

# MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF COLUMN CONSOLIDATED PASTE BACKFILL

Omar El-Aatar et Tikou Belem,  
*Applied Sciences – Université du Québec, Rouyn-Noranda, Québec, Canada*  
 Bruno Bussière, Mostafa Benzaazoua et Erol Yilmaz  
*Applied Sciences – Université du Québec, Rouyn-Noranda, Québec, Canada*



## ABSTRACT

The objective of this study is to characterize the microstructural properties of cemented paste backfill (CPB) after its self-weight consolidation in columns. To reach this objective, three self-weight consolidation column tests that have each 3 m height were carried out on *in situ* CPB samples at Louvicourt mine's backfill plant. These columns simulate three realistic drainage scenarios such as fully drained (FD), half-drained (HD) and undrained (UD) columns. After a 90-day curing time, 20 core samples were taken from each consolidated CPB column and subjected to uniaxial compression tests followed by mercury intrusion porosimetry (MIP) tests and BET (Brunauer-Emmett-Teller) specific surface analysis. Results showed that the MIP total porosity and the specific surface area data of CPB materials are well correlated to the uniaxial compressive strength values. Maximum strength (2.9 MPa) was associated with the completely drained CPB which usually has finer pores, a lower total porosity and a relatively higher specific surface area. This correlation is appreciably different between the bottom and the top of each column consolidated backfill material.

## RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de caractériser les propriétés microstructurales des remblais en pâtes cimentées après leur consolidation sous leur poids propre en colonne. Pour atteindre cet objectif, trois colonnes de 3 m de hauteur ont été établies à l'usine de remblai de la mine Louvicourt. Ces colonnes simulent trois scénarios réalistes de drainage (probablement observables dans les chantiers remblayés) dont une colonne totalement drainée (TD), moitié drainée (MD) et une colonne non drainée (ND). Après 90 jours de cure, 20 échantillons ont été pris à partir de chaque colonne et ont été soumis aux essais de compression uniaxiale (UCS) suivis de la porosimétrie par intrusion de mercure (PIM) et de mesures de surface spécifique (BET). Les résultats ont montré une bonne corrélation des données de la porosimétrie (PIM) et de la surface spécifique (BET) avec les valeurs de la compression UCS. La résistance maximale (2,9 MPa) est associée au remblai totalement drainé possédant des pores fins, une porosité totale élevée et une surface spécifique relativement importante. Cette corrélation est sensiblement différente entre le bas et le haut de chaque colonne de remblai.

## 1 INTRODUCTION

L'utilisation du remblai en pâte cimenté (RPC) est devenue une technique de plus en plus adoptée pour le remblayage souterrain à travers le monde et particulièrement au Canada (e.g., Landriault & Tenbergen 1995, Benzaazoua et al. 2005). Cette technique de remblayage est employée pour atteindre deux objectifs principaux : le support de terrain après l'extraction du minerai et la réduction de la masse des résidus miniers envoyés en surface dans les parcs à résidus. Les principales composantes de ce remblai sont les résidus miniers (aussi appelés rejets de concentrateur) qui sont mélangés avec de l'eau de malaxage et un agent liant (ciments Portland, chaux, cendres volantes, scories de haut fourneau ou leur combinaison). Ces trois composantes sont pondérées et mélangées afin d'assurer l'acquisition d'une résistance mécanique minimale à court, moyen et à long terme. En plus des nombreux paramètres intrinsèques pouvant influencer l'acquisition de la résistance mécanique (ex. proportion et

type de liant, qualité de l'eau de mélange, minéralogie et granulométrie des résidus miniers), on peut citer d'autres facteurs d'influence qualifiés d'extrinsèques tels que les conditions de mise en place et de consolidation du remblai, la géométrie du chantier ainsi que la différence d'échelle entre les chantiers *in situ* et les éprouvettes du RPC analysées au laboratoire (Belem et Benzaazoua 2003, Revell 2004; Aubertin et al. 2007). La consolidation gravitaire implique un drainage d'une partie de l'eau interstitielle; ce qui entraîne une augmentation de la contrainte effective et le réarrangement des grains qui provoquent le tassement du remblai (Belem et al. 2002).

De nombreuses études ont déjà été entreprises sur la caractérisation des propriétés mécaniques des remblais en pâte (Mitchel *et al.*, 1982, Hassani and Archibald, 1998, Belem *et al.*, 2000, Benzaazoua et al., 2004, Ouellet et al., 2005). D'autres travaux ont porté sur la caractérisation de la microstructure des remblais en pâte ainsi que de l'étude de leurs propriétés hydrogéotechniques (Belem et al. 2001 et 2002, Godbout

et al. 2004, Ouellet et al. 2004 et 2005). Des travaux récents ont porté sur la caractérisation hydrogéotechnique du remblai en pâte consolidé dans des colonnes (Belem et al. 2006) ainsi que sur la géochimie de l'eau drainée des colonnes (Belem et al. 2007). Mais l'un des aspects intéressants à étudier également serait de pouvoir faire le lien entre la microstructure du remblai en pâte consolidé et ses propriétés hydrique et mécanique. Des résultats d'essais de consolidation gravitaire du remblai en pâte en colonnes ainsi que de leur caractérisation microstructurale sont présentés dans cet article. Ici la microstructure est évaluée par des méthodes indirectes telles que la porosimétrie au mercure et la détermination de la surface spécifique des grains du remblai séché puis broyé. Puisque la cohésion ou la résistance mécanique dépend des caractéristiques de la microstructure du remblai, un lien sera également établi entre ses propriétés. Les essais de consolidation gravitaire ont été réalisés sur le site de l'usine de remblai de la mine Louvicourt (LVT).

