

UTILISATION DU REMBLAI EN PATE COMME SUPPORT DE TERRAIN. PARTIE I : DE SA FABRICATION A SA MISE EN PLACE SOUS TERRE

BELEM Tikou¹, BENZAAZOUA Mostafa²

¹Département des sciences appliquées, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue ; 445, boul. de l'Université ; Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4, Canada. tikou.belem@uqat.ca

²Unité de recherche et de service en technologie minérale, Département des sciences appliquées, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue ; 445, boul. de l'Université ; Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4, Canada. mostafa.benzaazoua@uqat.ca

RESUME : Dans cette communication, on présente toutes les étapes importantes dans une opération de remblayage minier utilisant du remblai en pâte. Ce dernier est un mélange de résidus miniers, d'un liant hydraulique et d'eau servant pour le gâchage du ciment et le transport du remblai. Ces étapes concernent le design du remblayage avec le calcul de la résistance mécanique critique du remblai en pâte, la recette du mélange résidus-liant-eau, la fabrication de la pâte de remblai, son transport sous-terre à travers un réseau de pipelines et sa mise en place dans les vides souterrains. L'emphase a été mise sur le choix du liant en vue de l'optimisation de la recette de remblai afin de répondre aux critères de design, de sécurité et de coût des opérations minières. Ceci parce que sur les 20% représentant les coûts liés au remblayage, la part des liants est de 15%. De plus, l'accent a été mis sur l'importance du respect scrupuleux des caractéristiques du transport du remblai en pâte à travers le réseau de pipelines, notamment en ce qui concerne la consistance de la pâte de remblai (rhéologie).

MOTS-CLEFS : Résidus miniers ; Liant ; Recette de mélange ; Vide souterrain ; Consistance.

ABSTRACT : In this communication one presents all the significant stages during mine backfilling operation using paste backfill. Paste backfill is a mixture of mine tailings, hydraulic binder and mixing water. These stages relate to the backfilling design by the calculation of the critical mechanical strength of the hardened paste, tailings-binder-water mixture receipt, paste backfill preparation, its underground delivery through pipelines network and its setting in underground voids. Emphasis was put on the choice of binder type for the optimization of the paste mixture recipe in order to respond to the backfilling design, work safety and mining operations cost criteria. This is because on the 20% representative of the costs related to backfilling, 15% represent the binder costs. In addition, accent was put on the importance of the scrupulous respect of the characteristics of paste backfill transport through pipelines network, in particular with regard to the paste consistency (rheology).

KEY-WORDS : Mine tailings; Binder; Mixture recipe; Underground void; Consistency.

1. Introduction

Il y'a de cela vingt cinq (25) ans, les rejets des concentrateurs des usines de traitement des mines (communément appelés résidus miniers) étaient stockés dans des parcs dits à résidus aménagés à cet effet. Mais lorsque ces résidus sont sulfureux (contenant des minéraux comme la pyrite, la pyrrhotite, etc.), leur lessivage par l'eau des pluies génère de l'eau acide que l'on appelle *drainage minier acide* (AMD). Les effets dévastateurs de ces eaux acides sur la flore et la faune ne sont plus à démontrer. Ces eaux sont parfois chargées en métaux lourds et par conséquent, sont encore plus

polluantes pour l'environnement. Par conséquent, en raison des législations environnementales en vigueur, les compagnies minières ont tout intérêt à réduire les quantités de résidus stockés en surface. Ces résidus vont servir dans la fabrication du remblai en pâte qui est destiné au support de terrain. Ce matériau est un mélange des résidus miniers (souvent à forte teneur en sulfures, à granulométrie fine), d'eau de malaxage et d'une faible quantité de liant dit hydraulique. Le liant est obtenu par le mélange de différents types de ciment (ciment ordinaire, ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes, le laitier de hauts fourneaux etc.). Suivant les méthodes de minage employées dans l'exploitation des gisements souterrains profonds, le remblai cimenté en pâte devra agir comme support secondaire de terrain afin de maintenir la stabilité structurale de l'ensemble au cours des opérations de production (Landriault, 1995; Landriault and Lidkea, 1993; Landriault and Tenbergen, 1995). Par exemple, lorsque c'est la méthode de minage "chambres et piliers" qui est utilisée, les panneaux primaires sont exploités en premier tandis que les panneaux secondaires jouent le rôle de piliers primaires pour soutenir l'ensemble de la structure géologique. L'exploitation des panneaux secondaires requiert parfois la mise en place d'un support additionnel qui sera le remblai cimenté en pâte, malgré le fait que sa résistance mécanique soit beaucoup plus faible ($\sigma_c \approx 0,5$ à 4 MPa) que celle de la roche encaissante ($\sigma_c \approx 5$ à 240 MPa). En résumé, les principaux avantages liés à l'utilisation du remblai cimenté en pâte sont : (i) la réduction sensible des quantités de résidus miniers stockés en surface (entre 40% et 60%) et par conséquent, la limitation des problèmes de pollution de l'environnement due au drainage minier acide, (ii) l'augmentation des réserves exploitées, (iii) la réduction des coûts des opérations minières (Hassani and Bois, 1992) et (iv) la meilleure stabilité des épontes et par conséquent, le renforcement de la sécurité des travailleurs miniers (Mitchell, 1989a & b; Benzaazoua et al., 1999, 2001 & 2002; Bernier et al., 1999; Benzaazoua and Belem, 2000; Belem et al., 2000, 2001 & 2002). En définitive, l'utilisation du remblai cimenté en pâte contribue à la rentabilité croissante de la production minière tout en garantissant la sécurité maximale des mineurs. C'est la raison pour laquelle dans les vingt dernières années le remblai en pâte est devenu populaire dans les opérations des mines souterraines modernes en roche dure à travers le monde. Cependant, son utilisation adéquate requiert une bonne connaissance de ses propriétés mécanique et rhéologique.

Dans cette communication, on présentera de façon synthétique les principales étapes lors d'une opération de remblayage souterrain. Cela va du choix de la recette de mélange de la pâte de remblai, de la préparation du mélange en usine, de son transport et l'importance de la consistance de la pâte, jusqu'à sa mise en place dans les vides souterrains. Une attention sera accordée aux méthodes de design du remblayage en pâte utilisées à ce jour ainsi que les innovations et perspectives d'avenir. Les facteurs influençant les propriétés mécaniques du remblai en pâte juste après sa mise en place (drainage, poussée sur les barricades de retenue, tassement, etc.) seront succinctement décrits.

