

**Investigation de la stabilité chimique
et son impact sur la qualité
des remblais miniers cimentés**

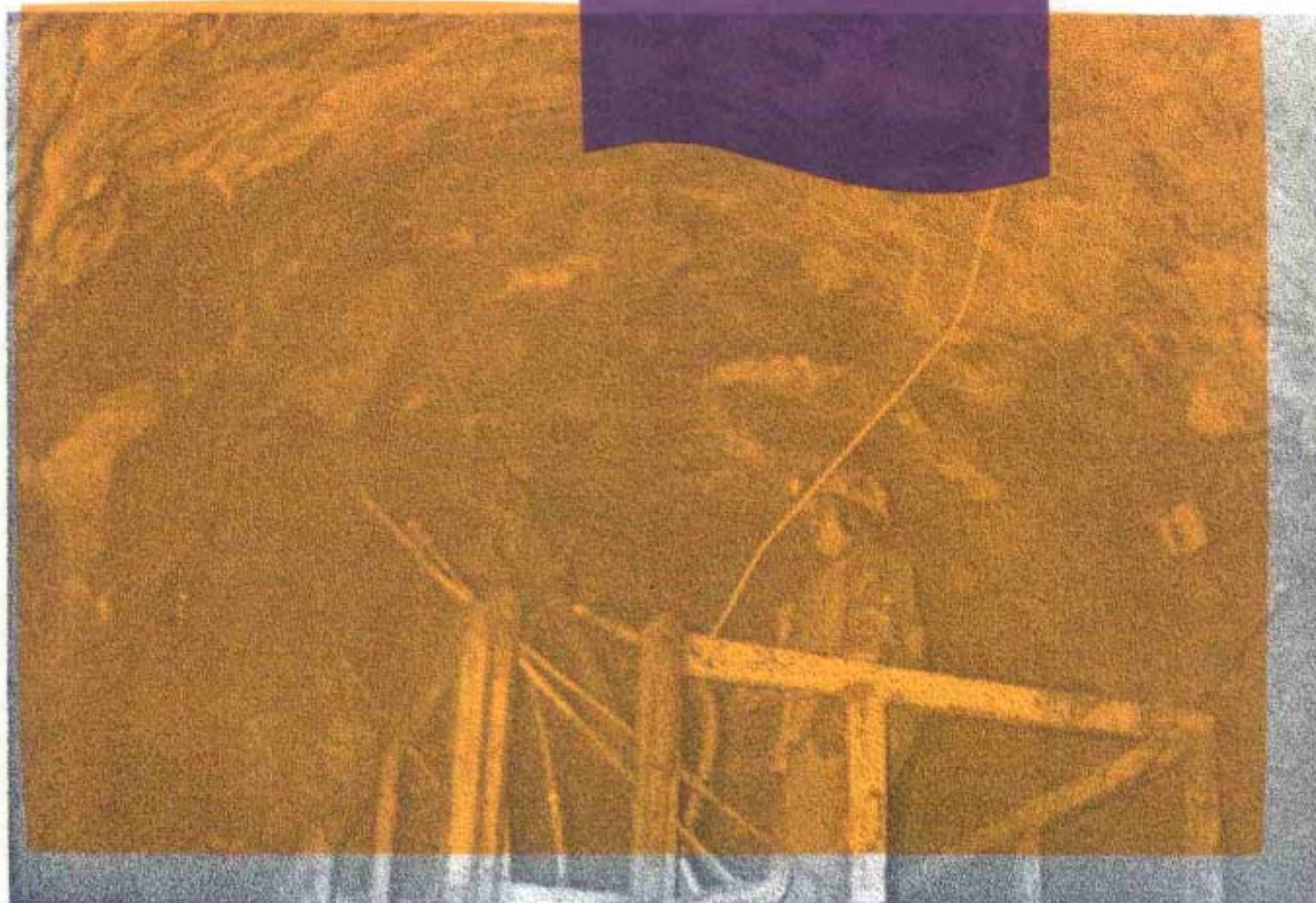


**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Mostafa Benzaazoua
Tikou Belem
Darcy Jollette

Novembre 2000 RR-260

RÉSUMÉ



La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

Investigation de la stabilité chimique et son impact sur la qualité des remblais miniers cimentés

Mostafa Benzaazoua, Tikou Belem et Darcy Jollette
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

ÉTUDES ET RECHERCHES

RÉSUMÉ

 Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible gratuitement
en version PDF
sur le site internet de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

Sommaire

L'utilisation du remblai en pâte comme support de terrain est une pratique courante dans de nombreuses mines souterraines à travers le monde et particulièrement au Québec. Ce remblai en pâte est un mélange de résidus miniers, le plus souvent sulfureux, et de liants hydrauliques tels que le ciment Portland, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, etc. Des travaux récents ont mis en évidence la possibilité de la perte de résistance mécanique du remblai au cours du temps causée par l'altération chimique. L'objectif de cette activité de recherche est de caractériser les paramètres contrôlant le choix des agents de cimentation (liants hydrauliques) et leur proportion dans le remblai en pâte. Ainsi, à partir de trois résidus provenant de trois mines différentes du Nord-ouest québécois et de l'Ontario, 33 recettes de mélange ont été créées avec quatre types de liant hydraulique à trois proportions différentes (3, 4, 5 et 6 % de la masse totale de résidu sec). Les teneurs en soufre des trois résidus sont de 5%, 16% et 32%. Ces éprouvettes ont été curées à 14, 28, 56 et 91 jours dans une chambre humide. À chacune de ces quatre durées de cure, les échantillons ont été soumis à des essais de caractérisation (i) chimique et géochimique, (ii) physique, (iii) microstructurale et (iv) mécanique.

Cette étude a permis de mieux cerner l'influence de la composition chimique des différentes phases en présence dans le remblai cimenté en pâte (l'eau de gâchage, le résidu et le liant) ainsi que leur proportion sur les propriétés chimiques, physiques et mécaniques du remblai en pâte. L'ensemble des résultats obtenus a permis d'optimiser les recettes de liant pour la fabrication du remblai en pâte en prenant en compte l'aspect économique et surtout la chimie du résidu minier et de l'eau de gâchage. Ces recettes optimisées visent à améliorer la qualité du remblai, en le préservant de la lixiviation et de la chute de la résistance au cours du temps, en vue de son utilisation sécuritaire.

La caractérisation géochimique a montré l'absence d'un processus d'altération chimique (stabilité chimique) pouvant conduire à une chute de la résistance mécanique du remblai en pâte, attribuable vraisemblablement à un bon conditionnement des éprouvettes dans la chambre d'humidité. Cependant, la chimie des liants, des résidus et de la solution utilisée pour le gâchage influence grandement la qualité de l'hydratation à l'origine de la résistance mécanique dans les remblais. Par ailleurs, les caractérisations physique et microstructurale ont montré que les trois types de remblais étudiés, à savoir LRD, LVT et HML (sauf avec le liant CL) avaient une très faible porosité libre (faible capacité de drainage). La caractérisation mécanique a montré que la résistance mécanique dépendait beaucoup du type de liant mais surtout de la teneur initiale en soufre du résidu utilisé ainsi que la chimie de la solution résiduelle qui sert au gâchage du liant.