## 2 MATERIEL

Le mélange de remblai en pâte de la mine LVT est fait des résidus miniers résultant du traitement du minerai avec de l'agent liant et de l'eau de mélange (eau de procédé recyclée). La résistance optimale du remblai résultant de ces mélanges peut atteindre 4 MPa selon le pourcentage de liant utilisé (Benzaazoua *et al.*, 2000).

### 2.1 Résidus du concentrateur de la mine LVT

Les résidus de la mine LVT sont considérés moyennement sulfureux avec une teneur en soufre total variant entre 10 % et 19 % massique et une densité relative typique de ces résidus de 3,53 (Cayouette, 2003). Les principales caractéristiques physiques de ces résidus sont résumées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Paramètres indexes des résidus de la mine LVT.

Paramètres	Valeur
Densité relative $G_s$ (ou $D_R$ )	3,53
Surface spécifique massique ( $S_m$ )	1721 m <sup>2</sup> /kg
$D_{10}$ , diamètre du grain à 10% passant	3,22 µm
$D_{30}$ , " 30% passant	10,10 µm
$D_{50}$ , " 50% passant	21,62 µm
$D_{60}$ , " 60% passant	30,39 µm
$D_{90}$ , " 90% passant	98,79 µm
$C_U = D_{60} / D_{10}$ (coeff. d'uniformité)	9,4
$C_c = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$ (coeff. courbure)	1,0
$\Delta = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$ (étendue)	4,4
Teneur en fines (< 20 microns)	46,7 % v/v

On constate que les grains de ces résidus sont relativement denses et fins avec un pourcentage des fines (< 20 microns) élevé (47 wt.%) et une surface spécifique relativement élevée (1721 m<sup>2</sup>/kg). La teneur en sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) de l'eau interstitielle des résidus est de

1561 mg/L. La nature sulfureuse de ces résidus ajoutés à la présence de sulfates pourrait affecter la cohésion entre les grains en agissant sur le processus de cimentation (Benzaazoua *et al.*, 2002 et 2004).

### 2.2 Agent liant dans le RPC de la mine LVT

Le rôle principal des agents liant est d'assurer la cimentation entre les grains par la formation des minéraux hydratés qui vont combler les pores. L'agent liant utilisé est composé de ciment Portland Type 10 et un laitier de haut-fourneau à un rapport de 20:80. Pour les mélanges, une proportion de 4,5 wt % (massique) d'agent liant est utilisée (Cayouette, 2003). Le ciment Portland Type 10 est très utilisé pour les conditions normales non agressives et permet l'apparition rapide de la cohésion. Le laitier de haut fourneau offre une meilleure résistance à l'attaque sulfatique, mais son hydratation est plus lente et pourrait jouer un rôle important dans la formation des hydrates C-S-H à long terme.

### 2.3 Eau de mélange du RPC de la mine LVT

L'eau de mélange du remblai en pâte est l'eau de procédé recyclée de la mine LVT. Cette eau a un pH variant entre 6 et 7,4 avec un potentiel d'oxydo-réduction Eh de 349 mV. Sa teneur en sulfates est de 1303 mg/L et ces sulfates s'ajoutent à ceux déjà existants dans l'eau des pores des résidus. Le Tableau 2 ci-après présente la composition chimique moyenne de l'eau de procédé recyclée de la mine LVT (l'eau de procédé est comparée dans le tableau à de l'eau du robinet).

Tableau 2. Composition chimique de l'eau de procédé de la mine LVT.

Élément analysé	Eau du robinet	Eau de procédé recyclée
[Ca]	40.4 mg/L	387 mg/L
[Fe]	0.245 mg/L	0.16 mg/L
[Al]	0.114 mg/L	0.168 mg/L
[Na]	5.31 mg/L	40.2 mg/L
[Si]	1.28 mg/L	1.25 mg/L
[Mg]	3.66 mg/L	12.1 mg/L
[ $SO_4^{2-}$ ]	87 mg/L	1303 mg/L

## 3 METHODES

Les remblais étudiés dans cet article ont été consolidés dans des colonnes en plastique placées à l'usine de remblai de la mine LVT. Ces colonnes de remblai simulent les conditions de consolidation gravitaire des remblais dans les vides souterrains. Les caractéristiques physico-chimiques, hydriques et microstructurales de ces remblais ont été étudiées au laboratoire à l'aide de différentes méthodes décrites brièvement ci-dessous.

### 3.1 Préparation de la recette de remblai en colonne

Le remblai en pâte utilisé dans ces essais est similaire à celui préparé à l'usine de remblai de la mine LVT avec la recette habituelle d'agent liant déjà mentionnée à la

section 2.2. Les mélanges de remblai ont été ajustés en terme d'affaissement (ou slump) avant leur mise en place dans les colonnes. Selon Cayouette (2003), l'affaissement initial du remblai en pâte augmenterait de l'ordre de 2,5 cm (1 pouce) pendant leur transport dans les pipelines depuis la surface jusqu'aux chantiers sous terre à remblayer. Le RPC de LVT dont l'affaissement initial est de 170 mm (6,7 pouces) a subi un deuxième malaxage à l'aide d'un malaxeur à béton pendant environ 20 minutes jusqu'à l'obtention d'un affaissement de l'ordre de 198 mm (7.8 pouces) afin de simuler le transport du remblai.

