ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS DE RÉTENTION D'EAU DES REMBLAIS MINIERS CIMENTÉS EN PÂTE DURANT LE CURAGE

Jovette Godbout, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue Rouyn-Noranda, Québec
Bruno Bussière, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue Rouyn-Noranda, Québec
Michel Aubertin, École Polytechnique, Montréal, Québec
Tikou Belem, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec
Mostafa Benzaazoua, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda

ABSTRACT
Hydraulic binders in cemented paste backfill (CPB) modify the microstructure of the paste which in turn will affect its hydraulic properties. Modified suction tests were performed on cemented paste backfill samples, at different curing times, to investigate their water retention curve (WRC). Because the material evolves with time, the procedure for suction tests conducted in Tempe cell was modified to carry out the test in a period of 24 hours. The time to reach the equilibrium volumetric water content (θ) for a given suction (ψ) is also discussed in this article. Test results obtained with the modified approach show that the WRC evolves with curing time. The short-term air entry value increases while the slope of the WRC softens with time. Numerical modeling was also done to illustrate the importance of accounting for the evolution of the WRC to simulate hydraulic behaviour of an underground stope backfilled with CPB.

RÉSUMÉ
L'agent liant dans les remblais miniers cimentés en pâte (RMCP) modifie la microstructure du matériau et, par le fait même, ses propriétés hydriques. Des essais de succion modifiés ont été réalisés sur un mélange de RMCP, à différents temps de curage, pour évaluer les courbes de rétention d'eau (CRE). Comme le matériel évolue dans le temps, l'essai de succion a été modifié afin de réaliser l'essai de succion dans une période de 24 heures. L'importance du temps sur l'atteinte de l'équilibre (teneur en eau à une pression donnée) est également discutée dans cet article. Les résultats des essais montrent que les CRE des RMCP évoluent avec le temps de curage. La pression d'entrée de l'air à court terme augmente tandis que la pente de la CRE s'adoucit. Des modélisations numériques ont été réalisées pour illustrer l'importance de prendre en compte l'évolution des CRE pour simuler le comportement hydrique d'un chantier remblayé avec du RMCP.

1. INTRODUCTION

Le remblayage en pâte est une technologie relativement récente et maintenant largement employée par les mines à travers le monde. Le remblai minier cimenté en pâte (RMCP) est un matériau fait d'un mélange de rejets de concentrateur, d'eau et d'agent liant (mélange de ciments et d'ajouts minéraux). Le rôle primaire de l'agent liant est d'aider à développer la résistance mécanique du remblai en pâte. Sur le plan technique, le remblai en pâte agit comme support de terrain pendant l'exploitation souterraine (e.g. Levens *et al*. 1996, Landriault et Tenbergen, 1995, Hassani et Archibald, 1998). Le remblayage en pâte représente également une méthode efficace de gestion des résidus sulfureux, à fort potentiel de génération d'acide. Il permet d'enfouir d'importants tonnages de rejets de concentrateur et ainsi de réduire le volume de rejets problématiques stockés en surface (e.g. Mitchell, 1989, Hassani et Archibald, 1998).

Une autre alternative utilisant le remblai en pâte (cimenté ou non) a également été proposée au cours des dernières années, soit le concept de stockage en surface. L'ajout de l'agent liant a l'avantage d'augmenter le potentiel de neutralisation existant, ce qui réduit le potentiel de génération d'acidité du remblai qui contient des minéraux sulfureux. Le remblai en pâte déposé en surface pourrait aussi aider à réduire la mobilité des métaux, à améliorer les propriétés hydriques (rétention d'eau et conductivité hydraulique saturée), à produire un matériau plus homogène et à diminuer la dimension des digues de retenues. Plus de détails sur les avantages et inconvénients du remblai en pâte en surface peuvent être trouvés dans la littérature (e.g. Cincilla *et al*., 1997, Aubertin *et al*., 2002, Grabinski *et al*., 2002; Benzaazoua *et al.,* 2004a,b).

Les réactions d'hydratation du liant hydraulique dans le remblai en pâte entraînent la formation de minéraux primaires et secondaires (selon la chimie des intrants de base) qui modifient la structure interne de la matrice du remblai (e.g. Benzaazoua *et al*., 2000, Belem *et al*., 2001, Ouellet *et al.,* 2004). L'évolution de la microstructure dans le temps implique, par le fait même, un changement des propriétés hydrogéotechniques du remblai. Si l'on veut utiliser de façon efficace le RMCP, un aspect essentiel à considérer est l'évolution des propriétés hydriques, incluant les courbes de rétention d'eau (CRE). Des CRE représentatives vont permettre d'améliorer la prédiction de la migration de l'eau et des contaminants dans le RMCP.

Dans cette étude, on s'intéresse à l'évolution des propriétés de rétention d'eau, en fonction du temps de

cure des RMCP. On présente d'abord une description des matériaux étudiés et les détails de l'approche expérimentale développée. L'essai de rétention d'eau, réalisé en cellule de pression de type TEMPE, a été modifié pour les besoins de cette étude de façon à réaliser l'essai sur une durée maximale de 24 heures. Les CRE ont été évaluées pour des temps de curage allant de 1 à 28 jours. Des résultats de modélisations numériques, réalisées pour étudier l'écoulement de l'eau dans un chantier remblayé, sont également présentés afin de montrer l'impact d'utiliser des fonctions hydriques représentatives du matériau évolutif qu'est le RMCP sur la distribution de l'eau.

2. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

Le remblai minier cimenté en pâte (RMCP) qui a été fabriqué dans le cadre de cette étude consiste en un mélange de rejets de concentrateur sulfureux, de 4,5 % de liant formé de ciment Portland type 10 et de laitier de haut fourneau (dans un rapport 20:80) et d'eau de mélange (eau de procédé minier). Le pourcentage solide du mélange est de 76 %.

2.1 Rejets de concentrateur

Les rejets de concentrateur étudiés proviennent d'une mine de sulfures massifs volcanogènes polymétalliques, minéralisés en cuivre, en zinc, en or et en argent. Les principales propriétés physiques et minéralogiques des rejets sont représentées dans le Tableau 1; la composition minéralogique des rejets a été obtenue à l'aide d'un diffractomètre aux rayons X (Bruker A.X.S. modèle D8 Advance).

Tableau 1. Propriétés physiques et chimiques des rejets de concentrateur

Rejet de concentrateur			
Propriétés physiques		Minéral	DRX (% poids)
D_r	3,55	Pyrite	47,13
% < 2 µm	5 %	Quartz	23,70
D_{10} (µm)	3,20	Magnésite	9,81
D_{50} (µm)	17,19	Dolomite	4,19
D_{60} (µm)	23,40	Muscovite	1,71
% < 80 µm	95%	Autres	13,46
C_u	7,32		
C_c	3,82		
S_s ($m^2/kg_)$	1910		

Les rejets sont caractérisés par un coefficient d'uniformité (C_u) de 7,32, des pourcentages passants 2 µm et 80 µm de 5% et 95% respectivement et d'un diamètre des grains correspondant à 10% passant de la courbe granulométrique (D_{10}) de 3,20 µm. Ils possèdent une densité relative (D_r) de 3,55 et une surface spécifique (S_s) de 1910 m^2/kg. Ces rejets sont typiques des rejets de concentrateur des mines de métaux de base de l'Abitibi (e.g. Aubertin *et al.*, 1996, 2002) et peuvent être classés comme silt fin de faible plasticité (ML) d'après le système de classification unifiée des sols. Les principaux minéraux retrouvés dans les rejets de concentrateur sont la pyrite (47,13 %) et le quartz (23,70 %).

2.2 Liants et eau de mélange

L'agent liant sélectionné pour la préparation du mélange de remblai est constitué de 20% de ciment Portland (CP) Type 10 et de 80% de laitiers de haut fourneau (SG) (recette de liant utilisée à la mine d'où proviennent les rejets de concentrateur étudiés). La proportion de liant utilisée pour la fabrication des échantillons de RMCP est de 4,5 % du poids sec des rejets de concentrateur. Le ciment Portland Type 10 possède une chimie typique (Neville, 1981) alors que les laitiers des hauts fourneaux répondent aux recommandations de Malhotra (2001) pour prévenir l'attaque sulfatique avec un pourcentage en Al_2O_3 inférieur à 11 %. Le laitier de haut fourneau possède une surface spécifique plus élevée que le ciment Portland Type 10, avec une valeur de 2140 m^2/kg (versus 1230 m^2/kg), indiquant une plus grande finesse des particules. L'eau de procédé de la mine, récupérée directement à l'usine de remblai de la mine où les rejets de concentrateur ont été échantillonnés, sert d'eau de mélange pour la préparation des échantillons. Cette eau de mélange possède un pH proche de la neutralité (7,67) et des teneurs en sulfates et en calcium de 4 733 ppm et de 487 ppm respectivement.

3. APPROCHE EXPÉRIMENTALE

3.1 Principe de l'essai de rétention d'eau

Lorsqu'un sol est en condition non saturée, l'eau qu'il contient est soumise à une pression négative par rapport à la pression atmosphérique. Cette pression négative ou succion (ψ) est attribuable à la tension superficielle qui existe entre l'air et l'eau, en contact avec la matrice du sol (succion matricielle), ainsi qu'à l'affinité entre l'eau et le solide (Kovacs 1981; Fredlund et Rahardjo, 1993).

Pour un milieu poreux donné, les paramètres θ et ψ sont reliés l'un à l'autre et forment une propriété fondamentale du matériel connue sous le vocable de courbe de rétention d'eau (CRE) (e.g. Marshall *et al.,* 1996, Aubertin *et al*., 1998). Les points les plus importants représentés sur la CRE sont : θ_s qui correspond à la teneur en eau à saturation; ψ_a (parfois aussi appelé AEV pour « Air Entry Value ») qui représente la pression d'entrée de l'air correspondant au début de la désaturation; et ψ_r qui est la pression résiduelle exercée à la teneur en eau résiduelle θ_r. La Figure 1 illustre des courbes schématiques de rétention d'eau ainsi que les principaux points qui les caractérisent, pour un sable et un silt (Aubertin *et al*. 1995). Plusieurs facteurs peuvent influencer la CRE d'un matériau donné, notamment : la forme, la taille et la distribution des pores, la minéralogie, la surface spécifique des grains et la composition chimique de l'eau interstitielle (Aubertin *et al*., 2003). La valeur de θ à une succion ψ donnée dépend aussi du sens de l'écoulement,

(mouillage ou drainage) en raison des effets d'hystérésis (Fredlund *et al.* 1993; Maqsoud *et al.* 2002).