Mots clés : Résidu minier, Liant hydraulique, Remblai en pâte, Propriétés géotechniques, Comportement mécanique, Compression uniaxiale, Compression triaxiale, Altération chimique, Analyse chimique, Analyse statistique.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX	iii
1. INTRODUCTION	1
2. OBJECTIFS DU PROJET.....	1
3. DESCRIPTION SOMMAIRE DU TRAVAIL RÉALISÉ	1
4. MATÉRIEL ET MÉTHODES	2
4.1 Méthodes de caractérisation chimique	2
4.2 Méthodes de caractérisation de la microstructure	3
4.3 Méthodes de caractérisation physique et géotechnique.....	3
4.4 Méthodes de caractérisation mécanique.....	4
4.5 Échantillons de résidu et de ciment.....	4
4.6 Mélanges	6
5. RÉSULTATS	7
5.1 Étude géotechnique	7
5.2 Étude de la microstructure et de la texture	7
5.3 Étude de la géochimie en solution.....	9
5.4 Étude du comportement mécanique	10
5.5 Analyse statistique	13
6. CONCLUSIONS	13
7. ÉBAUCHE D'UN OUTIL EXPERT	14
8. APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS DU PROJET	15
9. RETOMBÉES	15

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Organigramme de la démarche suivie pour cette étude	2
Figure 2.	Distribution de la taille des grains des trois résidus étudiés	6
Figure 3.	Images MEB du remblai LRD à fort grossissement : liant CP à 3% wt et à 6% wt	8
Figure 4.	Image MEB d'un pore tapissé de gypse secondaire non expansif (remblai Louvivourt).....	8
Figure 5.	Influence du % de soufre du résidu sur la résistance UCS obtenue avec les liants cp et FA.....	11
Figure 6.	Influence du % de soufre du résidu sur la résistance UCS obtenue avec les liants CL et SL.....	12
Figure 7.	Organigramme de l'ébauche de l'outil expert.....	14

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractéristiques chimiques des trois résidus étudiés et des ciments utilisés.....	5
Tableau 2.	Caractéristiques physiques des trois résidus étudiés.....	6
Tableau 3.	Composition chimique des eaux de gâchage des trois remblais fabriqués.....	6
Tableau 4.	Recettes de mélange utilisées pour les trois résidus LRD, LVT et HML	7
Tableau 5.	Résistance ucs des remblais LRD, LVT et HML en fonction de la durée de cure.....	10
Tableau 6.	Paramètres mécaniques des recettes optimales des remblais LRD, LVT et HML.....	13

1. Introduction

L'utilisation du remblai dans les exploitations minières souterraines est de plus en plus une pratique courante pour de nombreuses mines à travers le monde, en particulier au Québec. Les remblais visent à constituer un élément structural favorisant la stabilité des ouvertures souterraines tout en permettant d'enfouir des tonnages considérables de résidus à fort potentiel de pollution (réduction du stockage des résidus miniers généralement en surface). Le remblai en pâte est un mélange de résidus miniers et de liants hydrauliques (ciment Portland, cendres volantes, laitier de haut fourneau, etc.). Le rôle des liants hydrauliques est de conférer une certaine résistance au remblai cimenté en pâte. Des travaux antérieurs ont montré que les propriétés mécaniques et rhéologiques du remblai cimenté en pâte dépendaient des paramètres physiques, chimiques et minéralogiques du résidu minier ainsi que du type de liant utilisé et sa proportion. D'autres études (Regourd 1980; Mielenz *et al.*, 1992; Divet 1996; Benzaazoua 1996; Ouellet *et al.* 1998; Benzaazoua *et al.* 1999; Bernier *et al.* 1999) ont mis en évidence la possibilité de chute de la résistance mécanique du remblai au cours du temps due à l'altération chimique lorsque le milieu saturé est acide et agressif (présence de sulfates et génération d'acidité). La cohésion du matériau composite et son degré de saturation sont des facteurs déterminants dans la problématique décrite ci-dessus, et elle dépend directement de la qualité de la phase liante.

De ce fait, lors de toute étude de faisabilité et dans toute opération de remblayage de chantiers miniers devant assurer la meilleure sécurité possible des travailleurs, les défis à relever sont d'utiliser du remblai cimenté capable (i) d'assurer une bonne stabilité des excavations souterraines, (ii) de prévenir le potentiel de liquéfaction et (iii) de prévenir le potentiel de chute de la résistance mécanique dû à l'altération chimique. En effet, la liquéfaction d'une colonne de remblai peut entraîner une rupture brutale des ouvrages de retenue (barricades à remblai) et l'ensevelissement des galeries d'accès. Dans une telle éventualité, la vie des mineurs pourrait être menacée. D'autre part, la perte de résistance (ou de cohésion) du remblai à long terme peut entraîner un effondrement de la masse de remblai, menaçant ainsi la sécurité des travailleurs miniers sans compter les éventuels nombreux dégâts matériels.

2. Objectifs du projet

Le projet consiste à l'étude des aspects chimiques et géotechniques de différents types de mélanges de remblais cimentés contenant des sulfures (différents résidus et différents liants à différentes proportions) en relation avec leur comportement mécanique. Il s'agira donc de caractériser (i) les paramètres contrôlant le choix des agents de cimentation (liants hydrauliques) et leur proportion dans le remblai en pâte, (ii) la stabilité chimique du remblai cimenté par le biais de l'étude de son altérabilité chimique, (iii) l'influence de la durée de cure sur les propriétés physiques et mécaniques du remblai cimenté et (iv) la capacité de drainage du remblai en pâte (état de saturation) par la quantification de la porosité effective.

Le plan expérimental initialement proposé a quelque peu été modifié aux vues des résultats obtenus au fur et à mesure du déroulement du projet et à la suite des échanges avec nos partenaires miniers. En effet, le degré de saturation des échantillons n'a pas été varié car cela ne correspondait pas aux conditions des mines étudiées. Par conséquent, les échantillons de remblai ont été maintenus dans une atmosphère à humidité constante lors de leur cure, phénomène qui est observé dans les chantiers des mines en question. D'autre part, il n'a pas été nécessaire d'effectuer des tests d'altérabilité chimique accélérée (extracteurs de soxhlet) parce que les trois résidus étudiés, peu importe leur teneur initiale en sulfures, ne présentaient qu'une altération chimique très réduite attribuable également au maintien des échantillons à humidité constante (conservation de leur degré de saturation).

3. Description sommaire du travail réalisé

Afin d'atteindre ces différents objectifs, une large grille d'essais a été élaborée concernant la fabrication de différentes recettes de mélange composées de trois résidus différents (LRD, LVT, HML), avec quatre types de liant (CP, FA, CL et SL), à trois pourcentages différents (3%, 4,5% et 6% de la masse de résidu sec), à la même teneur en eau de mise en place (28%) et à quatre durées de cure (14, 28, 56 et 91 jours). La Figure 1 présente l'organigramme de la démarche suivie pour cette activité de recherche. Les différents échantillons fabriqués ont fait l'objet d'une caractérisation (i) chimique et géochimique par des analyses à l'électrode et à l'ICP, (ii) physique par le calcul de la porosité, de l'indice des vides, du degré de saturation et par la détermination de la granulométrie, (iii) microstructurale par des observations au microscope électronique à balayage et par la quantification de la surface spécifique et de la porosité au mercure et (iv) mécanique par des essais de compressions uniaxiale et triaxiale.