### 3.2 Consolidation en colonne

Pour simuler les conditions de mise en place des remblais dans les vides souterrains, trois colonnes en PVC (hauteur : 3 m et section :  $31,5 \times 30,5 \text{ cm}^2$ ) ont été fabriquées pour les essais de consolidation des RPC sous leur poids propre. Il s'agit d'une colonne totalement drainée (TD) où le remblai se draine sur toute la hauteur de la colonne au travers d'un joint en géotextile, d'une colonne à moitié drainée (MD) dont le drainage est permis sur la moitié de la colonne au travers d'un joint moitié en géotextile et moitié en caoutchouc, et d'une colonne non drainée (ND) (joint en caoutchouc sur toute la hauteur). Les eaux drainées des deux types de colonne (TD et MD) ont été recueillies dans des bidons reliés à la base des colonnes et destinées aux analyses chimiques ICP-AES (Figure 1).

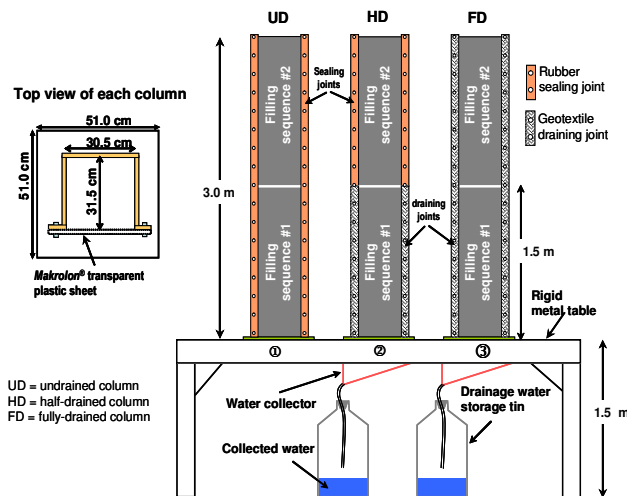


Figure 1. Schématisation du dispositif de consolidation gravitaire du RPC en colonne à l'usine de remblai de la mine LVT (d'après Belem *et al.*, 2006)

La mise en place des remblais dans ces trois colonnes a été effectuée en deux couches pour chaque colonne sur une période de temps de 48 heures. Le suivi des mesures du drainage et du tassement des remblais a été fait durant les cinq premiers jours après le début du remplissage des colonnes. En effet, ce nombre de jours représente la période de drainage total de ce remblai en pâte. Les mesures ont été effectuées de façon périodique pour un intervalle de temps d'une heure.

### 3.3 Démantèlement des colonnes et échantillonnage

La consolidation gravitaire des RPC en colonne a été poursuivie pendant 45 jours dans les conditions ambiantes de l'usine de remblai de la mine LVT. Après ce temps de cure, chaque colonne a été démantelée et le remblai en pâte a été découpé en 10 blocs de même taille. Ensuite, deux éprouvettes de remblai ont été carottées dans chacun des dix blocs donnant accès à un total de 60 éprouvettes de remblai pour les trois colonnes. Ces échantillons de remblai en pâte consolidé ont été ensuite conservés dans une chambre humide à 70% d'humidité relative (HR) et 23°C. Tous ces échantillons sont destinés à la caractérisation des propriétés mécanique et microstructurale du RPC de la mine LVT. En raison des contraintes de laboratoire, le temps de cure final de ces échantillons a été de 87 jours pour les échantillons de la colonne drainée (TD), 89 jours pour ceux de la colonne à moitié drainée (MD) et 91 jours pour ceux de la colonne non drainée (ND).

### 3.4 Essais de compression uniaxiale

Les essais de compression destinés à la mesure de la résistance à la compression uniaxiale (UCS) ont été réalisés sur les 60 échantillons des RPC à l'aide d'une presse mécanique MTS de 50 kN de capacité. Tous les échantillons ont été testés à une vitesse de chargement constante de 1mm/min jusqu'à atteindre 80% de la valeur de la contrainte de pic. La précision de la mesure de la charge appliquée est l'ordre de 1%. Les échantillons testés avaient un élargissement (rapport hauteur et diamètre) variant de 2,1 à 3.

### 3.5 Caractérisation de la microstructure

Dans cette étude, la microstructure du remblai en pâte consolidé est évaluée à l'aide d'essais de détermination de la surface spécifique et de la porosimétrie au mercure. En effet, la connectivité du réseau des pores ainsi que la distribution de leur taille est un bon indicateur de la nature de la microstructure du RPC consolidé. De plus, le suivi de la surface spécifique permet de quantifier indirectement l'apport des hydrates et précipités formés lors de la cure du remblai consolidé. Ces minéraux néoformés sont responsables de la cohésion de la matrice du remblai consolidé. Ces paramètres pourront ensuite être reliés à la résistance mécanique du remblai en pâte.

#### 3.5.1 Détermination de la surface spécifique

Les échantillons sont d'abord séchés et broyés à l'aide d'un rouleau à pâte pour obtenir des masses d'à peu près 3 g. Les tubes d'analyses sont remplis à environ la moitié avec la poudre obtenue pour assurer que le gaz envahisse toute la masse de l'échantillon. Ce paramètre a été déterminé sur trente échantillons par la méthode B.E.T. (Brunauer, Emmett et Teller) d'adsorption de l'argon (gaz inerte) à l'aide de l'analyseur de surface Gemini III de Micromeritics®.

La surface spécifique est un bon indicateur de la finesse des grains de RPC qui dépend à la fois de la finesse du résidu initial et celle des hydrates formés. La surface spécifique massique,  $S_m$ , d'un matériau comprend la surface géométrique externe ainsi que la surface interne développée par le solide. Cette surface tient compte de toutes les irrégularités de surface à l'échelle moléculaire et de la surface développée par les parois des pores. Par définition, c'est le rapport de l'ensemble de ces surfaces à la masse de l'échantillon ( $m^2/g$  ou  $m^2/kg$ ).