2. Fabrication du remblai en pâte

Contrairement au calcul du mortier et béton qui repose essentiellement sur le rapport eau/ciment (w/c), le calcul du mélange de remblai est basé sur le rapport eau/solide (w/s), le solide étant constitué des résidus et du liant hydraulique. Ceci est dû essentiellement à l'utilisation de très faibles quantités de liant comparativement à la quantité du "granulat" qui est dans cas représenté par les résidus. Dans toutes les mines souterraines utilisant du remblai en pâte, l'usine de remblai est toujours implantée en surface, à proximité de l'usine de traitement des minerais afin de faciliter la récupération en bout de chaîne des résidus après la flottation. La Figure 1 présente le schéma général typique de la procédure de fabrication du remblai en pâte dans l'usine de remblai.

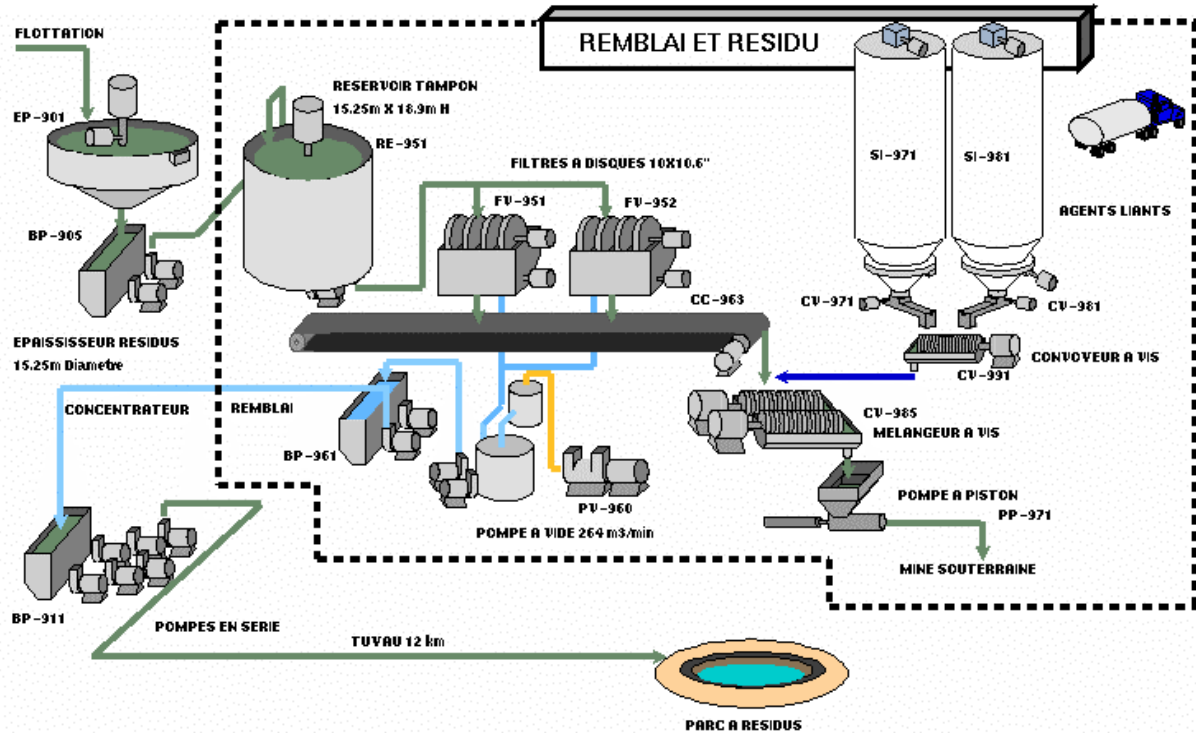


Figure 1. Schéma typique de la procédure complète de la fabrication du remblai en pâte à l'usine

La procédure classique de fabrication du remblai en pâte dans les usines de remblai est la suivante:

- "Épaississage" des résidus humides (ou pulpe) à l'aide d'épaississeurs afin de ramener leur pourcentage solide C_w à environ 55%,
- filtration des résidus à l'aide de filtres à disques (Figure 2a) ou de filtres presse afin de ramener le pourcentage solide C_w entre 70% et 82%,
- ajout du liant hydraulique dans une proportion comprise entre 3% et 7% de la masse totale de résidus secs,
- ajout de l'eau (eau de procédé de la mine ou eau fraîche) pour produire un affaissement (ou "slump") optimal compris entre 150 mm et 250 mm,
- malaxage du mélange ainsi formé, généralement dans un malaxeur à vis de grande puissance (en continue ou par "batch"). Le temps de malaxage est compris entre 45 secondes et une minute,
- distribution du remblai en pâte sous-terre à travers un réseau de trous de forage et de conduites soit par la gravité, soit à l'aide de pompe à piston semblable à celles à béton (Figure 2b), ou en combinant la gravité et les pompes à piston.



Figure 2. Composantes de l'usine de remblai en pâte : a) exemple de filtres à disque ; b) exemple de pompe à piston.

2.1. Design du remblai cimenté en pâte : détermination de sa résistance limite

Comme l'utilisation du remblai en pâte s'inscrit dans la méthode de minage, il va s'en dire que le remblai doit posséder certaines caractéristiques mécaniques. La résistance critique du remblai en pâte à atteindre dépendra de son utilisation sous-terre. Lorsque le remblai est destiné à supporter le toit d'un vide, on s'intéressera à sa rigidité et à sa cohésion mécanique, tandis que si la méthode de minage favorise l'exposition d'une des faces de la masse de remblai en pâte, on devra s'intéresser en premier lieu à sa résistance au cisaillement. Dans la pratique, c'est la résistance en compression uniaxiale (ou simple) σ_c ou UCS (uniaxial compressive strength) qui est utilisée (essais peu coûteux) à partir du moment où elle peut être corrélée avec les autres paramètres mécaniques tels que le module de Young E , la résistance à la traction et la cohésion c . Par conséquent, lorsque le remblai en pâte est destiné à supporter le toit, la valeur limite de UCS devrait être de l'ordre de 5 MPa, tandis que dans le cas d'une face qui serait exposée, UCS devrait être de l'ordre de 1 MPa. La résistance limite ou critique correspondant à l'auto-portance du remblai en pâte en place ayant une face exposée peut être déterminée soit à partir des méthodes de calcul de stabilité (Eq. 1) ou en utilisant des équations développées à partir d'essais sur de modèles physiques (e.g. centrifugeuse). Mitchell (1983), a proposé une équation développée à partir d'essais de modélisation physique à la centrifugeuse, permettant de relier la stabilité du vide remblayé à la résistance en compression UCS critique du remblai en pâte (Eq. 2).