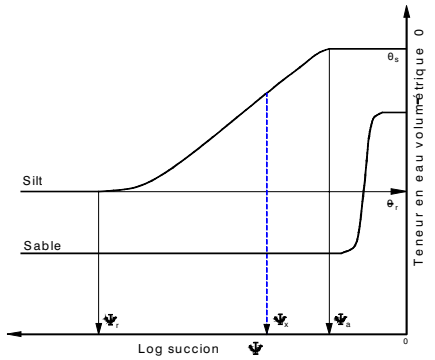

Figure 1. Représentation schématisée de courbes de rétention d'eau pour un sable et un silt (Aubertin *et al*., 1995)

3.2 Essai de rétention d'eau à l'aide de la cellule Tempe

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la CRE d'un matériau (*e.g.* Klute, 1986; Fredlund et Rahardjo, 1993). Dans le cadre de cette étude, la méthode retenue est basée sur la norme ASTM D3152-72 qui utilise une cellule pressurisée appelée communément «Tempe Cell». Pour tracer la courbe de rétention d'eau en drainage d'un matériau, un échantillon est placé sur une plaque de céramique poreuse dans une cellule de pression. Dans cette étude, la pierre céramique utilisée a une pression d'entrée d'air de 1500 kPa et une conductivité hydraulique saturée de 2,59 x 10^{-11} m/s. L'échantillon est soumis à une pression d'azote (l'azote est utilisé pour éviter les réactions d'oxydation des minéraux sulfureux) tandis que l'eau de sortie subit une pression équivalente à la pression atmosphérique. La pression appliquée dans la cellule entraîne l'écoulement de l'eau du sol, à travers la pierre poreuse, via un tube d'écoulement jusqu'à l'extérieur de la cellule. Lorsque la teneur en eau volumique du sol est en équilibre avec la pression appliquée, l'écoulement de l'eau cesse et la pression appliquée est équivalente à la succion matricielle du sol. En procédant par palier de pression et en mesurant chaque fois la quantité d'eau évacuée, on peut déterminer la courbe de rétention d'eau qui consiste en un graphique de la teneur en eau volumique θ (ou du degré de saturation, S_r) versus la succion ψ; on postule ici qu'il n'y a pas de variation de volume des échantillons durant les essais.

3.3 Influence du temps sur l'équilibre θ-ψ

Pour réaliser un essai de succion traditionnel, plusieurs semaines et même plusieurs mois peuvent être nécessaires pour laisser le temps au matériau d'atteindre l'équilibre θ-ψ et ce, pour chaque palier de pression. Comme les propriétés de rétention d'eau des remblais cimentés évoluent avec le temps de curage, et qu'il n'est pas possible d'attendre l'équilibre si on veut connaître la CRE pour un temps de cure donné (Belem *et al.,* 2001), l'essai de rétention d'eau a été modifié de façon à évaluer la CRE des RMCP à l'intérieur d'une période de 24 heures. Pour définir la méthodologie, une étude préliminaire de l'influence du temps d'application de la pression dans la cellule Tempe sur la CRE a été réalisée sur un échantillon de rejets de concentrateur (sans liant). Pour chaque niveau de pression (8 niveaux dans ce cas-ci), les degrés de saturation ont été mesurés après différentes périodes de temps, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de variation importante de θ (près de l'équilibre). La Figure 2 montre des exemples de courbes obtenues pour trois des huit paliers de pression, correspondant à peu près à des pressions équivalentes à $2\psi_a$ (20 kPa), $10\psi_a$ (104 kPa) et à ψ = 1382 kPa

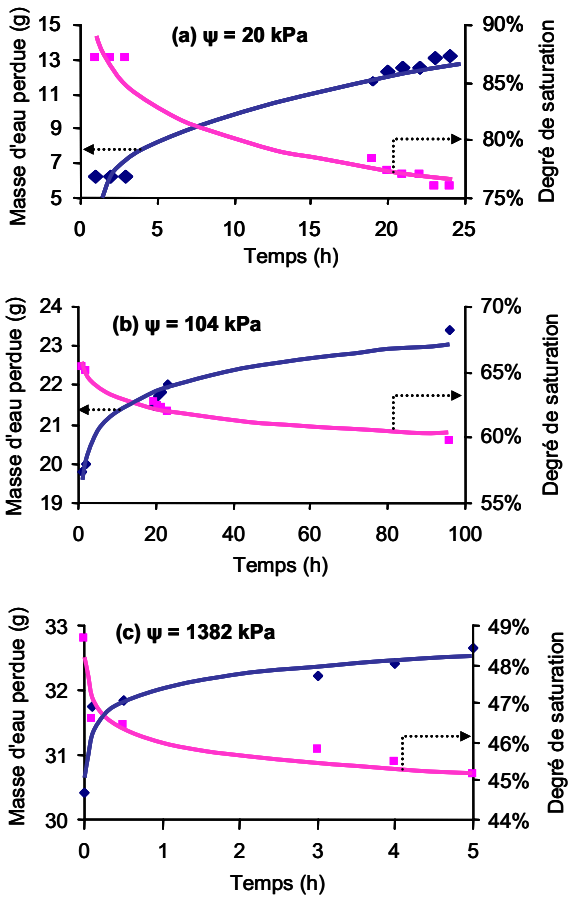

Figure 2. Exemples du temps requis pour atteindre l'équilibre pour un échantillon constitué du rejet de concentrateur étudiés à différents niveaux de pression : a) ψ = 20 kPa; b) ψ = 104 kPa; c) ψ = 1382 kPa.

Les résultats de ces essais montrent qu'après une période de 24 heures, le degré de saturation S_r de l'échantillon n'est toujours pas en équilibre avec la pression appliquée. Les résultats montrent également que, pour ce matériau, on semble plus près de l'équilibre après 24 heures pour une pression de 20 kPa (≅ 2 ψ_a)

que pour une pression de 104 kPa (≅ 10 ψ_a); pour cette dernière pression, la valeur de S_r a continué de chuter entre 24 et 96 heures (voir Figure 2b). D'un autre côté, lorsque la pression appliquée est de 1382 kPa (voir Figure 2c), le temps requis pour s'approcher de l'équilibre semble plus court que pour les deux autres pressions. En effet, après 5 heures, S_r semble près de l'équilibre à une valeur d'environ 45 %.