### 3.5.2 Porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure repose sur les lois de capillarité gouvernant la pénétration d'un liquide dans des pores. Dans le cas d'un liquide non-mouillant comme le mercure et en admettant que les pores sont cylindriques, la loi de Laplace ou l'équation de Washburn (1921) montre que la pression  $p$  (en psi ou en MPa) nécessaire pour faire entrer le mercure dans un pore augmente (inversement) quand le diamètre  $d_p$  (microns) ou le rayon  $r_p$  (microns) de l'ouverture du pore devient de plus en plus petit :

$$d_p = -\frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos \phi}{p} \quad \text{ou} \quad r_p = -\frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \phi}{p} \quad [1]$$

où  $\gamma$  = tension superficielle du mercure (en général, 480 dynes/cm ou 0.485 N/m),  $\phi$  = angle de contact entre la surface solide et le mercure ou angle de raccordement du ménisque mercure-vapeur de mercure au capillaire (entre  $130^\circ$  et  $141^\circ$ , mais proche de  $140^\circ$  en moyenne). L'angle de contact entre le matériau et le mercure varie selon la composition du solide, mais une valeur de  $130^\circ$  est souvent recommandée en l'absence d'information spécifique (Good and Mikhail, 1981).

Pour cette étude, la porosité par intrusion de mercure a été déterminée avec le porosimètre au mercure *AutoPore III* de *Micromeritics*®. L'essai est effectué en appliquant des niveaux croissants de pression à un échantillon immergé dans le mercure.

Le diamètre (ou le rayon) des pores est calculé à partir de la pression appliquée en admettant que tous les pores sont de forme cylindrique. Selon la classification de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), on distinguerait trois classes de taille des pores: les micropores ( $d < 0.002 \mu m$ ), les mésopores ( $0.002 \mu m < d < 0,05 \mu m$ ) et les macropores ( $d > 0,05 \mu m$ ). L'appareil *AutoPore III* permet seulement d'accéder à la méso et macroporosité. Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme de courbes cumulatives et incrémentales (distribution modale de la taille des pores) du volume de mercure injecté par gramme d'échantillon (mL/g) en fonction du diamètre ou du rayon des pores ( $\mu m$ ).

Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisés sur 30 échantillons; ce qui constitue la moitié des 60 échantillons ayant subis les essais de compression uniaxiale.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 Drainage et tassement du RPC au cours du temps

La Figure 2 montre une comparaison de l'évolution de la quantité d'eau drainée en fonction du temps écoulé pour la colonne drainée (TD) et moitié drainée (MD). On constate que le drainage est similaire entre le début et la fin du remplissage des colonnes qui s'est fait à l'intérieur de 24 heures. Juste après la fin du remplissage, la quantité d'eau drainée à partir de la colonne TD commence à dépasser largement celle drainée de la colonne MD.

Le volume cumulé d'eau drainée de la colonne TD constitue 15,8 % (24 L) volume total de l'eau des remblais (152,06 L), tandis que l'eau drainée de la colonne MD est de 8,9 % (13,5 L) de cette quantité totale. Il est donc clair que le drainage de la colonne TD est deux fois plus grand que le drainage de la colonne MD. Ceci pourrait être très important quant à l'interprétation de l'effet des murs encaissants des remblais dans les chantiers remblayés.

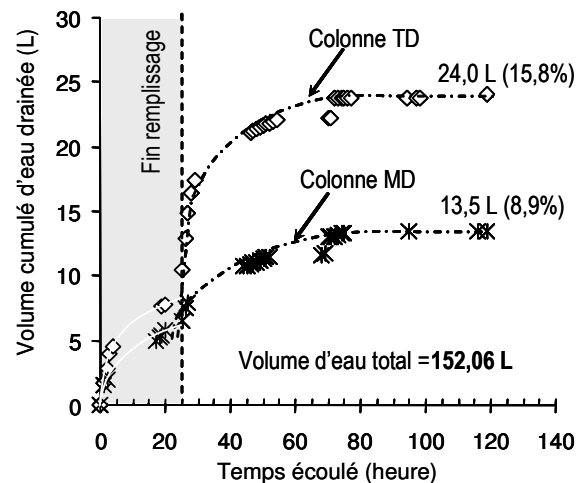


Figure 2. Évolution du drainage des RPC des colonnes TD et MD au cours du temps de consolidation gravitaire

La Figure 3 présente le tassement gravitaire résultant du drainage et/ou du ressuage ainsi que la déformation volumique correspondante pour le remblai en pâte des trois types de colonne (TD, MD et ND). On peut observer que le tassement augmente proportionnellement au drainage/ressuage et ont tendance à se stabiliser à partir des premières 72 heures de temps écoulé.

Les déformations volumiques calculées à partir des tassements mesurés pour les trois colonnes sont respectivement de 5,5 %, 2,8 % et 2,5 % pour les colonnes TD, MD et ND. À la mine LVT, la déformation volumique observée en chantier varierait entre 3,3 % et 5 % (Cayouette 2003).

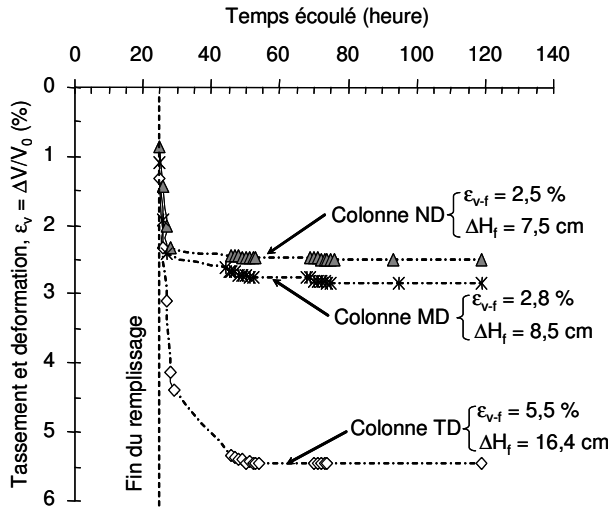


Figure 3. Évolution du tassement observés et de la déformation volumique du RPC des colonnes TD, MD et ND en fonction du temps de consolidation gravitaire.