Le facteur de sécurité F.S. contre une rupture planaire du remblai en pâte est donné par la relation:

$$F.S. = \frac{(c * L * B / \cos \psi) + W_{net} * \cos \psi \tan \phi}{(L * B * H_e \gamma - 2c * B * H_e) \sin \psi} \quad (1)$$

où c = cohésion du remblai (kPa); L = largeur du vide remblayé (m); B = profondeur du vide remblayé (m); H = hauteur totale de la face exposée (m); W_{net} = poids total du remblai en pâte (kN); ϕ = angle de frottement interne du remblai en pâte ($^\circ$); γ = poids volumique total du remblai en pâte (kN/m^3); ψ = angle du plan de rupture ($^\circ$); H_e = hauteur effective du bloc de glissement (m).

La résistance limite ou critique d'un vide remblayé par du remblai en pâte ayant une face exposée est donnée par la relation (Mitchell, 1983) :

$$UCS_{critique} = \sigma_{c_crit.} = \frac{\gamma * H}{1 + (H/L)} \quad (2)$$

où $UCS_{critique}$ = résistance limite (kPa) ; γ = poids volumique total du remblai (kN/m^3) ; H = hauteur de la face exposée (m) ; L = largeur du vide remblayé (m).

Pour le design du remblai en pâte, on introduit un certain facteur de sécurité F.S. (variant de 1 à 1,5), répondant aux exigences liées à la méthode de minage, dans l'équation 2 qui devient :

$$UCS_{design} = UCS_{critique} \times FS = \frac{\gamma * H}{1 + (H/L)} \times FS \quad (3)$$

La Figure 3 présente des courbes $UCS_{critique}$ et UCS_{design} (pour différentes valeurs de facteur de sécurité) *versus* la largeur (L) d'un vide de hauteur $H = 60$ m. Dans la pratique, c'est ce type d'abaque qui est utilisé pour le design du remblayage avec du remblai en pâte. Mais il existe d'autres alternatives qui sont les modélisations numérique et physique. La modélisation numérique à l'aide de codes de calcul 2D et/ou 3D permettra d'avoir un ordre de grandeur de la rigidité du remblai et de la résistance minimale requise pour éviter son affaissement ou sa compression due à la convergence des murs. La modélisation physique à l'aide d'une centrifugeuse peut être une alternative à la modélisation numérique mais son application est souvent limitée à de simples modèles de gravitation ne tenant pas compte de la tectonique et des contraintes horizontales.

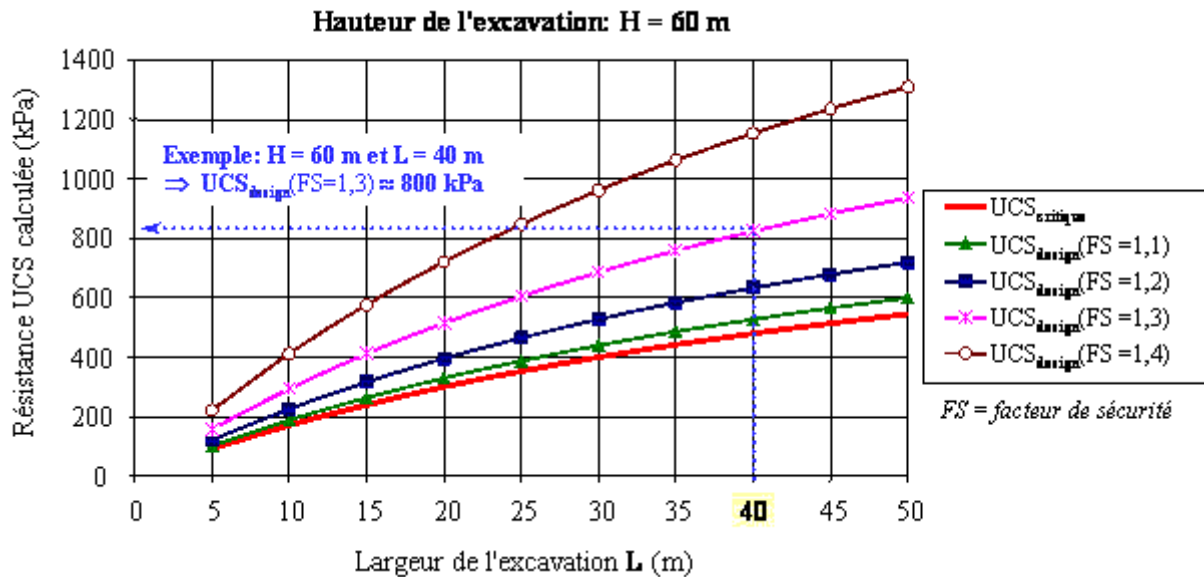


Figure 3. Exemple de courbes de variation de UCS (critique et design) en fonction de L pour une hauteur de 60 m