Comme la période requise pour atteindre l'équilibre excède 24 heures et que l'essai modifié devrait se faire à l'intérieur de cette période, l'effet du temps sur le degré de saturation (S_r) a été évalué pour connaître la différence entre les valeurs de S_r à des succions près de l'équilibre (méthode traditionnelle) et celles pour des pressions qui ne sont pas encore à l'équilibre avec le matériau étudié. La Figure 3 illustre l'influence du temps (résultats pour des temps de 2, 5 et 16 heures) sur le degré de saturation du matériel.

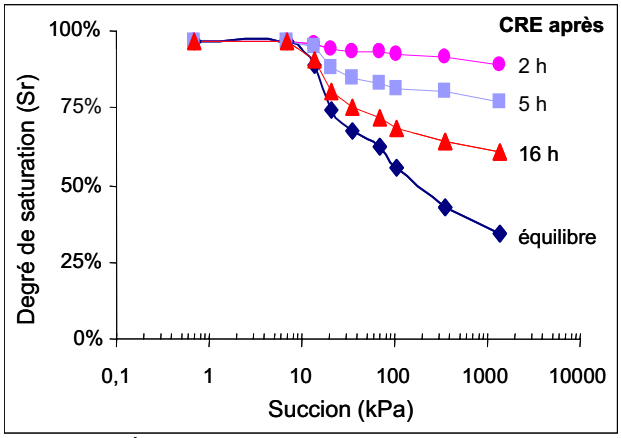

Figure. 3 Évolution des CRE pour différents temps d'application des pressions

Ces résultats indiquent que plus le temps où la pression est exercée est court, plus la CRE mesurée s'éloigne de la CRE à l'équilibre. De plus, plus on s'éloigne de la pression d'entrée d'air (ψ_a ou $\psi_{a\text{-}ct}$, l'indice ct signifie court terme) du matériau, plus l'écart entre la courbe à l'équilibre et les courbes à court terme, après différents intervalles de temps, s'accentue.

Pour la valeur de $\psi_{a\text{-}ct}$, la différence avec la valeur à l'équilibre est relativement faible, à l'intérieur des différences habituellement observées sur des essais distincts réalisés sur des mêmes matériaux. Pour une valeur de 2 $\psi_{a\text{-}ct}$, l'écart entre les valeurs de S_r mesurées et à l'équilibre, après une période de 16 heures, est d'environ 5 %. Pour la valeur maximale de pression, soit 1382 kPa, l'écart entre S_r mesuré et S_r à l'équilibre, après une période de 5 heures, se situe autour de 25 %.

Ces résultats montrent que pour une estimation de la CRE d'un rejet de concentrateur dans un court laps de temps, l'utilisation d'un temps d'application de la pression de 16 heures donne des résultats qui sont relativement représentatifs de la CRE à l'équilibre, même si les degrés de saturation sont surestimés.

3.4 Essai modifié pour évaluer les CRE des RMCP

Suite à l'étude sur l'effet du temps d'application de la pression sur la CRE, un essai de succion modifié est proposé afin d'estimer la CRE dans un délai de 24 heures. Avec cette nouvelle approche, on vise à connaître quatre points θ-ψ pour chaque temps de curage du RMCP. Le Tableau 2 montre les points θ-ψ qui ont été sélectionnés pour tracer la CRE des remblais cimentés en pâte.

Tableau 2. Points de la CRE sélectionnés pour l'essai de succion modifié

Points de la CRE		Temps requis (heure)
$\psi_{appliquée}$	θ	
0	θ_{sat}	1
$\psi_{a\text{-}ct}$	θ pour S_r = 95 %	2
$2\psi_{a\text{-}ct}$		16
Ψ = 1382 kPa		5
Temps total requis pour réaliser l'essai : 24 heures		

Le premier point de la CRE est représenté par la teneur en eau volumique saturée qui correspond à la porosité du matériel (θ_{sat} = n). Cette valeur est déduite à partir de la teneur en eau massique (wt %) et la densité relative (D_r) de l'échantillon. Le deuxième point correspond à la pression nécessaire pour amorcer le drainage de l'échantillon ($\psi_{a\text{-}ct}$). On considère que le début du drainage est atteint lorsque le débit de sortie de l'eau de l'échantillon correspond à 215 mL/h. Cette valeur a été déterminée suite à plusieurs essais sur des rejets de concentrateur qui ont montré que lorsque l'on atteignait ce débit, suite à l'application de la pression, le degré de saturation à l'équilibre correspondait à environ 95 % (la pression correspondant à cette valeur de S_r est souvent considérée à peu près égale à la pression d'entrée d'air ψ_a d'un sol; Aubertin *et al.,* 2003).

Pour obtenir la pente de la CRE, l'obtention de deux autres points est nécessaire. Le troisième point est représenté par la valeur de θ pour une pression de 2 $\psi_{a\text{-}ct}$. La mesure de θ est réalisée après un intervalle de 16 heures (temps qui permet d'approcher raisonnablement la valeur à l'équilibre; voir Figure 3). Le quatrième point est la teneur en eau correspondant à une pression de 1 382 kPa (capacité maximale de la cellule de pression) après une période de 5 heures. Ces quatre points, même s'ils sont différents de ceux obtenus à l'équilibre, devraient permettre d'obtenir un estimé réaliste de la CRE pour un matériau évolutif tel le RMCP.