4.2 Évolution de la résistance UCS des RPC le long de la hauteur des colonnes

La Figure 4 présente la variation de la résistance en compression uniaxiale (UCS) des remblais le long de la hauteur des colonnes.

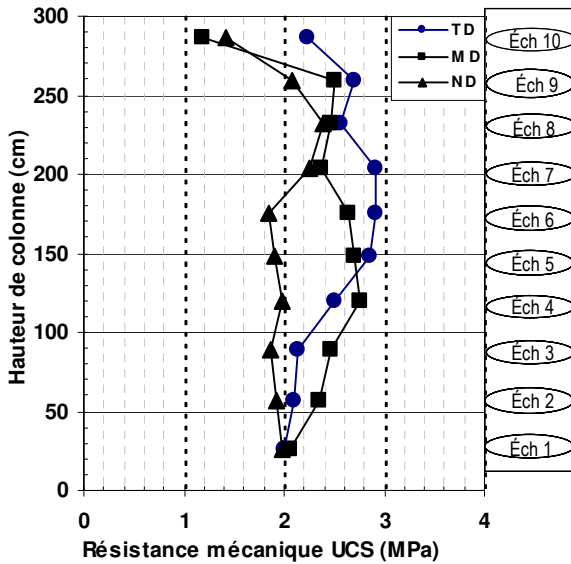


Figure 4. Variation de la résistance mécanique (UCS) des RPC en fonction de la hauteur des colonnes TD, MD, et ND.

Il en ressort de cette figure que l'UCS atteint sa valeur maximale au niveau de l'interface entre les deux couches de remblai déposées dans chaque colonne. La résistance maximale des RPC de ces colonnes est respectivement de 2,9 MPa, 2,7 MPa et de 2,4 MPa pour les colonnes TD, MD et ND.

4.3 Évolution de la surface spécifique des RPC le long de la hauteur des colonnes

La Figure 5 présente l'évolution de la surface spécifique  $S_m$  des RPC pour les trois colonnes remblayées. Cette figure montre que la surface spécifique varie selon la configuration du drainage et en fonction de la profondeur d'échantillonnage le long de la colonne. Pour la colonne ND,  $S_m$  varie entre 8,2 m<sup>2</sup>/g et 8,9 m<sup>2</sup>/g pour la première couche (couche inférieure) et entre 7,8 et 8,2 m<sup>2</sup>/g pour la couche supérieure.  $S_m$  de la colonne MD ne varie pas en fonction des séquences de remplissage mais elle atteint sa valeur maximale de 12,9 m<sup>2</sup>/g et sa valeur minimale de 7,7 m<sup>2</sup>/g successivement aux niveaux 90 cm et 200 cm. Pour la colonne TD, la  $S_m$  diminue de 10,5 m<sup>2</sup>/g à 8,5 m<sup>2</sup>/g le long de la première couche et reste constante à environ 8,5 m<sup>2</sup>/g le long de la deuxième couche remblayée.

Il a été démontré qu'il existait une forte corrélation entre la surface spécifique et la résistance en compression uniaxiale (Benzaazoua *et al.*, 2000). Cela voudrait dire qu'en plus d'être un indicateur de la finesse des grains des matériaux,  $S_m$  serait indirectement relié à l'hydratation des agents liant. Par conséquent, les fortes valeurs de résistance atteinte au cours du temps et avec combinaison avec le drainage traduisent l'effet bénéfique du drainage/ressuage sur l'acquisition de résistance mécanique du remblai en pâte.

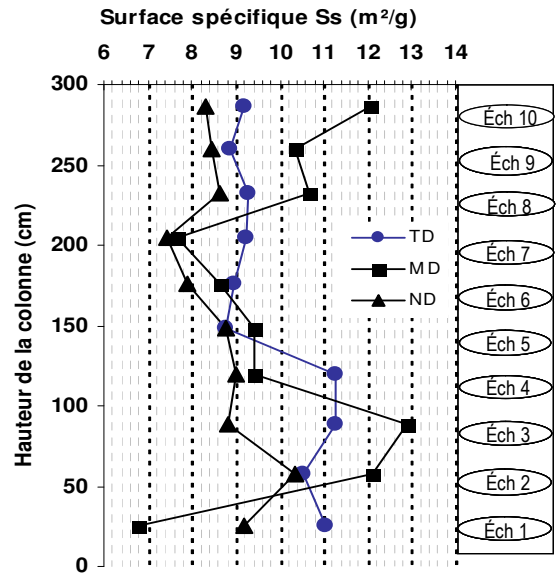


Figure 5. Évolution de la surface spécifique  $S_m$  des RPC en fonction de la hauteur des colonnes TD, MD, et ND

4.4 Porosimétrie au mercure des RPC en colonne

Les résultats de la porosimétrie au mercure des échantillons de RPC des trois colonnes sont présentés en termes de courbes cumulées et de courbes incrémentales.

#### 4.4.1 Porosité du RPC de la colonne TD

Les Figures 6 et 7 présentent les courbes de porosité cumulée et incrémentale du remblai en pâte de la colonne drainée (TD). Il en ressort de ces deux figures que la porosité totale au mercure de la colonne TD, diminue presque graduellement du bas vers le haut.