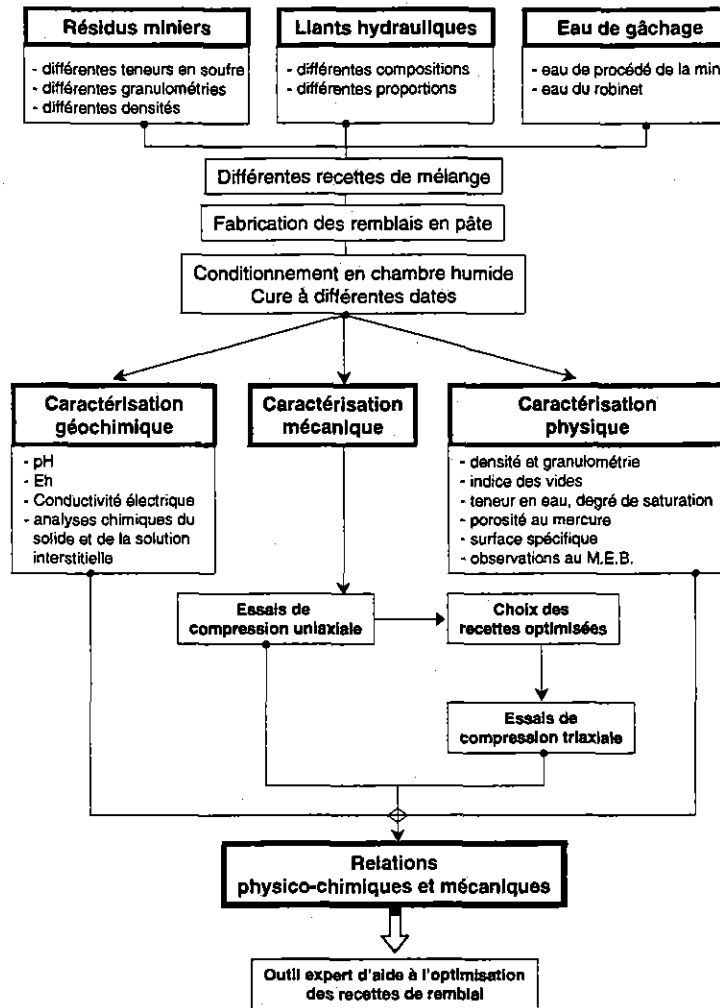


Figure 1. Organigramme de la démarche suivie pour cette étude

Le présent rapport synthèse reprend l'essentiel des résultats obtenus dans le cadre de cette activité de recherche. Ces résultats portent sur les caractérisations chimique, géochimique, microstructurale, physique et mécanique des remblais en pâte fabriqués au laboratoire. Les méthodes de caractérisation utilisées sont présentées en premier lieu ; viennent ensuite les résidus miniers échantillonnés ainsi que les liants hydrauliques utilisés et la procédure de mélange du remblai et de la fabrication des éprouvettes. À noter que de la finesse de la procédure de fabrication des éprouvettes de remblai au laboratoire destinées aux différents essais dépendra la qualité et la fiabilité de l'ensemble des résultats à obtenir. Par la suite, les résultats de la caractérisation chimique et géochimique, ceux de la caractérisation de la microstructure du remblai en pâte, ceux de la caractérisation physique, et enfin, ceux de la caractérisation mécanique sont présentés.

4. Matériel et méthodes

4.1 Méthodes de caractérisation chimique

4.1.1 Méthode d'extraction de la solution résiduelle

Cette technique consiste à mettre en équilibre sous une agitation modérée et pendant 24 heures, 50 g d'échantillon désagrégé et/ou pulvérisé en présence de 100 ml d'eau pure. La solution résiduelle ainsi qu'une grande partie du liant sont ainsi mises en solution. Il en résulte une solution en équilibre avec l'échantillon. Après décantation, la solution est filtrée afin de mesurer, d'une part, les paramètres géochimiques tels que le pH, le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et la conductivité électrique (Cdé), et d'autre part, les teneurs en certains éléments chimiques tels que le calcium, le silicium, le fer, l'aluminium et les ions sulfates.

Rapport synthèse

4.1.2 Spectroscopie d'émission atomique (ICP ES)

Les solutions acidifiées (issues de l'extraction ou de la digestion acide des échantillons solides de résidu, de liants ou de remblai) sont ensuite analysées à l'ICP ES afin de doser les éléments chimiques. L'ICP ES est un spectromètre d'émission atomique par excitation d'un plasma d'argon induit par une haute fréquence. L'appareil ICP ES est basé sur le principe de la mesure quantitative de l'émission optique des atomes excités pour déterminer la concentration des éléments ioniques.

4.1.3 Spectroscopie en dispersion d'énergie (EDS)

Le microscope électronique utilisé est équipé d'un détecteur de rayons X de marque *Link-OXFORD*[®] ISIS-300. Il s'agit d'une diode Si(Li) capable de générer des spectres en dispersion d'énergie pour tous les éléments à partir du bore. Le détecteur communique avec un logiciel qui génère les spectres de comptage et permet de faire une semi-quantification des éléments chimiques. Les analyses peuvent se faire en ponctuelles (pour des phases bien individualisées) ou en plages totales (pour des analyses globales).

4.2 Méthodes de caractérisation de la microstructure

4.2.1 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage est utilisé pour visualiser les différentes microstructures et textures des remblais étudiés. C'est un microscope environnemental de marque *Hitachi*[®] 3500-N de la nouvelle génération. Ce microscope permet de travailler à basse pression (vide dans la chambre), évitant ainsi les problèmes de charges électriques nuisibles à la qualité de l'imagerie électronique dans le cas des échantillons non conducteurs. Pour ce qui est de l'imagerie, le microscope est doté de deux types de détecteurs : (i) un détecteur d'électrons rétrodiffusés qui donne des images avec un contraste chimique superposé à un contraste de relief et (ii) un détecteur d'électrons secondaires qui donne des images avec un contraste de relief (uniquement fonctionnel à vide poussé).

4.2.2 Surface spécifique (S_v)

La surface spécifique d'un matériau comprend la surface géométrique externe ainsi que la surface interne développée par le solide, qui tient compte de toutes les irrégularités de surface à l'échelle moléculaire et de la surface développée par les parois des pores, le tout rapporté à l'unité de masse. Ce paramètre est un bon indicateur de la finesse de division du matériau. La surface spécifique est une donnée essentielle des matériaux poreux dans la mesure où elle y conditionne les phénomènes d'adsorption d'eau en particulier. Dans notre cas, la surface spécifique est déterminée par des mesures d'adsorption grâce à la théorie B.E.T. (Brunauer, Emmett et Teller). L'analyseur de surface utilisé est l'appareil *Gemini* de *Micromeritics*[®].

4.2.3 Porosimétrie au mercure

L'essai de porosimétrie au mercure permet de déterminer la porosité volumique totale, la porosité libre et la porosité piégée d'un matériau. La porosité au mercure a été mesurée au laboratoire avec le porosimètre à mercure *AutoPore-III* de *Micromeritics*[®]. De plus, cet appareil permet d'obtenir de nombreuses propriétés de l'échantillon telles que la distribution modale de la taille des pores, le volume total des pores, l'aire totale des pores, le diamètre médian des pores et les masses volumiques de l'échantillon (totale et des grains solides).

4.3 Méthodes de caractérisation physique et géotechnique

4.3.1 Granulométrie

L'aspect physique des grains solides, leur taille et leur agencement peuvent influencer les propriétés mécaniques du remblai en pâte. La forme des grains solides détermine la taille des pores et le réseau de connexion favorable au drainage de l'eau dans le remblai. La granulométrie des résidus a été déterminée à l'aide du granulomètre au laser *Mastersizer* de *Malvern*[®]. Le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c permettent de rendre compte de la distribution de la taille des grains de chaque résidu (résidu bien classé ou mal classé).

4.3.2 Masse volumique des grains solides

La masse volumique des grains solides d'un remblai est la masse de la matière constituant les grains solides contenue dans une unité de volume. La masse volumique des grains solides est le rapport de la masse des grains solides au volume des grains du remblai. Ce paramètre a été mesuré au laboratoire à l'aide du pycnomètre à hélium *AccuPyc* de *Micromeritics*[®].

4.3.3 Teneur en eau et degré de saturation

La teneur en eau massique w (pondérale ou gravimétrique) est le rapport de la masse d'eau libre à la masse de la matière sèche du remblai. La masse d'eau libre est la différence entre la masse de l'échantillon humide et la masse de l'échantillon séché. Ce paramètre est facilement mesurable en laboratoire en mettant un échantillon humide à l'étuve à une température de 50°C pendant 48 heures. Le degré de saturation indique la quantité d'eau que contient le remblai en pâte. C'est le rapport du volume occupé par l'eau au volume total des vides de l'échantillon. Le volume des vides est calculé par la différence du volume total au volume des solides.

4.4 Méthodes de caractérisation mécanique

Afin de déterminer les caractéristiques de résistance du remblai cimenté en pâte, deux types d'essai mécanique sont réalisés : les essais de compression uniaxiale et les essais de compression triaxiale. L'essai de compression uniaxiale permet d'obtenir la résistance à la compression du matériau tandis que l'essai de compression triaxiale permet d'obtenir la résistance au cisaillement du matériau.

4.4.1 Presse mécanique

Les essais mécaniques sont réalisés à l'aide d'une presse mécanique rigide asservie MTS 10/GL de capacité 50 kN et un taux de chargement minimum de 0,001 mm/mn. La charge appliquée est mesurée par une cellule de pression et le déplacement par un capteur de déplacement à induction. La précision de la mesure de la charge est de l'ordre de 1%. Les éprouvettes d'échantillon soumises à ces essais obéissent à un élargissement $2 \leq \lambda \leq 2,5$. L'élargissement λ étant le rapport de la hauteur H de l'éprouvette à son diamètre D ($\lambda = H/D$).