3.5 Validation de la méthode développée

Pour valider la méthode, des essais traditionnels ont été réalisés sur des rejets de concentrateur non cimentés. La Figure 4 montre les résultats de quatre essais standard réalisés sur des échantillons similaires (0,46<n<0,50).

Cette figure montre également un fuseau des extrêmes observés.

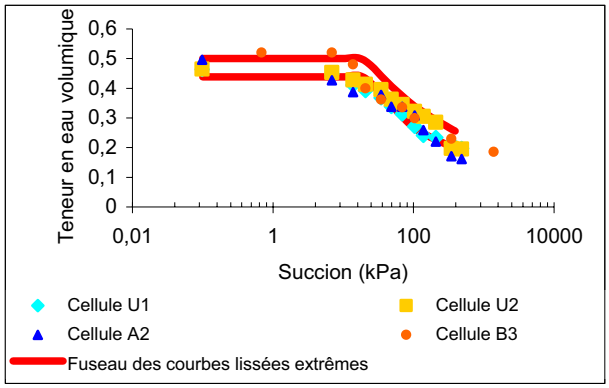

Figure 4. CRE obtenus dans diverses cellules, sur des rejets de concentrateur sans liant; on montre aussi un fuseau des courbes lissées extrêmes

Ces résultats indiquent que les essais donnent des résultats pratiquement similaires entre eux, compte tenu de la variabilité naturelle pour ce genre de test (i.e. pour un même matériau dans les mêmes conditions, les résultats peuvent être légèrement différents). On observe également que la valeur moyenne de ψ_a des rejets de concentrateur étudiés est d'environ 13 kPa.

D'autres essais, visant à tracer la CRE des rejets de concentrateur sans liant ont été réalisés, mais avec l'essai de succion modifié (durée de 24 heures). La CRE obtenue à la suite de ces essais est présentée à la Figure 5. Cette CRE se situe très légèrement au-dessus du fuseau des CRE tracées à partir de l'essai de succion standard. La différence entre les points à l'équilibre (la courbe supérieure du fuseau) et les points obtenus avec l'essai modifié est inférieure à 10 %. Ces résultats montrent que la méthode proposée permet d'obtenir une bonne approximation de la CRE des rejets de concentrateur et ce, à l'intérieur d'une période de temps de 24 heures.

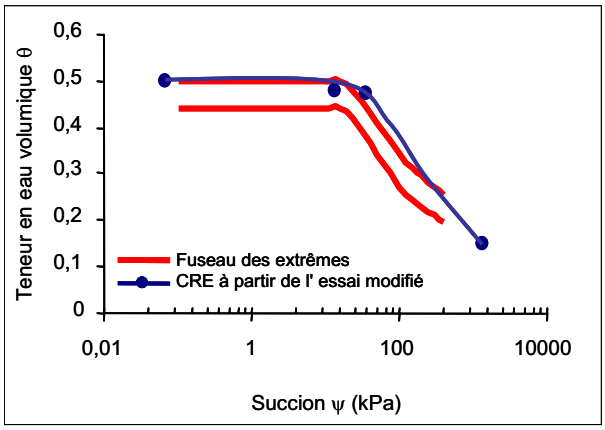

Figure 5. CRE obtenues à partir de l'essai de succion modifié (méthode des 4 points)

4. RÉSULTATS

Les résultats des essais de succion modifiés, effectués aux temps de curage 1, 3, 7, 14 et 28 jours, sont présentés aux Figures 6, 7 et 8. La Figure 6 montre l'évolution des CRE pour différents temps de curage alors que les Figures 7 et 8 présentent l'évolution du $\psi_{a\text{-}ct}$ et de la teneur en eau volumique à la pression maximale de l'essai $\theta_{1382\ kPa}$ en fonction du temps de curage.

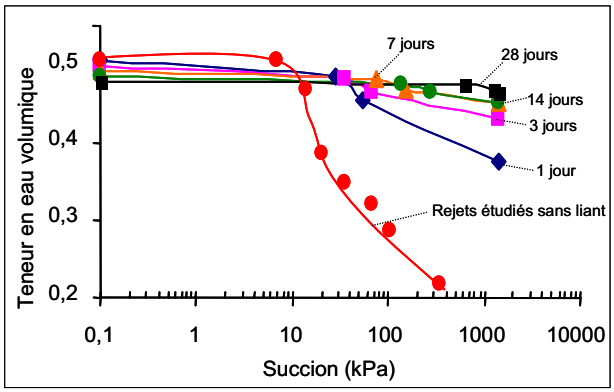

Figure 6. Évolution des CRE d'un RMCP en fonction du temps de curage

Les Figures 6 et 7 montrent que la capacité de rétention d'eau du RMCP augmente significativement avec le temps de curage. Le paramètre $\psi_{a\text{-}ct}$ passe de 13 kPa sans liant, à 27 kPa après 1 jour de cure. Pendant les quatorze premiers jours de curage, $\psi_{a\text{-}ct}$ évolue graduellement de 27 à 138 kPa. Par la suite, l'augmentation de la pression d'entrée d'air semble s'accélérer légèrement pour atteindre 622 kPa à 28 jours (voir Figure 7). Sur la Figure 6 on observe que la pente de la CRE s'adoucit alors que la valeur de $\theta_{1382\ kPa}$ augmente. Entre 1 et 3 jours de curage, $\theta_{1382\ kPa}$ augmente de façon significative et passe d'une valeur de 0,37 à une valeur de 0,43. Entre 7 et 28 jours, $\theta_{1382\ kPa}$ augmente moins rapidement et semble se stabiliser autour d'une valeur de 0,46 (Figure 8).