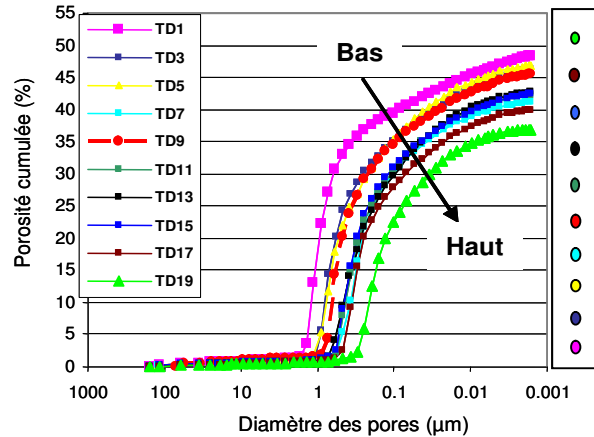


Figure 6. Évolution de la porosité cumulée le long de la hauteur de la colonne TD

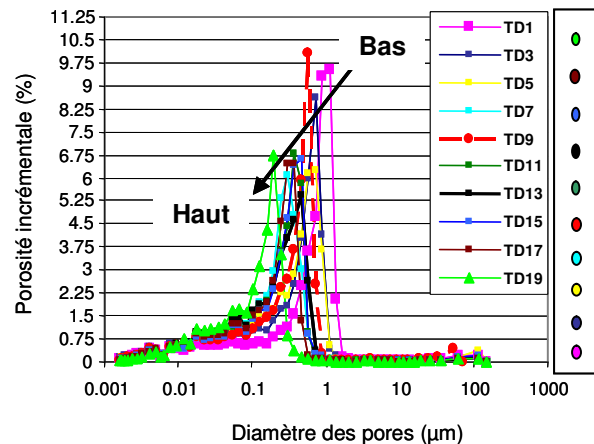


Figure 7. Évolution de la porosité incrémentale le long de la hauteur de la colonne TD

Le diamètre seuil (threshold diameter,  $D_{th}$ ) qui correspond au point d'inflexion de la courbe cumulative de porosité décrit le seuil de percolation ou le plus petit diamètre à partir duquel le mercure va accéder massivement dans la matrice du remblai en pâte. On l'appelle également le seuil de pénétration du mercure. Le diamètre seuil varie de 0,2  $\mu\text{m}$  (mésopores) en haut de la colonne à 1  $\mu\text{m}$  en bas (macropores). La porosité totale par intrusion de mercure atteint 50% avec une augmentation de la proportion des pores fins en haut de la colonne et chute progressivement à 37% vers le bas de la colonne. On note donc un changement régulier de la microstructure du remblai totalement drainé tout le long de la colonne.

#### 4.4.2 Porosité du RPC de la colonne MD

Les Figures 8 et 9 présentent les courbes de porosité cumulée et incrémentale au mercure du RPC de la colonne MD. On y observe que la porosité totale ne change pas beaucoup le long de la colonne MD.

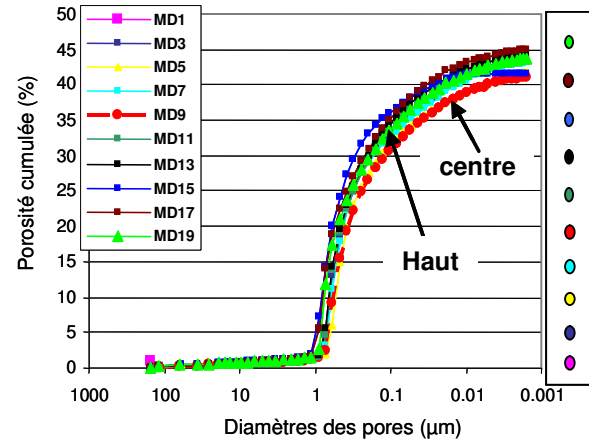


Figure 8. Évolution de la porosité cumulée le long de la hauteur de la colonne MD

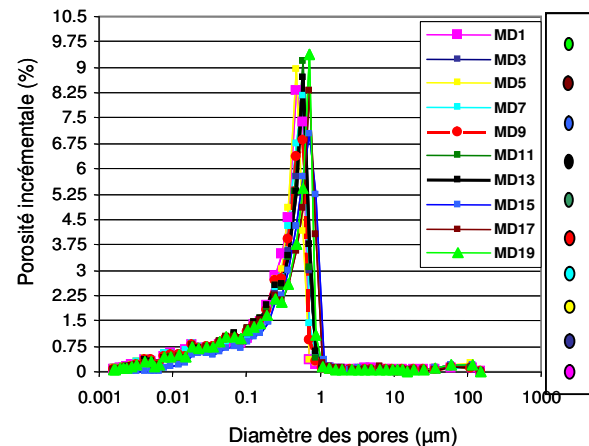


Figure 9. Évolution de la porosité incrémentale le long de la hauteur de la colonne MD

Une seule famille de diamètre seuil est enregistrée aux alentours des macropores (0,7  $\mu\text{m}$ ) traduisant ainsi l'existence d'un réseau poreux du remblai en pâte similaire dans la configuration de la colonne à moitié drainée. La porosité totale (entre 40 et 45%) indique une faible variation de 5% entre le haut et le bas de la colonne. La microstructure du remblai à moitié drainé est donc homogène sur toute la hauteur de la colonne à la différence de la colonne TD.