4.4.2 Essais de compression uniaxiale

L'essai de compression uniaxiale consiste à placer une éprouvette de remblai entre les deux plateaux de la presse, puis d'appliquer une charge axiale jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La contrainte correspondant à la charge maximale à la rupture est appelée la résistance à la compression uniaxiale du matériau (UCS). Une procédure standard est adoptée pour la préparation des échantillons afin de bénéficier d'une bonne fiabilité et reproductibilité des résultats. Chaque valeur de UCS est obtenue par une moyenne de trois essais.

4.4.3 Essais de compression triaxiale

L'essai de compression triaxiale permet, quant à lui, de mieux accéder aux propriétés mécaniques des remblais étudiés car il simule l'état des contraintes *in situ*. Ce type d'essai permet, entre autres, d'appliquer une gamme de pression de confinement pour consolider initialement l'échantillon à un état prédéfini. Après la consolidation, l'échantillon est ensuite cisailé à une vitesse de chargement constante. Pour cette étude, les essais étaient consolidés et drainés (CD). L'essai de compression triaxiale est effectué à l'aide d'une cellule triaxiale en acier inoxydable placée entre les deux plateaux de la presse et branchée à l'air afin de consolider l'échantillon à la pression de confinement souhaitée. La détermination des paramètres caractérisant l'état de rupture d'un remblai (la cohésion c et l'angle de frottement ϕ) nécessite la réalisation de plusieurs essais à différentes pressions de confinement sur différentes éprouvettes de remblai.

4.5 Échantillons de résidu et de ciment

Il est bien connu que les résidus miniers sulfureux sont générateurs d'acidité en présence d'eau et d'oxygène. La présence des sulfures dans les composites cimentés, en particulier les remblais miniers, peut entraîner une altération chimique qui aura pour conséquence la chute de la résistance mécanique. Afin de mieux cerner l'influence de la composition chimique du résidu minier sur la résistance mécanique du remblai en pâte, trois résidus différents, avec des teneurs différentes en sulfures et provenant de trois mines différentes, ont été échantillonnés.

Ces résidus ont été échantillonnés à la sortie des usines de traitement juste avant leur malaxage avec le ciment. Afin de travailler dans les mêmes conditions que dans les mines, l'eau de procédé de chaque mine a aussi été échantillonnée pour servir comme eau de gâchage. D'autre part, quatre types de réactifs hydrauliques ont été sélectionnés pour la fabrication des recettes de remblai ; il s'agit :

- du ciment Portland Type 10 (ordinaire) et Type 50 (résistant aux sulfates) produits par Ciment Lafarge,
- des cendres volantes et du laitier de hauts fourneaux tous deux réputés pour leur effet pouzzolanique (fixation de la chaux pour former des gels C-S-H) fournis par Ciment Lafarge.

Rapport synthèse

4.5.1 Origine des résidus

- *Mine LRD* : c'est une mine souterraine produisant de l'or, de l'argent, du cuivre et du zinc. Le résidu de la mine LRD est cyanuré à la sortie de l'usine de traitement. Cependant, l'échantillonnage s'est effectué après destruction des cyanures (méthode SO₂-air). Ce résidu très sulfureux contient environ 32% de soufre.
- *Mine LVT* : c'est une mine polymétallique souterraine mise en production à la fin de l'été 1994 produisant de l'or, de l'argent, du cuivre et du zinc. Le résidu de la mine LVT a été échantillonné à la sortie de l'usine de traitement après filtration. Ce résidu moyennement sulfureux contient environ 16% de soufre.
- *Mine HML* : c'est une mine d'or mise en production depuis 1985. Le résidu de la mine HML a été échantillonné également à la sortie de l'usine de traitement et ne contenait pas de cyanure. Ce résidu faiblement sulfureux contient environ 5 % de soufre.

4.5.2 Caractéristiques chimiques et physiques des résidus et des ciments

Les principaux éléments chimiques contenus dans les trois résidus ainsi que dans les ciments (Tableau 1) ont été analysés par ICP ES. Le résidu LRD est constitué d'environ 60% de sulfures (essentiellement de la pyrite et un peu de sphalérite), le reste est une gangue composée principalement de silicates et d'aluminosilicates. Le résidu LVT contient environ 30% de sulfures (surtout de la pyrite et un peu de pyrrhotite), le reste est une gangue silicatée et aluminosilicatée. Enfin, le résidu HML contient le moins de sulfures (moins de 10% de pyrite), le reste est une gangue silicatée et aluminosilicatée renfermant aussi de la barytine (BaSO₄).

Divers types de ciment sont souvent utilisés pour la cimentation du remblai en pâte. Dans notre cas, il s'agit du ciment Portland (type 10 et 50), des cendres volantes et des scories ou laitier de haut fourneaux. Les principaux éléments chimiques des ciments utilisés sont présentés dans le Tableau 1. On remarque que ces quatre ciments utilisés pour la fabrication des remblais ont quasiment la même teneur en soufre (sous forme de sulfate de calcium anhydre), mais diffèrent par contre par leur rapport $I_{\text{pouz}} = \text{Si}/\text{Ca}$ qui renseigne sur leur pouvoir à induire un effet pouzzolanique bénéfique contre l'attaque sulfatique. Le ciment Portland type 50 contient moins d'aluminates et plus de silicates, offrant ainsi une bonne capacité de résistance à l'attaque sulfatique.

Tableau 1. – Caractéristiques chimiques des trois résidus étudiés et des ciments utilisés

	Résidu LRD	Résidu LVT	Résidu HML	Ciment Portland 10	Ciment Portland 50	Cendres (fly ash)	Laitier (slag)
S wt%	32,3	15,9	5,2	1,53	1,2	1,46	1,21
Ca wt%	1,07	1,44	1,17	44,9	45,5	11,1	26,6
Si wt%	10,12	15,3	26,29	8,43	9,34	15,22	16,89
Al wt%	2,63	4,065	5,64	2,41	1,99	10,4	3,88
Mg wt%	0,21	2,695	0,57	1,6	0,93	2,27	6,87
Fe wt%	26,8	20,7	5,13	1,89	2,65	5,39	0,48
Cu ppm	1870	1108	30	53	43	171	14
Zn ppm	45600	1795	149	174	741	111	3
Pyrite %	60,6	29,8	9,75	-	-	-	-
I_{pouz}	-	-	-	0,2	0,2	1,4	0,6

En général, c'est une combinaison de ces ciments qui est utilisée à cause des phénomènes d'attaque sulfatique et de la contrainte économique liée aux coûts des ciments. Le mélange final est appelé liant hydraulique. Quatre différents types de liants ont été fabriqués à partir des quatre ciments utilisés. Il s'agit des liants :

CP : ciment Portland ordinaire type 10 (T10) + ciment Portland résistant aux sulfates type 50 (T50)

FA : ciment Portland ordinaire type 10 (T10) + cendres volantes (ou fly ash)

CL : ciment Portland ordinaire type 10 (T10) + laitier de haut fourneau (ou slag)

SL : tout laitier de hauts fourneaux (scorie ou slag)

La Figure 2 présente les courbes granulométriques des trois résidus étudiés. Cette figure montre que les granulométries des résidus LRD et LVT sont similaires et se distinguent de la granulométrie du résidu HML qui est grossière. Du point de vue de la densité, le pourcentage de soufre se reflète bien dans les valeurs obtenues pour les trois résidus (Tableau 2). L'abondance des fines dans le résidu LRD ($D_{10} = 2,6 \mu\text{m}$) fait que ce résidu possède la surface spécifique la plus élevée (Tableau 2).

