 2000)* Denver. Colo. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., Littleton. Colo. pp. 789–796
- WSP. 2022. Base de conception - Ingénierie détaillée Projet de remblayage de la fosse Canadian Malartic. Golder Associés Ltée, WSP, Mine Canadian Malartic, Malartic, Québec.