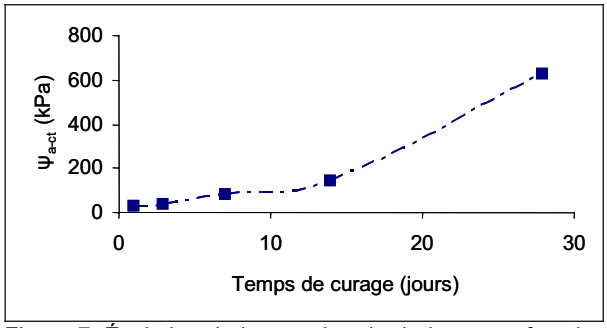

Figure 7. Évolution de la pression de drainage en fonction du temps de curage

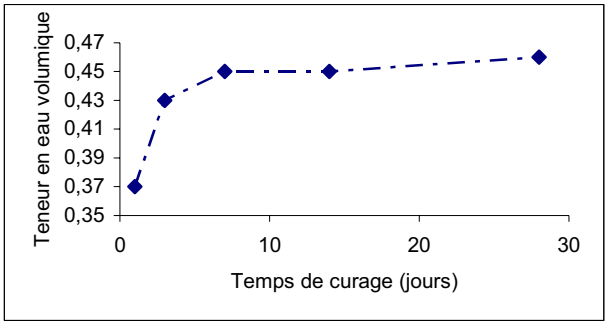

Figure 8. Évolution de la teneur en eau volumique associée à une succion de 1382 kPa ($\theta_{1382\ kPa}$) en fonction du temps de curage.

Ces résultats montrent clairement que les propriétés de rétention d'eau des RMCP évoluent rapidement durant le curage des agents liants. La microstructure du matériau change avec l'apparition des minéraux cimentaires et les précipitations qui s'en suivent dans la matrice (Benzaazoua et al., 2004c). Ces phénomènes ont pour effet de diminuer la dimension des pores, réduire la porosité effective, et ainsi modifier les propriétés de rétention d'eau du remblai. De plus, les affinités entre l'eau et les agents liants pourraient expliquer en partie l'augmentation de la rétention d'eau dans les RMCP par rapport aux rejets de concentrateur sans liant. D'autres détails concernant l'évolution de la microstructure des RMCP sont présentés par Ouellet *et al*. (2004).

5. DISCUSSION

Les résultats de cette étude démontrent que les propriétés de rétention d'eau des remblais miniers cimentés en pâte (RMCP) évoluent avec le temps de curage. Les essais de succion modifiés réalisés à l'intérieur d'une période de 24 heures ont montré qu'il y a une augmentation de la pression nécessaire pour amorcer le drainage de l'échantillon $\psi_{a\text{-}ct}$. Il y a aussi une augmentation des teneurs en eau volumique correspondant au plus haut palier de pression $\theta_{1382\ kPa}$ avec le temps de curage. Ces résultats indiquent également que pour faire des prédictions réalistes en ce qui a trait au mouvement de l'eau dans les RMCP, il est important de ne pas traiter le RMCP comme un matériel ayant des propriétés de rétention d'eau constantes et égales comme c'est le cas des rejets de concentrateur, mais plutôt comme un matériel évolutif.

Afin d'évaluer l'effet que peut avoir le caractère évolutif des CRE sur le mouvement de l'eau dans un RMCP, des modélisations numériques d'un chantier remblayé typique ont été réalisées. Le logiciel SEEP/W (version 5, GEOSLOPE International, 1996) a été utilisé dans cette étude pour simuler l'écoulement de l'eau à travers le chantier. Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour modéliser le mouvement d'un fluide ainsi que la distribution des pressions interstitielles à l'intérieur de matériaux poreux saturés ou non saturés. SEEP/W permet en outre de simuler un écoulement en régime permanent ainsi qu'en régime transitoire, pour diverses conditions frontières.

La configuration du chantier simulé est basée sur un cas réel présenté par Ouellet *et al.* 1998b. Le chantier a une hauteur de 45 mètres et une largeur de 15 mètres (Figure 9). Un point de soutirage est présent au bas du chantier. Pour les cas modélisés, le chantier était considéré complètement remblayé au temps zéro et le drainage au bas du point de soutirage était permis (barricade avec drain). On considère que les parois du chantier sont parfaitement étanches. Il s'agit ici d'une situation simplifiée de la réalité puisque selon la forme des chantiers et le taux de remplissage, le temps pour remplir un chantier peut être de quelques jours. La première simulation considère le cas d'un remblai non cimenté (fonctions hydriques tirées de Ouellet *et al*., 1998 avec ψ_a = 8 kPa et k_{sat} = 1 x 10^{-5} m/s) alors que la deuxième prend en compte l'évolution des CRE (CRE du remblai étudié illustrées à la figure 6). Dans ce dernier cas, les modélisations ont été arrêtées aux jours 1, 3, 7 et 14, pour ajuster les fonctions hydriques (CRE et fonctions de perméabilité) qui sont remplacées par celles correspondant à ces temps de curage (voir Figure 6). SEEP/W propose trois méthodes de prédiction des fonctions de perméabilité (relation entre k et ψ) en milieu non saturé, à partir de la CRE et de la conductivité hydraulique saturée. Dans cette étude, les fonctions de perméabilité ont été déterminées à l'aide de la solution analytique approchée du modèle de Mualem (1976) proposé par van Genuchten (1980). La valeur de la conductivité hydraulique saturée utilisée pour prédire les fonctions de perméabilité du RMCP pour les différents temps de curage a été déterminée en laboratoire à l'aide d'essais à charge variable avec des perméamètres à parois rigides (ASTM 2434-68) pour les temps de curage 1, 3 et 7 et à parois flexibles (ASTM D 5084 -90) pour les temps de curage 14 et 28 jours. Les résultats détaillés de ces essais ne sont toutefois pas présentés ici. On présente cependant à la Figure 10 les courbes k-ψ insérées dans le modèle, pour les deux cas étudiés.