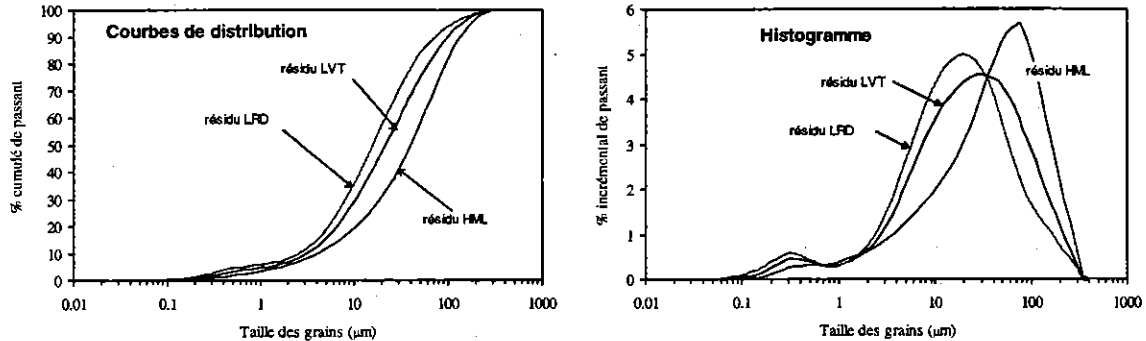


Figure 2. Distribution de la taille des grains des trois résidus étudiés

Tableau 2. – Caractéristiques physiques des trois résidus étudiés

Résidu minier	Surface spécifique (m^2/g)	Densité relative D_r	D_{10} (μm)	D_{30} (μm)	D_{50} (μm)	D_{60} (μm)	D_{90} (μm)	C_u	C_c
LRD	2,5104	3,8	2,61	8	17,00	11,13	100,36	4,23	7,53
LVT	1,7208	3,3	3,22	10,1	21,62	12	98,79	3,69	11,66
HML	1,6075	2,9	4,15	10,9	40,22	14,5	133,92	3,45	11,53

4.6 Mélanges

Le remblai en pâte est fabriqué en laboratoire en mélangeant du résidu, du liant hydraulique et de l'eau de gâchage; le tout étant malaxé pendant environ 40 à 50 minutes afin d'obtenir une pâte homogène d'une consistance donnée. Cette consistance est mesurée généralement à l'aide du test d'affaissement au cône d'Abrahms (ou slump test). La masse de liant à rajouter au mélange est calculée en pourcentage de la masse totale de résidu sec à utiliser.

Tableau 3. – Composition chimique des eaux de gâchage des trois remblais fabriqués

	Eau témoin (robinet)	Eau HML	Eau LRD	Eau LVT
pH	7,53	7,37	5,8	6,65
Ehne (mV)	519,1	459,5	86,7	349
Conductivité (μmohs)	280	3180	8550	2000
Ca ppm	40,4	518	842	387
Fe ppm	0,245	2,96	89,8	0,161
Al ppm	0,114	1,85	0,09	0,168
Na ppm	5,31	191	764	40,2
Si ppm	1,28	9,26	4,57	1,25
Mg ppm	3,66	15,5	21,3	12,1
SO_4^{2-} ppm	87	1944	24444	1303

Le Tableau 3 contient la composition chimique des eaux de gâchage utilisées dans les différents mélanges de remblai en pâte. On notera surtout le taux très élevé de sulfates pour l'eau de LRD qui se trouve légèrement acide et que les eaux de LVT et HML sont aussi sulfatées. Les différentes recettes de mélange sont présentées dans le Tableau 4. Le remblai en pâte ainsi obtenu (avec 78% de solides pour les remblais LRD et LVT et 73,5% de solides pour le remblai

Rapport synthèse

HML) est coulé dans des moules cylindriques en plastique. Ces moules présentent une hauteur moyenne de 200 mm et un diamètre moyen de 100 mm (la hauteur est le double du diamètre). Le remplissage des moules se fait par trois coulées de remblai en pâte, chaque coulée étant consolidée par pilonnage à l'aide d'une tige d'acier. Les moules ainsi fabriqués sont ensuite stockés dans une chambre à humidité contrôlée afin de se rapprocher des conditions de saturation dans les chantiers miniers. Ces éprouvettes sont curées à 14, 28, 56 et 91 jours. Les différents essais ont été conduits à chacune de ces quatre dates de cure.

Tableau 4. – Recettes de mélange utilisées pour les trois résidus LRD, LVT et HML

Type de liant	% liant	% résidu	% T10	% T50	% laitier	% cendres
CP	3	97	1,5	1,5	0	0
CP	4,5	94,5	2,25	2,25	0	0
CP	6	64	3	3	0	0
FA	3	97	1,5	0	0	1,5
FA	4,5	94,5	2,25	0	0	2,25
FA	6	64	3	0	0	3
CL	3	97	0,6	0	2,4	0
CL	4,5	94,5	0,9	0	3,6	0
CL	6	64	1,2	0	4,8	0
*SL	3	97	0	0	0	3
*SL	4,5	94,5	0	0	0	4,5
*SL	6	64	0	0	0	6

*le liant SL n'a pas été utilisé dans le résidu HML

5. Résultats

Dans le présent rapport synthèse, seuls les résultats pertinents de l'ensemble des caractérisations ont été pris en compte. Les résultats de l'analyse statistique sont sommairement présentés. Une ébauche d'un outil expert d'aide à la conception et à l'optimisation des remblais est également fournie.

5.1 Étude géotechnique

Les résultats de la caractérisation physique ont montré que l'évolution de tous les paramètres géotechniques (granulométrie, masses volumiques, teneurs en eau massique et volumique, degré de saturation, indice des vides et porosité calculée) des remblais avec la durée de cure n'était pas toujours pertinente. Par conséquent, seul l'évolution de la teneur en eau et du degré de saturation est présentée dans le présent rapport synthèse. En effet, ces deux paramètres sont directement reliés à l'hydratation des différents liants hydrauliques utilisés. On note que pour chaque durée de cure et pour les trois remblais LRD, LVT et HML, la teneur en eau et le degré de saturation diminuent globalement avec l'augmentation du pourcentage des liants CP, FA et SL, mais qu'ils ont tendance à augmenter avec le pourcentage de liant pour le ciment au laitier CL. Ces variations sont essentiellement attribuables à l'hydratation des liants qui consomment l'eau et confèrent de la résistance mécanique au remblai au cours du temps de cure.

5.2 Étude de la microstructure et de la texture

5.2.1 Imagerie au microscope électronique à balayage (MEB)

Dans le présent rapport synthèse, on se limitera à ressortir les principales déductions de l'étude au MEB en ce qui concerne :

- *la dispersion des grains* : elle est bonne pour la totalité des remblais étudiés, démontrant une bonne homogénéité des grains dans la matrice de remblai et traduisant de faibles contacts entre les grains de sulfures. Ces contacts peuvent favoriser les processus d'oxydation associés à un effet galvanique;
- *les espaces intergranulaires* : ils sont plus ou moins comblés par la matrice de cimentation et les ultra-fines des résidus miniers (Figure 3). En effet, ceci dépend essentiellement du pourcentage de liant et du degré d'hydratation (densité tridimensionnelle des phases hydratées);
- *l'aspect de la matrice* : l'aspect lâche ou dense de la matrice est directement relié à la dispersion des grains et les espaces intergranulaires (qualité de l'hydratation). Des matrices ± lâches et d'autres ± denses et homogènes suivant la recette de l'échantillon en question ont été observées (Figure 3);