#### 4.4.3 Porosité du RPC de la colonne ND

Les Figures 8 et 9 présentent les courbes de porosité cumulée et incrémentale au mercure du RPC de la colonne ND. On y observe que la porosité totale au Hg varie entre 39% et 46%.

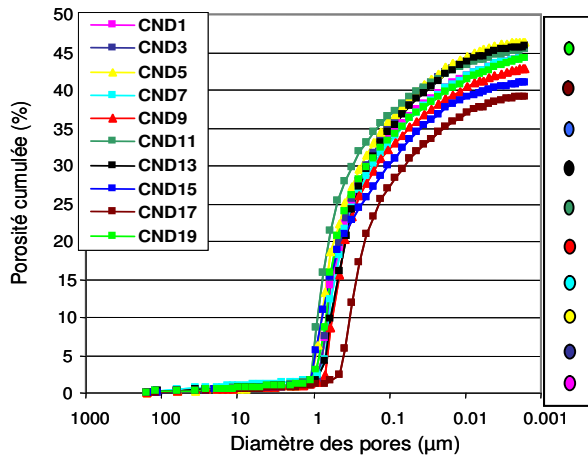


Figure 10. Évolution de la porosité cumulée le long de la hauteur de la colonne ND

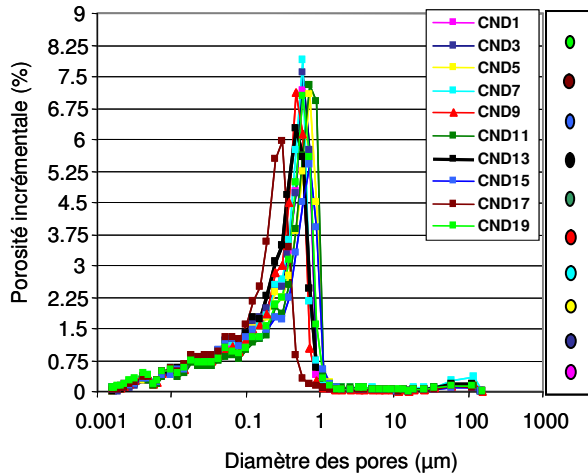


Figure 11. Évolution de la porosité incrémentale le long de la hauteur de la colonne ND

La porosité incrémentale par intrusion de Hg varie sensiblement le long de la colonne et par similitude à la colonne TD, on note la présence des macropores de 0,2 à 1 µm de diamètre. Cette porosité est aléatoirement distribuée le long de la colonne et on observe qu'il n'est pas facile d'associer une valeur de porosité avec la position de l'échantillon dans la colonne.

## 5 DISCUSSION

D'une façon générale, la porosité du remblai totalement drainé (TD) diminuant du bas vers le haut de la colonne signifie que la base est plus poreuse que le haut. Ceci se traduit au bas de la colonne par une porosité totale de 50%, des macropores de 2 µm et une porosité incrémentale maximale de 9,75%. Quant au haut de la colonne, cette porosité totale devient 37% avec un grand pourcentage des pores fins et une porosité incrémentale maximale de 6,75%. Le remblai à moitié drainé (MD) ne montre pas de différence significative quand à la porosité et reste toujours moins poreux (45% de porosité totale et

9% de porosité incrémentale) par rapport au remblai de la colonne TD. Le remblai non drainé (ND) ne montre pas non plus une variation particulière quant à l'évolution de la porosité en fonction de la hauteur de la colonne. Il est cependant moins poreux que le remblai TD, avec une porosité totale de 45 % et 7,5% des pores de dimension de 0.9 µm.

Il est cependant important de signaler que la technique de la porosité au mercure ne donne pas une image des pores réels dans les RPC, les macropores étant parfois sous-estimés et les mesopores sont surestimés (références). En présence des conditions favorables de consolidation, la meilleure résistance mécanique des remblais en colonnes est atteinte avec les colonnes drainées (TD avec 2.9 MPa) et à moitié drainée (MD avec 2,7 MPa). Ces conditions de consolidation du RPC se matérialisent par l'acquisition des propriétés hydrogéotechniques, mécaniques et microstructurales leur permettant une bonne stabilité mécanique à long terme. Le remblai drainé perd une fraction plus importante de son eau et devient par conséquent moins saturé, avec des teneurs en eau massique plus faibles. Sa matrice libère une fraction des vides anciennement occupés par l'eau interstitielle. Ces vides pourraient être colmatés par les hydrates. En plus du pourcentage solide des grains initiaux du RPC, il peut y avoir la formation de solides résultants de l'hydratation et/ou de cimentation. La structure finale du RPC drainé et sec posséderait par conséquent une résistance mécanique maximale.

## 6 CONCLUSIONS

À partir des résultats de l'étude des remblais en colonne, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

1. la quantité d'eau drainée par la colonne TD est le double celle obtenue pour la colonne MD. Ceci engendre un tassement du remblai de l'ordre de 5,5 % de la hauteur totale de la colonne et doit être comparé avec le tassement enregistré aux chantiers de la mine LVT qui serait en moyenne de l'ordre de 5 %.

2. La résistance mécanique maximale (UCS max) est atteinte par le remblai TD avec une valeur de 2,9 MPa à l'interface des deux séquences de remblayage. Il en résulte un effet très important de la combinaison de la configuration du drainage et du remblayage séquentiel sur la valeur de la résistance UCS.

3. Le remblai drainé ayant une résistance maximale de 2.7 à 2.9 MPa est caractérisé par une porosité totale importante (50%) et une surface spécifique relativement élevée (11.3 à 12.9 m<sup>2</sup>/g). La microstructure du remblai de la colonne TD est sensible à la variation de la hauteur de la colonne. Une nette différenciation est observée pour la porosité au mercure et la surface spécifique du remblai au niveau de la colonne TD : les fortes valeurs observées de la porosité totale et de la surface spécifique sont associées au bas des colonnes drainées avec un faible pourcentage des pores fins.