2.2. Recette de mélange de remblai en pâte

Une fois les exigences du design connues, il reste à concevoir une recette pour le mélange résidu-liant-eau que l'on peut appeler calcul du mélange de remblai en pâte. Une recette de mélange de remblai en pâte comprend donc les résidus (avec leur teneur en sulfures), le liant (mélange de deux ou plusieurs agents de cimentation) dans une proportion donnée (en pourcentage de la masse de résidus secs) et l'eau que l'on rajoute au mélange (quantité ajustée en fonction de la consistance désirée de la pâte). Il est à noter que le coût total du remblayage représente 2% à 20% du coût total des opérations dans une mine. Sachant que 75% du coût de remblayage revient uniquement à l'achat des liants (à raison de 1\$ / % de liant / tonne de remblai), il apparaît plus que primordial d'optimiser les recettes afin d'atteindre l'objectif de production d'un remblai en pâte performant et à moindre coût. L'optimisation d'une recette de mélange de remblai en pâte consiste à faire un choix judicieux du type de liant et de sa proportion, tout en respectant les contraintes liées à la distribution sous-terre du remblai en pâte, à savoir sa consistance (viscosité). Ce choix devra donc permettre de fabriquer un remblai en pâte capable de répondre aux caractéristiques mécanique (Benzaazoua et al., 1999 ; Benzaazoua et Belem, 2000, 2001; Belem et al., 2000) et rhéologique du design. Toutefois, la "durée de vie" du remblai dépendra de la composition minéralogique et de la granulométrie du résidu ainsi que de l'évolution géochimique du remblai (cf. Partie II, Benzaazoua et al. 2003, même conférence).

2.3. Malaxage de la pâte de remblai

Pour chaque recette choisie, le mélange résidu-liant-eau est malaxé dans un malaxeur à double vis de haute puissance dans l'usine de remblai (Figure 4a) ou dans un malaxeur à béton dans le cas du laboratoire (Figure 4b). La durée moyenne du temps de malaxage est de l'ordre 45 minutes. L'eau utilisée pouvant être soit l'eau de procédé de la mine ou une eau fraîche quelconque. Il est à noter que des prélèvements de pâte sont effectués régulièrement afin de mesurer l'affaissement du remblai qui indiquera à quel moment l'on a atteint la consistance souhaitée pour le pompage du remblai sous-terre. Il a été observé que le temps de malaxage affectait grandement la fluidité de la pâte à pomper, mais très peu le développement ultérieur de la résistance du remblai.

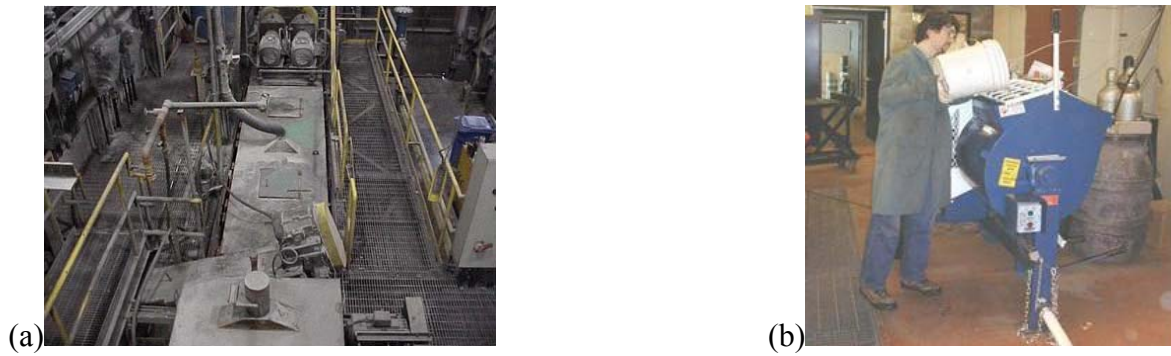


Figure 4. Différents types de malaxeur pour le remblai en pâte : a) malaxeur à double vis ; b) malaxeur à béton

3. Transport et distribution du remblai en pâte sous-terre

Après le malaxage, la pâte de remblai obtenue peut être acheminée sous-terre via des trous de forage inclinés au maximum de 30° et/ou des conduites (pipelines). Pour cette raison, le choix de l'emplacement des installations de l'usine de remblai (Figure 5a) est crucial afin de favoriser l'écoulement de la pâte jusqu'aux vides souterrains. Ce transport pourra se faire soit simplement par gravité (système le moins coûteux) ou couplé avec des pompes à piston. De ce fait, la "pompabilité" de la pâte de remblai cimenté dépendra de ses propriétés rhéologiques (viscosité et seuil de cisaillement ou *yield stress*), du type de pompe utilisé ainsi que de la configuration du système de distribution. Il existe au moins trois configurations possibles pour le transport de la pâte de remblai de la surface au sous-terre: le système par gravité, le système par pompage et gravité, le système par gravité et pompage (Figure 5b).

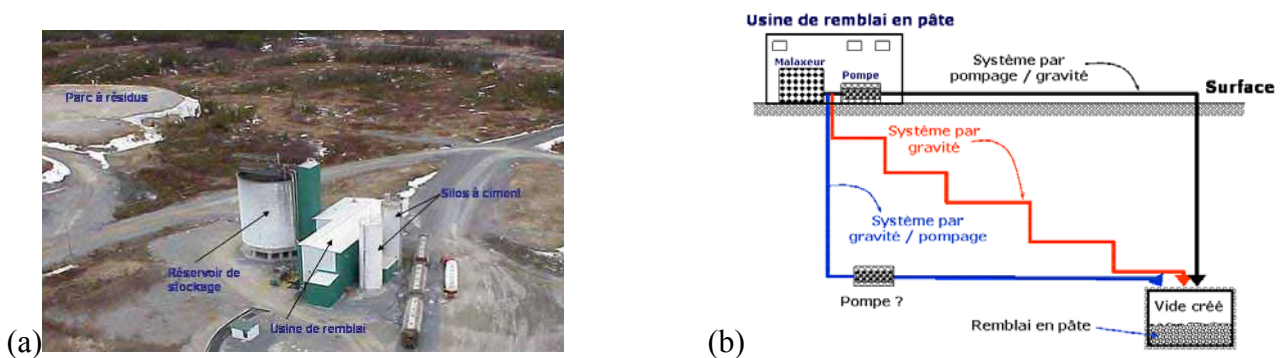


Figure 5. Remblayage souterrain: a) usine de remblai; b) différents systèmes de distribution sous-terre.