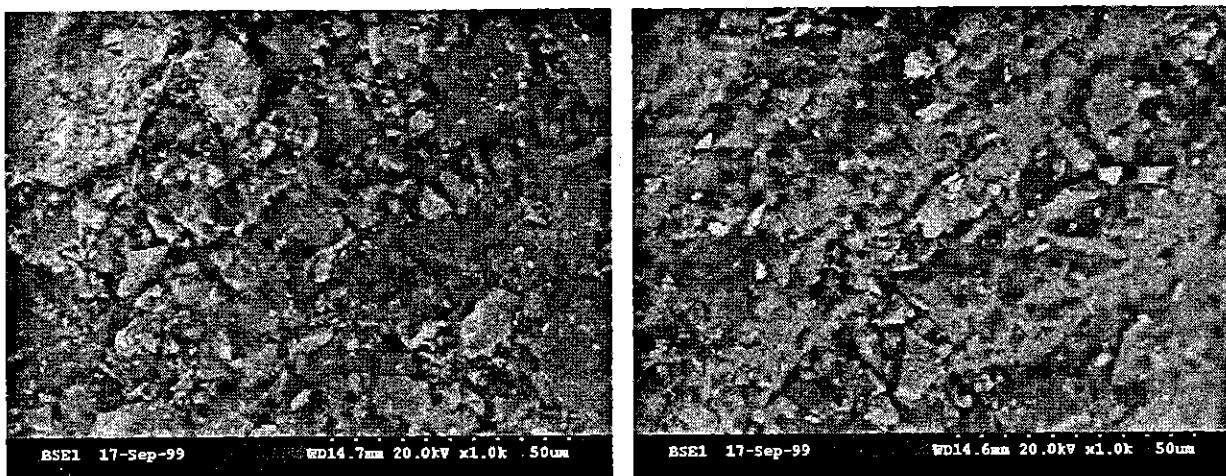


Figure 3. Images MEB du remblai LRD à fort grossissement: liant CP à 3% wt (à gauche) et à 6% wt (à droite)

- *la présence de fissures* : rares sont les échantillons dans lesquels on a observé des fissures. Ce qui prouve, comme cela a été observé macroscopiquement, que tous les échantillons étudiés n'ont pas été le siège d'une altération quelconque, du moins avancée, pour permettre un éclatement de la masse. Ceci est aussi vrai pour les échantillons les plus sulfureux (remblai LRD) qui sont restés quasi saturés en eau durant toute la période de l'expérience et sont dotés d'une très faible porosité libre induisant une très faible perméabilité. En d'autres termes, on peut affirmer que les échantillons étudiés (dans des conditions reflétant le plus possible leur état dans une chambre exploitée) n'ont pas subi d'attaque sulfatique suffisante pour impliquer des phénomènes d'expansion qui, normalement, donnent naissance à des fissurations et des chutes de résistance mécanique (Benzaazoua *et al.*, 1999);
- *la présence de macropores* : dans certains cas (comme le remblai LVT), une macroporosité a été observée et elle est causée par la présence de bulles d'air lors de la fabrication des mélanges et de leur coulage dans les moules. Ce genre de structures ne présente pas vraiment d'effet négatif sur la résistance mécanique de l'échantillon qui pourrait les contenir; d'une part parce qu'elles ne sont pas abondantes et ne communiquent pas entre elles et d'autre part, parce qu'elles sont sphériques et donc isotropes.
- *les précipitations secondaires* : ce sont toutes les phases apparaissant après le durcissement du remblai grâce à la formation des phases primaires hydratées. Elles participent à la cohésion quand elles comblent les espaces intergranulaires, la macroporosité et la microporosité. Cependant, elles deviennent néfastes quand elles induisent un effet expansif (cas de l'attaque sulfatique avec la formation d'ettringite et de gypses secondaires gonflants). Pour les échantillons étudiés, elles ont été surtout bénéfiques dans l'acquisition de la résistance en participant à la densification de la matrice cimentaire et en précipitant dans les macropores (Figure 4).

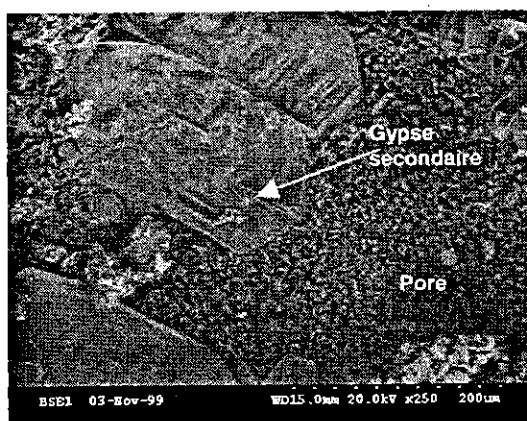


Figure 4. Image MEB d'un pore tapissé de gypse secondaire non expansif (remblai LVT)

5.2.2 Surface spécifique

La surface spécifique, qui traduit la finesse de division des grains du remblai, augmente avec le pourcentage de liant (3% wt, 4,5% wt, 6% wt). C'est-à-dire que plus il y a de liant et plus les grains de remblai sont fins (création des hydrates des liants). D'autre part, pour un même pourcentage de liant, cette finesse des grains dépend du type de liant (CP, FA, CL et SL) et est toujours plus élevée avec le liant CP pour le remblai LRD, le liant SL pour le remblai LVT et le liant CL pour le remblai HML. Il se trouve aussi que ce sont ces trois liants qui confèrent les résistances maximales à court et à long termes des trois remblais étudiés. La relation existant entre la surface spécifique et la résistance mécanique est très bien connue dans l'étude des bétons (Taylor 1980, Baroghel-Bouny 1994).

5.2.3 Porosité au mercure

Les résultats de porosimétrie au mercure ont donné en moyenne une porosité totale au mercure de **40% pour le remblai LRD, 41% pour le remblai LVT et 45% pour le remblai HML**. Par ailleurs, les remblais LRD et LVT ont une très faible porosité libre (caractère peu perméable) et ce, quel que soit le type de liant utilisé, traduisant ainsi le fait que ces remblais piègent presque la totalité du mercure injecté. Ce comportement décrit la structure d'un réseau poreux dont la géométrie des pores favoriserait l'intrusion du mercure plutôt que son extrusion, indépendamment de la connectivité de ce réseau. Il s'agit vraisemblablement de pores tortueux plutôt que de pores « capillaires ». Par rapport au type de liant, on note qu'avec les liants CP et FA, le remblai HML a une faible porosité libre, c'est-à-dire qu'il piège la presque totalité du mercure injecté. Mais avec le liant CL, le remblai HML possède une plus forte porosité libre (fort potentiel de drainage) induite vraisemblablement par des pores « capillaires ».

5.3 Étude de la géochimie en solution

Cette étude a été réalisée sur les solutions résiduelles extraites des trois types de remblai étudiés (LRD, LVT et HML). Les différents paramètres chimiques, à savoir le pH, le potentiel redox (Eh), la conductivité et les ions en solutions, ont été mesurés en fonction du temps de cure. Suivant les liants, le pH initial varie d'une valeur légèrement au-dessus de 12 (liant CP) à 9 (liant SL). Ce pH peut soit baisser puis remonter après quelques semaines de cure (cas des liants à base de cendres ou de scories), soit baisser continuellement (cas du liant CP). Le pH du remblai est tamponné dans un premier temps à des valeurs élevées attribuables à l'ajout des liants, et il se caractérise par un fort potentiel alcalin. Ceci entraîne une forte précipitation des sulfates sous forme, notamment, d'hydrates sulfatés calciques aluminatés et silicatés comme le gypse, l'ettringite et autres phases amorphes, et ce, tout en consommant l'acidité. Dans certains cas, la portlandite pourrait se former en début de cure mais disparaît rapidement à cause de la baisse du pH induite par l'oxydation des sulfures du remblai encore riche en oxygène. La remontée du pH est vraisemblablement causée par une pénurie de l'oxygène qui ne peut être renouvelé à cause des forts degrés de saturation et de la très faible perméabilité des échantillons de remblai en pâte.