4.

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été financé en partie par la Fondation de l'UQAT, par l'Institut Robert Sauvé en Santé et sécurité du Travail (IRSST), une partie du CRSNG et une partie par le Fond Québécois pour la Recherche sur la Nature et les Technologies. Nous voulons également remercier les techniciens du laboratoire de l'URSTM-UQAT Nil Gaudet, Hugues Bordeleau et Franck Gagnon pour leur support durant la réalisation des essais. Enfin, les auteurs voudraient remercier tout particulièrement Bernard Dallaire, Jean Cayouette et Mathieu Belisle de la mine Louvicourt pour leur soutien logistique et matériel tout au long de ce projet.

## REFERENCES

- BELEM T., EL AATAR O., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA M., FALL M., YILMAZ E. 2006. Characterization of self-weight consolidated paste backfill. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Seminar on Paste and Thickened Tailings – *Paste'06*, 3-7 April 2006, Limerick, Ireland. R. Jewell, S. Lawson & Ph. Newman, pp. 333 – 345.
- BELEM T., EL AATAR O., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA M., YILMAZ E. 2007. Hydro-geotechnical and geochemical characterization of column consolidated cemented paste backfill. 59<sup>th</sup> *Canadian Geotechnical Conference, Minfill 2007*, 29 April- 2 Mai, Montréal, Qc, Canada.
- BELEM, T., BENZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B., 2000. Mechanical behaviour of cemented paste backfill, *Proceedings of 53th Canadian Geotechnical Conference: "Geotechnical Engineering at the dawn of the third millennium"*, 15-18 October 2000, Montréal, Vol. 1, pp. 373-380.
- BELEM, T., BENZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B., DAGENAIS, A.-M. 2002. Effects of settlement and drainage on strength development within mine paste backfill, in *Proceedings of Tailings and Mine Waste'02*, 27-30 January 2002, Fort Collins, Colorado, Balkema: Rotterdam: 139-48.
- BELEM, T., BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., 2001. The effect of microstructural evolution on the physical properties of paste backfill, in Proceedings of Tailings and Mine Waste'01, January 16-19, Fort Collins, Colorado, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 365-374.
- BELEM, T., BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., 2001. The effect of microstructural evolution on the physical properties of paste backfill, in *Proceedings of Tailings and Mine Waste'01*, January 16-19, Fort Collins, Colorado, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 365-374.
- BELEM, T., BENZAAZOUA, M. (2003) Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie I : De sa fabrication à sa mise en place sous terre. *Après-mines 2003*, 5-7 Février 2003, Nancy.
- BENZAAZOUA, M., BELEM, T., JOLETTE, D., 2000. Chemical stability investigation and its impact on the quality of cemented backfill *IRSST Rt No.R-260*, 172p.
- BENZAAZOUA, M., BELEM, T., BUSSIÈRE, B., OUELLET, S., 2002, Évolution des propriétés des remblais en pâte : principaux paramètres d'influence, Colloque contrôle de terrain, AMQ.
- BENZAAZOUA, M., FALL, M., BELEM, T., 2004. A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill, *ME*. 17(2): 141-152.
- BENZAAZOUA, M., BOIS, D., BELEM, T., GAUTHIER P, OUELLET S., FALL, M., ST-ONGE, J.-F. (2005). Remblais miniers: évolution des connaissances et de la pratique. 20<sup>e</sup> Colloque en contrôle de terrain de l'AMQ, 22-23 mars 2005, Val-d'Or, 21p.
- CAYOUCETTE, J., 2003. Optimization of the paste backfill plant at LVT mine, *CIM Bulletin*, 96(1075): 51-57.
- GOOD, R. J. and MIKHAIL, R. S.: 1981, The contact angle in mercury porosimetry, *Powder* 29,53-62.
- GODBOUT, J., BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., BELEM, T., BENZAAZOUA, M. 2004. Évolution des propriétés de rétention d'eau des remblais miniers cimentés en pâte durant le curage. *Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference and the 5th joint CGS-IAH Conference*, 24-27 October 2004, Quebec city, Session 4G, pp. 15-22.
- HASSANI, F, ARCHIBALD, J., 1998. Mine backfill, CD-ROM. Canadian institute of mine, metallurgy and petroleum.
- LANDRIAULT, D.A. and TENBERGEN, R. (1995) 'The present state of paste fill in Canadian underground mining'. *Proceedings of the 97th Annual General Meeting of CIM*. Halifax: CIM. 229-238.
- MITCHELL, R.J., OLSEN, R.S., SMITH, J.D., 1982. Model studies on cemented tailings used in mine backfill. *Canadian Geotechnical J*, 19 (1): 14-28.
- OUELLET, S., BUSSIÈRE, B., MBONIMPA, M., BENZAAZOUA, M., AUBERTIN, M. 2005. Reactivity and mineralogical evolution of an underground mine sulphidic cemented paste backfill. *Minerals Engineering* 19,5, 407-419.
- OUELLET, S., BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., AUBERTIN, M., BELEM, T., FALL, M. 2003. Sulphide reactivity within cemented paste backfill: oxygen consumption test results. *Proceedings of the 56th Annual Canadian Geotechnical Conference and 4th joint IAH-CNC/CGS Conference*, Winnipeg, September 28 – October 1, 2003.
- REVELL M.B., 2004. Paste – How strong is it. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Mining with Backfill*, September 2004, Beijing, The Nonferrous Metals Society of China, pp. 286-294.