3.1. Rhéologie des pâtes de remblai cimenté

L'écoulement d'un mélange fluide-solides visqueux comme le remblai en pâte (fluide non Newtonien) à travers les canalisations du réseau de distribution est entièrement gouverné par les propriétés rhéologiques du remblai en question (viscosité). La viscosité de la pâte de remblai est la mesure du frottement entre ses couches adjacentes lors de son écoulement dans un tuyau. Pour que la pâte de remblai cimenté puisse être acheminée dans les vides souterrains, soit par la gravité ou à l'aide de puissantes pompes à piston, celle-ci doit avoir une certaine viscosité. Pour les fluides non-Newtoniens, i) la viscosité varie avec la variation du taux d'écoulement, ii) leur seuil de cisaillement (τ_0) est supérieur à zéro avant le début de l'écoulement ($\tau_0 > 0$). Ce qui veut dire que l'écoulement ne sera initié que sous une certaine pression initiale supérieure au seuil de cisaillement (Figure 6).

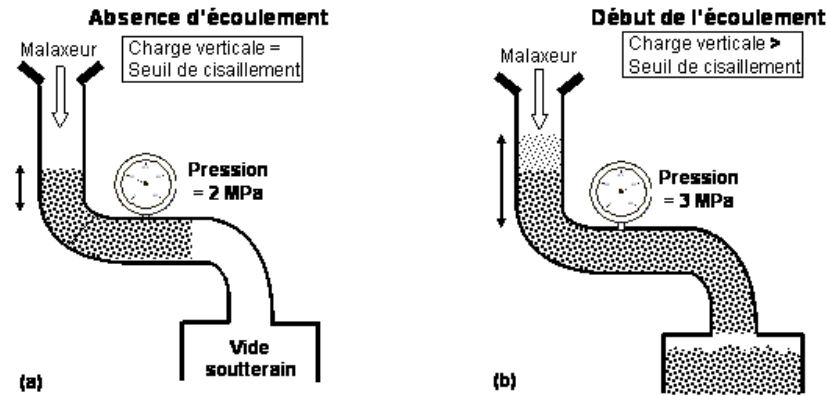


Figure 6. Illustration du seuil d'écoulement du remblai en pâte (adaptée de Revell, 2000).

Les travaux de recherche sur la rhéologie des pâtes de remblai (cf. synthèse dans Li et Moerman, 2001) et l'expérience acquise jusqu'ici semblent indiquer que le remblai en pâte pourrait être considéré comme un fluide plastique de Bingham, c'est-à-dire que sa viscosité plastique η reste constante avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement une fois que le seuil de cisaillement est dépassé ($\tau_0 > 0$). Pour les fluides de Bingham, la relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et le taux de déformation ou de cisaillement est donnée par l'équation (4) :

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{dV}{dr} \right) = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

avec τ_0 (Pa) le seuil de cisaillement, $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement, η (Pa.s) la viscosité plastique du fluide, (dV/dr) la vitesse angulaire du fluide au point r (m) le long du rayon R du tuyau dans lequel s'écoule le fluide avec une vitesse linéaire V (m/s).

La contrainte de cisaillement ou la perte de charge de la pâte de remblai dépend du diamètre intérieur du tuyau (D), de la pression développée (P) et de la viscosité plastique du remblai (η). La perte de charge au cours de l'écoulement de la pâte est donnée par la relation :

$$\tau \approx \frac{PD}{4L} = \eta \frac{8V}{D} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\tau_0 \frac{4L}{PD} \right) + \frac{1}{3} \left(\tau_0 \frac{4L}{PD} \right)^4 \right)^{-1} \quad (5)$$

où τ_0 = seuil de cisaillement; η (Pa.s) = viscosité plastique de la pâte; P = pression de la pompe (Pa); D = diamètre du tuyau (m); L = longueur du tuyau (m); V = vitesse d'écoulement (m/s).

Le diamètre efficace (D) des tuyaux pour le transport du remblai en pâte est compris entre 100 mm et 200 mm (4" et 8"). La vitesse d'écoulement des pâtes varie entre 0,1 m/s et 1 m/s (vitesse plus lente que celle d'une pulpe qui varie entre 1 et 5 m/s). La distance pratique de pompage de la pâte peut atteindre 1000 m longitudinalement (L_H) et illimitée verticalement (L_V).

3.2. Méthode standard de mesure de la consistance de la pâte de remblai

En pratique, il n'est pas aisé d'accéder aux vraies propriétés rhéologiques des pâtes à cause de la complexité des dispositifs expérimentaux. Ceci rend difficile, voire impossible, la détermination ou la prédiction de la viscosité de la pâte qui dépend de plusieurs facteurs. C'est donc l'essai au cône d'affaissement ("slump test") standard (employé pour les bétons) qui est utilisé pour déterminer la consistance de la pâte de remblai (Figure 7). Selon Landriault et al. (1997), l'affaissement idéal des remblais en pâte doit être compris entre 150 mm (6") et 250 mm (10") pour faciliter l'écoulement par pompage de la pâte de remblai cimenté sous-terre.



Figure 7. Consistance de la pâte par mesure d'affaissement : a) cône; b) principe de mesure de l'affaissement

3.3. Modifications de la méthode standard de mesure de l'affaissement de la pâte de remblai

Des travaux récents de Ferraris et de Larrard (1998) sur la rhéologie des pâtes ont montré que l'affaissement ou le *slump* (S) était seulement relié au seuil de cisaillement (τ_0) et non à la viscosité elle-même (η). Une meilleure compréhension de la rhéologie des pâtes de remblai favoriserait un bon contrôle de leur transport dans les pipelines. Quoi de plus intéressant que de pouvoir donc relier la vraie viscosité de la pâte à son affaissement mesuré, puisque que ce dernier peut changer entre la surface (usine de remblai) et le sous-terre (vide) après le transport du remblai (différence de 25 mm à 50 mm). Les tendances actuelles s'orientent vers l'utilisation du cône d'écoulement ou «flow cone» (Figure 8a) ou de la table vibrante d'écoulement ou «flow table» (Figure 8b) pour la mesure de l'affaissement. Mais sur le plan de la rhéologie, ces deux nouvelles techniques de mesure de la consistance de la pâte restent très proches de la méthode standard du cône d'affaissement.



Figure 8. Test d'affaissement modifié : a) cône d'écoulement (*flow cone*) ; b) table d'écoulement (*flow table*).