Les évolutions du Ca et des sulfates en solution sont en concordance avec ces observations. Les faibles teneurs en Si et Al en solution indiquent que les C-S-H et les sulfoaluminates hydratés sont stables, du moins jusqu'à 56 jours. Quant au fer présent dans la solution de gâchage et celui issu de l'oxydation des sulfures, il précipite en milieu alcalin sous forme d'hydroxydes de fer ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$). De façon générale, les phénomènes géochimiques les plus importants se déroulant dans les remblais sulfureux dès leur fabrication et au cours de leur cure peuvent être résumés de la façon suivante :

- Une solution de gâchage initiale dotée d'un pH plus ou moins bas et riche en sulfates.
- Du ciment à fort potentiel neutralisant (dépendant du type de liant) qui se dissout juste après son addition au remblai humide en présence de la solution de gâchage.
- Neutralisation de l'acidité (H^+) par les hydroxydes (OH^-) libérés.
- Précipitation ou non de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ selon la disponibilité des hydroxydes; autrement dit, selon le type de liant et selon le pH initial de la solution de gâchage.
- Dans le cas où la portlandite ne se forme pas (le plus souvent son pH est inférieur à 12,5 qui est sa limite de solubilité), le calcium précipite essentiellement sous forme de gels C-S-H (calcium-silicium hydraté), d'ettringite ($3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) et de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- Les sulfures continuent à s'oxyder dans le remblai toujours humide en consommant l'oxygène disponible dans le remblai.
- Le fer issu de la solution de gâchage et celui provenant de l'oxydation des sulfures de fer précipitent sous forme d'hydroxyde de fer.
- L'oxygène du remblai encore saturé en eau s'appauvrit avec le temps de cure. Il n'existe pas de renouvellement à moins d'une fissuration, d'une exposition à l'air, etc.

- Les C-S-H sont stables jusqu'à pH 9 et, si le pH diminue en dessous de cette valeur, ils sont resolubilisés tout en précipitant des gels de silice (décalcification des C-S-H), le calcium précipitant sous forme de sulfate hydraté (gypse).
- Toutes les phases dont il est question (se formant soit de façon primaire lors de l'hydratation du ciment, soit de façon secondaire suite à une déstabilisation des hydrates primaires) participent à la cohésion dans les remblais étudiés en remplissant les vides tels qu'observés dans l'étude au MEB. En effet, comme cela va être démontré dans le chapitre « caractérisation mécanique », l'acquisition de la résistance est continue dans le temps et aucune perte de résistance notable n'a été observée durant les 100 premiers jours de cure.

5.4 Étude du comportement mécanique

Pour la caractérisation du comportement mécanique des remblais en pâte, un total de 425 éprouvettes ont été utilisées dont 396 éprouvettes pour les essais de compression uniaxiale et 29 éprouvettes pour les essais de compression triaxiale. Les essais de compression triaxiale ont été réalisés sur les éprouvettes des recettes optimisées. Le choix d'une recette optimale pour un résidu donné repose à la fois sur la résistance à court terme (entre 0 et 28 jours de cure) et à long terme (au delà de 90 jours de cure au moins) du remblai en pâte. Ces deux propriétés mécaniques vont déterminer les conditions de remblayage et la durée de vie du remblai en pâte. La recette optimale doit également tenir compte du coût des opérations de remblayage, c'est-à-dire un remblai en pâte ayant une bonne résistance à long terme et à moindre coût. Nous savons par ailleurs que les opérateurs miniers sont prêts à investir environ 1 \$ canadien par tonne de résidu (Hassani et Archibald, 1998), ce qui équivaudrait à des pourcentages de liant variant entre 3% et 7% de la masse totale de résidu sec.

5.4.1 Évolution de UCS en fonction de la durée de cure

Le Tableau 5 synthétise les résultats de la résistance à la compression uniaxiale UCS des trois remblais en pâte (LRD, LVT et HML) pour chaque type de liant (CP, FA, CL et SL) et pour chaque pourcentage (3%, 4,5% et 6%) en fonction de la durée de cure (14, 28, 56 et 91 jours).

Tableau 5. – Résistance UCS des remblais LRD, LVT et HML en fonction de la durée de cure

Type de liant	UCS à 14 jours (kPa)			UCS à 28 jours (kPa)			UCS à 56 jours (kPa)			UCS à 91 jours (kPa)		
	LRD	LVT	HML	LRD	LVT	HML	LRD	LVT	HML	LRD	LVT	HML
3%CP	<10	186	153	19	204	188	500	229	234	622	210	293
4,5%CP	<10	353	230	784	399	323	894	435	413	1086	454	433
6%CP	<10	614	388	1444	737	456	1586	726	529	1947	809	621
3%FA	<10	113	156	<10	152	190	90	157	241	165	146	258
4,5%FA	<10	373	306	81	474	425	378	517	573	465	500	660
6%FA	<10	695	367	642	967	501	995	1009	642	1126	979	761
3%CL	<10	<10	415	<10	208	569	<10	1071	760	<10	1131	774
4,5%CL	<10	<10	698	<10	408	886	<10	2076	1136	<10	2305	1222
6%CL	<10	195	1569	<10	1521	2008	<10	2826	2535	<10	3302	2851
3%SL	<10	27	ND	<10	581	ND	<10	918	ND	<10	620	ND
4,5%SL	<10	205	ND	<10	1570	ND	<10	2195	ND	<10	2308	ND
6%SL	<10	700	ND	<10	2906	ND	<10	3622	ND	<10	3951	ND

ND (non disponible) = recette non utilisée avec le résidu HML

5.4.2 Choix des recettes optimales pour les trois mines étudiées

Le choix des recettes optimales pour chaque type de résidu a été fait sur la base des résultats des essais de compression uniaxiale, à savoir les valeurs de la résistance à la compression uniaxiale UCS. En se fixant la gamme de UCS à court terme de l'ordre de 700-800 kPa et à long terme de l'ordre de 1000 kPa comme critère de choix de la recette optimale, on peut noter d'après le Tableau 5 que :

- pour le résidu LRD, seuls les liants CP et FA (à 4,5% et 6%) confèrent une résistance significative au remblai après 28 jours de cure, et les plus fortes résistances UCS sont obtenues avec le liant CP. La recette optimale pour le résidu LRD est donc le mélange à 4,5%wt du liant CP qui confère au remblai une résistance UCS à court terme de l'ordre de 780 kPa et une résistance à long terme de l'ordre de 1,1 MPa;
- pour le résidu LVT, seuls les liants SL et CL permettent de respecter le critère de choix dans la gamme de pourcentages de liant 4,5%-6%, et ces deux liants confèrent au remblai à peu près la même résistance à long

Rapport synthèse

- terme. La recette optimale pour le résidu LVT est donc le mélange à 4,5%wt du liant CL qui confère au remblai une résistance UCS à court terme de l'ordre de 410 kPa et une résistance à long terme de l'ordre de 2,3 MPa;
- pour le résidu **HML**, seul le liant CL permet de respecter le critère de choix dans la gamme de pourcentage de liant 4,5%-6%. La recette optimale pour le résidu HML est donc le mélange à 4,5%wt du liant CL qui confère au remblai une résistance UCS à court terme de l'ordre de 890 kPa et une résistance à long terme de l'ordre de 1,2 MPa.

5.4.3 Influence du pourcentage de soufre du résidu sur la résistance UCS

Les résultats du Tableau 5 et des Figures 4 et 5 montrent que les différents types de liant utilisés (CP, FA, CL, SL) ne confèrent pas de résistance mécanique (ou de cohésion) de la même manière aux trois types de résidu étudiés (LRD, LVT, HML). Ceci corrobore le fait que l'acquisition de la résistance ou l'hydratation des liants semble directement reliée aux propriétés physiques et surtout à la teneur en soufre des résidus utilisés pour la fabrication du remblai en pâte. La chimie de l'eau de gâchage a sans doute également une grande influence sur l'hydratation des liants. Les essais de compression uniaxiale ont permis de mieux comprendre les phénomènes d'acquisition de la résistance UCS avec les quatre types de liant et en rapport avec les teneurs initiales en sulfures des résidus LRD (32% de soufre, soit 60% de sulfures), LVT (16% de soufre, soit 30% de sulfures) et HML (5% de soufre, soit 9% de sulfures).