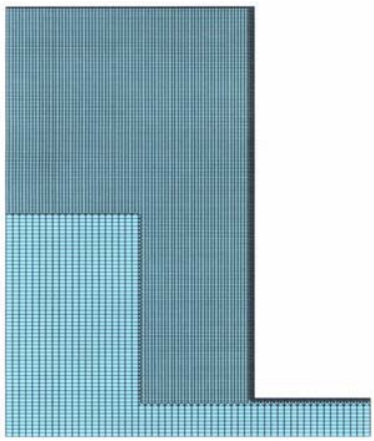

Figure 9. Modèle géométrique et le maillage utilisés pour simuler l'écoulement de l'eau dans un chantier remblayé de RMCP

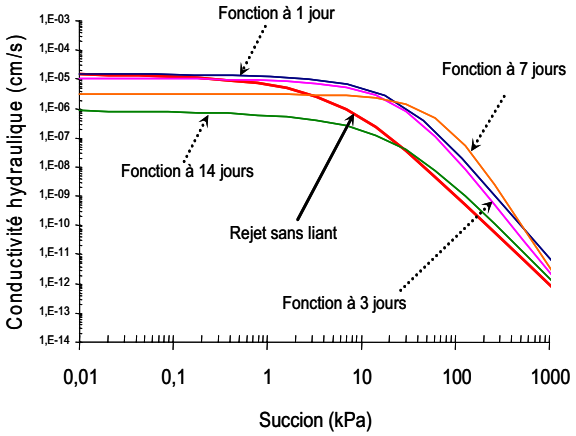

Figure 10. Fonctions de perméabilité insérées dans le modèle pour différents temps de curage des RMCP

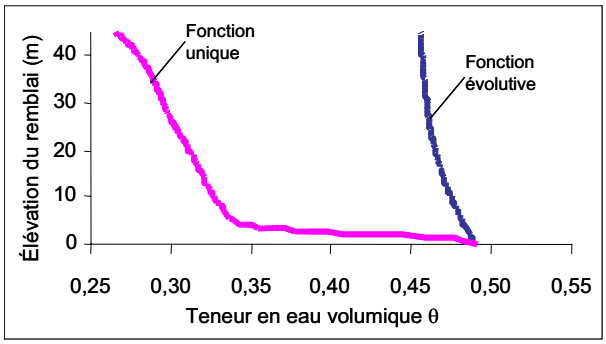

Figure 11. Profil de la teneur en eau volumique en fonction de l'élévation au centre du chantier remblayé après 28 jours de curage.

La Figure 11 présente les profils de teneur en eau volumique simulés au centre du chantier remblayé après 28 jours de cure. Elle met en évidence l'impact de l'usage d'une fonction hydrique unique plutôt que d'une fonction évolutive lors des simulations numériques. En effet, la Figure 11 montre que lorsqu'on utilise une fonction unique (moins bonne rétention d'eau que le matériel évolutif), les teneurs en eau volumiques correspondant à un degré de saturation supérieur à 90 % ($S_r = \theta/n$) ne sont observables que dans les premiers mètres (1,5 mètre à partir de la base) du chantier. Avec l'élévation, ou lorsque la succion est plus grande que la valeur de ψ_a (8 kPa dans ce cas-ci), la teneur en eau volumique diminue rapidement jusqu'à une valeur d'environ 0,27 (soit un S_r de 54 %) au haut du chantier. Lorsque l'on utilise une fonction évolutive dans la simulation, les teneurs en eau volumiques demeurent élevées sur l'ensemble du chantier avec une valeur supérieure à 0,46 (ce qui correspond à un degré de saturation supérieur à 93 %). Des essais pressiométriques réalisés en chantier par Ouellet *et al.* (1998, 2000) ont donné des résultats proches de ces modélisations avec fonctions hydriques évolutives. En effet, ces auteurs ont montré que les degrés de saturation du chantier étudié demeuraient élevés et que la saturation était quasi complète sur presque toute la hauteur du chantier qui est similaire à celui simulé dans la présente étude (seulement les 5 premiers mètres du chantier seraient en conditions non saturées; voir Ouellet *et al.* 1998).

6. CONCLUSIONS

Pour une gestion efficace des rejets de concentrateur sous forme de remblai en pâte cimenté, sous terre ou en surface, les aspects reliés à l'évolution des propriétés de rétention d'eau sont essentiels. Cette étude a permis, dans un premier temps, de développer un essai de succion sur une période de 24 heures permettant de tracer la CRE d'un matériau évolutif comme le RMCP. Les résultats des essais de succion modifiés ont montré que les propriétés de rétention d'eau des RMCP évoluent avec le temps de curage. La pression d'entrée d'air à court terme augmente de façon significative et la pente de la courbe s'adoucit entre 1 et 28 jours de curage. Les modélisations numériques ont quant à elles permis d'illustrer l'importance d'utiliser des fonctions hydriques évolutives dans la prédiction de l'écoulement de l'eau dans un chantier remblayé avec du RMCP. Les résultats montrent une influence significative du caractère évolutif des CRE, qui doit être pris en compte pour bien évaluer la distribution de l'eau, telle qu'observée sur le terrain.

7. REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce document ont été financés par la Chaire industrielle CRSNG – Polytechnique – UQAT en environnement et gestion des rejets miniers. Les auteurs tiennent à remercier les partenaires de la Chaire pour leur collaboration. Merci également à l'équipe de l'URSTM pour le soutien technique lors de la réalisation des essais de laboratoire.

8. RÉFÉRENCES

ASTM Designation: D 3152-72 Standard test method for capillarity-moisture relationships for fine-textured soils by pressure-membrane apparatus. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM Designation : D 2434-68 Standard test method for permeability of granular soils. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM Designation : D 5084 -90 Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using flexible wall permeameter. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M. Bussière, B. Ricard, J.-F., Tremblay, L. 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. MEND Report 2.22.2a.

Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. 1996. Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. Can. Geotechn. J. 35:55-69.

Aubertin, M. Ricard, J.-F., Chapuis, R.P. 1998. A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. Can. Geotechn. J. 35: 55-69 [erratum, 36:401 1999]

Aubertin, M, Bussière, B., Bernier, L. 2002. Environnement et gestion des rejets miniers. Presses internationales Polytechniques, Manuel sur CD-ROM.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. Chapuis, R.P. 2003. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. Can. Geotech., J. 40, pp 1104-1122.

Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M. 2001. The effect of microstructural evolution on the physical properties of paste backfill. Tailings and Mine Waste '01, Fort Collins, Colorado, Balkema, Rotterdam, pp 365-374.

Benzaazoua, M., Marion, P., Picquet, I., Bussière, B. 2004a. The use of pastefill as a solidification and stabilization process for the control of acid mine drainage. Mineral Engineering, 17-2: 233-243

Benzaazoua M., Perez P., Belem T. et Fall M. 2004b. A laboratory study of the behaviour of surface paste disposal. The 8th Minefill 2004 Symposia. Beijing, China on September 19-21, 2004 à paraître.

Benzaazoua M., Fall M. et Belem T. 2004c. A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. Minerals Engineering, 17-2 : 141-152.

Benzaazoua, M., Belem, T. 2000. Optimization of sulphide-rich paste backfill mixtures for increasing long-term strength and stability. In M. Sanchez, S. Castro and F. Vergara eds, Proc. 5th Conf. Clean Techn. For mining industry, Vol II, 947-957, Santiago, Chile.

Cincilla, 1997, W.A., Landriault, D.A., Verburg, R.B.M. 1997. Application of paste technology to surface disposal of mineral waste. Proceedings of Tailings and Mine Waste '97, Fort Collins, Colorado, Balkema, Rotterdam, pp. 343-356.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. Soil Mechanic for Unsaturated Soils. John Wiley and Sons, inc., New York.

Gee. G.W., Ward, A.L., Zhang, Z.F., Campbell, G.S., Mathison, J. 2002. The influence of Hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. Vadose Zone Journal, 1: 172-178.

Grabinski, M.W., Theriault , J., Welch, D. 2002. An overview of paste thickened tailings disposal on surface. In Proceedings of the Symposium 2002 sur l'environnement et les mines: Défis et perspectives, Rouyn-Noranda, CIM, Papier 533.

GEOSLOPE International 1996. SEEP/W User's Guide.

Hassani, F., Archibald, J.H. 1998. Mine backfill. CD-ROM.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In Methods of soil analysis, part I. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Edited by Klute. Agronomy Monograph No 9, American Society of Agronomy. Soil Science of America, Madison, Wis. Pp, 635-662.

Kovács, G. 1981. Seepage hydraulics. Elseviers Science Publishers, Amsterdam.

Landriault, D.A., Tenbergen, R. 1995. The present state of paste fill in Canadian underground mining. Proceedings of the 97th Annual Meeting of the C.I.M. Rock mechanics and Strata Control Session, Halifax, Nova Scotia, 14-18 May 1995.

Levens, R.L., Marcy, A.D., and Boldt, C.M.K. 1996. Environmental Impacts of Cemented Mine Waste Backfill. RI 9599, United States Bureau of Mines, 23 pp.

Malhotra, V.M. 2001. High-performance high-volume fly ash concrete for sustainability, Proccedings of theP.-C. Aïtcin symposium on the evolution of concrete technologie, American Concrete Institute, A. Tagnit-Hamou, K.H. Khayat and R Gagné eds., 19-74.

Maqsoud, A., Bussière B., Aubertin, M. 2002. L'hystérésis des sols non saturés utilisés dans les couvertures avec effets de barrière capillaire. In Proceedings on the 55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd Joint IAH-CNC Ground water Specialty Conference, Niagara Falls, Ontario, Canada, Edited by D. Stolle, A. Piggot, and J.J. Crowd. pp 181-188.

Marshall, T.J., Holmes, J.W., Rose, C.W. 1996. Soil physics. 3rd ed. Cambridge University Press., Cambridge, U.K.

Mitchell, R.J. 1989. Stability of cemented tailings mine backfill. In Balasubramaniam *et al*. eds, Proceedings of Computer and physical modelling in geotechnical engeenering, 501-507, Rotterdam, Balkema.

Neville, A.M. 1981. Properties of concrete. 3rd edition, 779 p.

Ouellet , J., Servant, S. 2000. In-situ mechanical characterization of a paste backfill with a self-boring pressuremeter. CIM Bulletin, Vol. 93, No 1042.

Ouellet, J., Servant, S. 1998. Numerical simulation of the drainage in a mining stope filled with hydraulic backfill. Minefill '98, Brisbane, pp 105-110.

Ouellet, J., Benzaazoua, M., Servant, S. 1998. Mechanical, mineralogical and chemical caracterisation of paste backfill. Proc. 4th Int. Conf. Tailings and Mine Waste, 139-146, Rotterdam, Balkema.

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. These proceedings.