Mais le plus important progrès réalisé dans ce sens a été l'œuvre de Ferraris et de Larrard (1998) qui ont proposé un test d'affaissement au cône modifié basé sur la mesure du taux d'affaissement de la pâte (\dot{S}), et donc du temps d'affaissement (T) ou de sa vitesse. Le principe de mesure est illustré par la Figure 9.

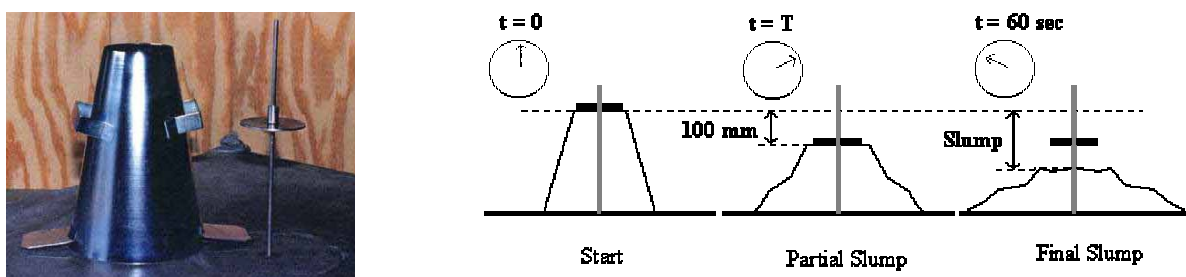


Figure 9. Test d'affaissement au cône modifié permettant de mesurer la vitesse de chute (Ferraris et de Larrard, 1998)

Ces auteurs ont essayé de caractériser la viscosité plastique (η) des pâtes en se basant sur le taux d'affaissement moyen au cours de l'essai d'affaissement au cône. On mesure le temps (T) nécessaire pour que la pâte s'affaisse jusqu'à une hauteur intermédiaire (estimée à 100 mm) comprise entre le début et l'affaissement final (S). Ferraris et de Larrard (1998) ont d'abord proposé un modèle empirique de prédiction du seuil de cisaillement de la pâte (τ_0) modifié à partir de celui proposé par Hu (1995) sur la base d'essais au rhéomètre et de résultats de modélisations numériques :

$$\tau_0 = \frac{\rho(300 - S)}{347} + 212 \quad (6)$$

où ρ = la masse volumique de la pâte fraîche (kg/m^3), S = affaissement final de la pâte (mm).

Ferraris et de Larrard (1998) ont également proposé une relation semi-empirique permettant de relier le temps d'affaissement de la pâte (T) à la viscosité plastique η , valable seulement pour des affaissements inférieurs à 200 mm:

$$\eta = 25 \times 10^{-3} \rho \times T \quad (7)$$

où η = viscosité plastique (Pa.s), ρ = masse volumique de la pâte fraîche (kg/m^3), T = temps d'affaissement partiel (s), S = affaissement final de la pâte (mm).

D'autres auteurs (Nguyen et Boger, 1985) ont proposé d'adapter l'essai au scissomètre pour la mesure du seuil de cisaillement (τ_0) de la pâte de remblai. Cet essai permet d'obtenir une courbe du torque *versus* la déformation angulaire de la pâte dont le pic correspond au torque maximal (T_m). Connaissant ces paramètres, le seuil de cisaillement peut alors être calculé par la relation:

$$\tau_0 = \frac{T_m}{\frac{\pi}{2} D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)} \quad (8)$$

où τ_0 = seuil de cisaillement calculé (Pa), T_m = torque maximal observé au pic (N.m), D = diamètre du moulinet (cm), H = hauteur du moulinet (cm).

3.4. Transport de la pâte de remblai cimenté

Une fois que l'on obtient l'affaissement désiré de la pâte de remblai, celle-ci est envoyée sous terre à travers un réseau de pipelines conçus pour résister aux fortes pressions générées par l'écoulement de la pâte visqueuse (Figure 10). Un bon design de ce type de système passera nécessairement par la connaissance des paramètres de l'écoulement laminaire de la pâte tels que le débit, les gradients de pression (ΔP) et les pertes de charge ($\Delta P/L$) dues au frottement à la paroi des tuyaux.

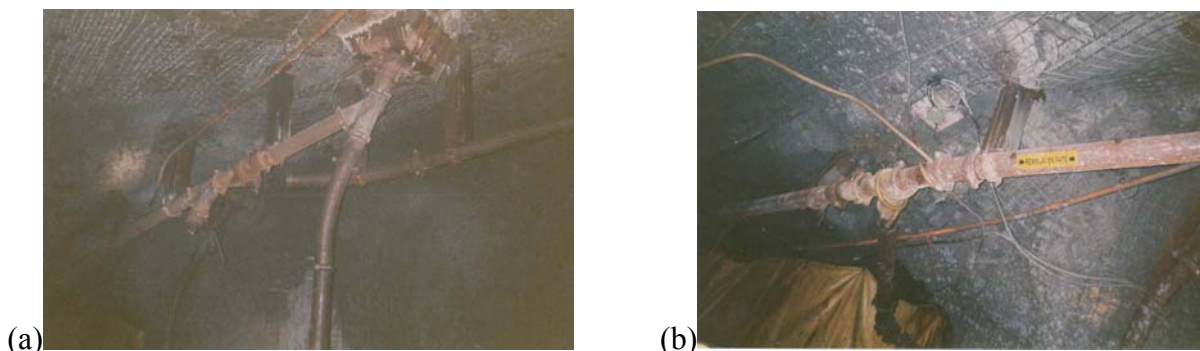


Figure 10. Réseau de pipelines souterrains : a) tuyaux en dessous de l'usine; b) tuyaux au toit de la galerie.

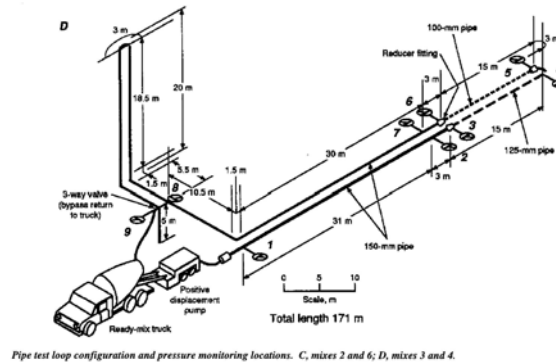


Figure 11. Exemple de dispositif de test d'écoulement en boucle (*flow-loop test*) (d'après Clark et al., 1995).

En pratique on a recours aux essais en boucle ("flow-loop tests") pour déterminer les pertes de charge ($\Delta P/L$) dans la tuyauterie (Figure 11). Le calcul des pertes de charge ($\Delta P/L$) va alors permettre de déterminer les pressions de fonctionnement du système de distribution: spécifications de la pompe (s'il y a lieu), choix des diamètres des tuyaux (D), choix du débit d'écoulement (Q) et de la vitesse d'écoulement (V). Pour un fluide plastique de Bingham s'écoulant en régime laminaire (cas de la pâte de remblai), la perte de charge par unité de longueur de tuyau ($\Delta P/L$) est donnée par:

$$\frac{\Delta P}{L} \text{ (Pa / m)} = \frac{32\eta_B V}{D^2 \left(1 - \frac{4\tau_w}{3\tau_0} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_w}{\tau_0} \right)^4 \right)} \quad (9)$$

où η_B = viscosité plastique de Bingham, τ_0 = seuil de cisaillement, τ_w = résistance au cisaillement de la pâte contre la paroi du tuyau ($\tau_w \approx P.D/4L$), D = diamètre du tuyau, P = pression de la pompe.

L'utilisation des modèles rhéologiques (e.g. Eq. 9) requiert la connaissance *a priori* de la viscosité plastique de la pâte (η) qui est très difficile à prédire car elle dépend de plusieurs facteurs. C'est pourquoi en pratique on utilise plutôt l'affaissement S (cf sections 3.2 et 3.3) comme mesure de la consistance de la pâte. Les diamètres de tuyau souvent utilisés varient entre 100 mm (4") et 200 mm (8"). Par exemple, un remblai en pâte d'un affaissement de 180 mm (7") peut être transporté par gravité à un débit de 100 tonne/h dans un système dont le diamètre des trous et/ou tuyaux est de 150 mm (6"). Un des aspects les plus importants lors du transport de la pâte de remblai sous-terre est sans conteste la détermination du "cône d'influence", c'est-à-dire, les distances horizontales maximales d'écoulement de la pâte ($L_{H(\max)}$). Le calcul de ces distances est basé à la fois sur le poids volumique de la pâte de remblai (γ) et la pression au coude des tuyaux après la chute libre (P_{coude}):

$$L_{H(\max)} \text{ (m)} = \frac{P_{\text{coude}}}{\Delta P/L} = \frac{H(\gamma - \Delta P/L)}{\Delta P/L} \quad (10)$$

où H = hauteur maximale de chute libre de la pâte de remblai, $\Delta P/L$ = perte de charge dans le tuyau.

3.5. Mise en place du remblai cimenté en pâte

Une fois que tous les paramètres du transport ont été respectés, la pâte de remblai peut être acheminée jusqu'aux vides souterrains en fonction des besoins de la production de la mine. La Figure 12a montre un vide souterrain en cours de remblayage avec la pâte de remblai, tandis que la Figure 12b présente un schéma général du même vide avec toutes ses composantes (remblai, barricade, massif rocheux, vides adjacents déjà remblayés).

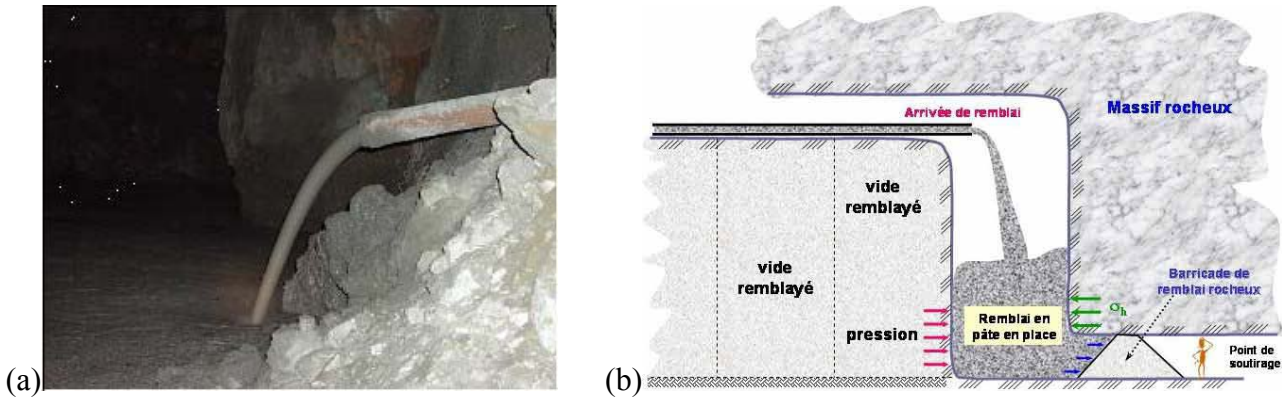


Figure 12. Mise en place du remblai: a) vide en cours de remblayage; b) schéma des composantes d'un vide remblayé.

Après la mise en place de la pâte de remblai, plusieurs facteurs macroscopiques (en opposition aux phénomènes d'hydratation) vont influencer le développement de la résistance mécanique et la stabilité du vide remblayé. Parmi ces facteurs on peut dénombrer entre autre, le drainage naturel de l'excédent d'eau de la pâte (un système de drains artificiels pourrait à cela), le tassement par gravité de la masse de remblai (consolidation), les dimensions du vide, les pressions au bas du vide, la pression sur la barricade, la convergence des murs sur le remblai et enfin les interactions entre le remblai et le massif rocheux encaissant. Le drainage et le tassement auront pour conséquence de favoriser le développement d'une meilleure résistance mécanique du remblai en pâte (Belem et al., 2000, 2001). Concernant les dimensions du vide, plus elles sont petites, plus la masse de remblai en pâte est stable (confinement exercé par les murs). Les pressions au bas du vide et sur les barricades auront par contre un effet néfaste sur la stabilité du vide remblayé lorsqu'elles sont trop élevées. En ce qui concerne les interactions à l'interface remblai-roche, suivant la nature du contact entre ces deux différents matériaux il pourrait se développer un effet d'arche pouvant être accompagné d'un cisaillement à l'interface qui pourrait menacer l'intégrité du vide remblayé (Aubertin et al., 2003).

4. Conclusion

Dans cet article synthétique, il a été présenté toutes les étapes importantes liées à l'utilisation du remblai cimenté en pâte dans les opérations des mines souterraines en roche dure à travers le monde. Les étapes de remblayage utilisant du remblai en pâte vont de la conception de l'usine de remblai, de la détermination de la résistance opérationnelle du remblai sous-terre, du choix de la recette de mélange de la pâte de remblai, de la préparation du mélange, de la mesure de la consistance de la pâte, de son transport à travers un réseau de pipelines et enfin de sa mise en place finale dans les vides souterrains. Au niveau de la conception de l'usine de remblai, l'accent a été mis sur l'importance du choix de son emplacement en surface. Après avoir calculé la résistance opérationnelle du remblai, l'importance capitale (aspects économique et de sécurité) du choix de la recette de mélange a été soulignée. L'importance des paramètres rhéologiques de la pâte lors de son transport à travers le réseau de pipelines est capitale. Enfin, il ne faut pas négliger tous les facteurs pouvant influencer le développement de la résistance mécanique du remblai en pâte, une fois en place sous-terre, a été mentionnée (drainage, tassement, taille du vide, etc.). Les facteurs pouvant menacer l'intégrité d'un vide remblayé (pressions au bas du vide remblayé et sur les barricades, interactions à l'interface remblai-roche, effet d'arche) ont été aussi succinctement décrits. La partie II de cet article (Benzaazoua et al., 2003, même conférence) fait une synthèse de l'évolution des propriétés des remblais en pâte quelques temps après leur mise en place dans les vides souterrains.

5. Bibliographie référencée

- Aubertin M., Li L., Arnoldi S., Belem T., Bussière B., Benzaazoua M., Simon R. (2003). Interaction between backfill and rock mass in narrow stopes. *SoilRock 2003*, MIT, USA (à paraître).
- Belem T., Benzaazoua, M., Bussière B., Dagenais A.-M. (2002). Effects of settlement and drainage on strength development within mine paste backfill. *Tailings and Mine Waste'02*, 27-30 January 2002, Fort Collins, Colorado, Balkema : Rotterdam, pp. 139-148.
- 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., Bussière B. (2000). Mechanical behaviour of cemented paste backfill. In *Proceedings of the Canadian Geotechnical Society Conference "Geotechnical Engineering at the dawn of the third millennium"*, 15-18 oct. 2000, Montréal, 1: 373-380.
- Benzaazoua, M., Belem T., Ouellet S., Fall M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement à court, à moyen et à long terme. *Symp. int. Après-mines*, 5-7 février, Nancy, France (cette conférence).
- Benzaazoua M., Belem T., Bussière B., Ouellet S. (2002). Évolution des propriétés des remblais en pâte: principaux paramètres d'influence. *17^e Coll. AMQ; 19-20 mars, Val-d'Or, Canada*. 10p.
- Benzaazoua, M., Belem, T. (2000). Optimization of sulfide-rich paste backfill mixtures for increasing long-term strength and stability. In *Proceedings of the 5th Conference on Clean Technology for Mining Industry*. M. Sanchez, S. Castro and F. Vergara (eds.), Santiago, Chile, II: 947-957.
- Benzaazoua M., Belem T., Jolette D. (1999). Investigation de la stabilité chimique et de son impact sur la qualité des remblais miniers cimentés. *Rapport d'activité de recherche IRSST*, 152p. + 100p. annexes.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., Verburg, R. (1999). Cementitious backfill with high sulfur content: Physical, chemical and mineralogical characterization. *Cem. & Concr. Res.*, 29: 719-725.
- Bernier, R.L., Li, M.G., Moerman, A. (1999). Effects of tailings and binder geochemistry on the physical strength of paste backfill. *Sudbury'99, Mining and the environment II*. N. Goldsack, P. Belzile, Yearwood and G. Hall (eds). 3: 1113-1122.
- Clark C.C., Vickery J.D., Backer R.R. (1993). Transport of total tailings paste backfill: results of full-scale pipe test loop. Pumping tests. *Report of investigation*, RI 9573, USBM, 37p.
- Ferraris, C.F., de Larrard, F. (1998). Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, Vol. 20, 2: 241-247.
- Hassani, F.P. and Bois, D. (1992). Economic and technical feasibility for backfill design in Quebec underground mines. Final report 1/2, Canada-Quebec Mineral Development Agreement, Research and Development in Quebec Mines. *Contract No. EADM 1989-1992*, File No. 71226002.
- Hu, C. (1995) "Rhéologie des bétons fluides," *Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, OA 16, 203 p., Paris, France
- Landriault, D.A. (1995). Paste backfill mix design for Canadian underground hard rock mining. In *Proc. 97th Ann. C.I.M. Rock Mech. and Strata Control Session*, Halifax, Nova Scotia, May 14-18.
- Landriault, D.A., Lidkea, W. (1993). Paste fill and high density slurry fill. In *Proceedings of the International Congress on Mine Design*, Queens University, Kingston, Ontario, Canada, August.
- Landriault, D.A., Tenbergen, R. (1995). The present state of paste fill in Canadian underground mining. In *Proc. 97th Ann. CIM Rock Mech. and Strata Control Session*, Halifax, Nova Scotia, May 14-18.
- Li, M., Moerman A. (2002). Perspectives on the scientific and engineering principles underlying flow of mineral pastes. *Proc. 34th Ann. Meet. of CMP, Ottawa, Canada*. Paper No. 35, pp. 573-595.
- Mitchell R.J. (1983). *Earth structures engineering*. London, Allen & Unwin. Chapter 6.
- Nguyen, Q.C., Boger, D.V. (1985). Direct yield Stress Measurement with the Vane method. *Journal of Rheology*, 29 (3) : 335 - 947.
- Revell, M. (2000). Cannington backfill taking the pig out of paste. *Paste Technology Seminar*, April 2000, Perth, Australia : 1-12.