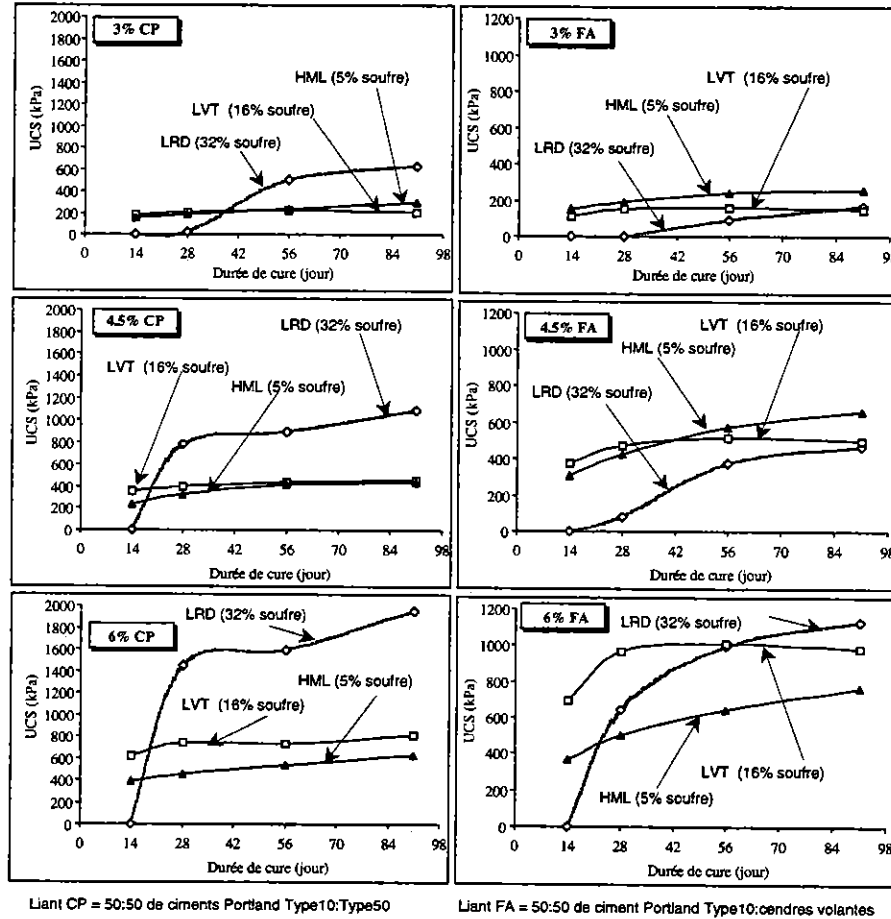


Figure 5. Influence du pourcentage de soufre du résidu sur la résistance UCS obtenue avec les liants CP et FA

De l'ensemble des résultats sur le mode d'acquisition de la résistance mécanique, nous retiendrons que :

- le **liant CP** est moins réactif en présence d'un résidu peu sulfureux (HML) ou moyennement sulfureux (LVT), et au contraire, très réactif en présence d'un résidu contenant beaucoup de sulfures (LRD). Par conséquent, le liant CP est très approprié pour des résidus très sulfureux comme le résidu LRD.

- le liant FA est plus approprié avec les résidus LVT et HML que le liant CP (qui reste le meilleur liant pour le résidu LRD). Pour un même pourcentage de liant, les résistances acquises avec le liant FA sont toujours supérieures à celles acquises avec le liant CP, exception faite pour le résidu LRD.
- le liant CL est fortement déconseillé pour les résidus très sulfureux comme le résidu LRD, mais fortement conseillé pour des résidus moyennement ou faiblement sulfureux comme les résidus LVT et HML. De plus, ce liant confère plus de résistance aux remblais LVT et HML qu'avec les liants CP et FA.
- le liant SL n'est pas recommandable pour un résidu aussi sulfureux comme le résidu LRD, mais pourrait être conseillé pour des résidus faiblement ou moyennement sulfureux comme les résidus LVT et HML. D'autre part, le liant SL confère les plus fortes résistances UCS au remblai LVT, et ce, pour les trois pourcentages de liant.

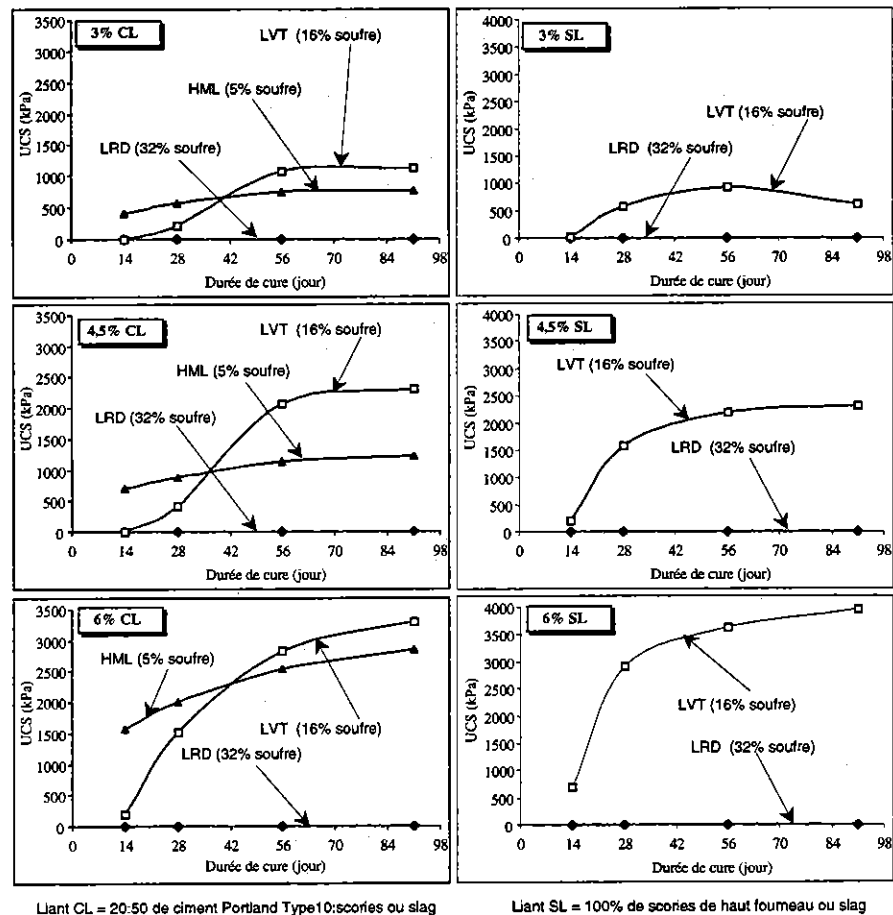


Figure 6. Influence du pourcentage de soufre du résidu sur la résistance UCS obtenue avec les liants CL et SL

5.4.4 Résultats des essais de compression triaxiale

Ces essais ont été effectués sur les éprouvettes des recettes optimales des résidus LRD (4,5% du liant CP), LVT (4,5% du liant CL) et HML (4,5% du liant CL). Toutes ces éprouvettes présentaient une rupture semi-fragile. Par ailleurs, les essais de compression triaxiale ont permis de calculer le module de déformation élastique E et les paramètres du critère de rupture de Mohr-Coulomb, à savoir la cohésion c et l'angle de frottement ϕ pour les trois types de remblai en pâte étudiés (Tableau 6). Ces résultats ont montré que la cohésion est corrélée linéairement au module de déformation élastique E du remblai en pâte. De ces résultats, nous retiendrons que les recettes optimales des trois remblais en pâte se distinguent plus par leur cohésion que par leur angle de frottement interne qui est quasiment le même. La cohésion du remblai LVT (4,5% CL) est presque le double de celle du remblai HML (4,5% CL). La cohésion du remblai HML diffère de celle du remblai LRD (4,5% CP) de plus de 60 kPa.

Tableau 6. Paramètres mécaniques des recettes optimales des remblais LRD, LVT et HML

Nom remblai	Pourcentage et liant	UCS (kPa)	E (kPa)	c (kPa)	φ (degré)
LRD	4,5% CP	1314	416 743	465	9
	6% FA	1146	373 114	402	23
LVT	3% CL	1012	468 913	400	14
	4,5% CL	2325	931 856	1023	8
	6% CL	3456	1 141 095	1654	4
HML	4,5% CL	1273	424 266	527	11
	4,5% CP	534	299 647	158	28
	4,5% FA	787	392 819	249	26

5.5 Analyse statistique

Les résultats de l'analyse des matrices des corrélations et de l'Analyse en composantes principales (ACP) ont permis d'observer la variabilité, les uns par rapport aux autres, des paramètres décrivant les propriétés physiques, chimiques, géotechniques et mécaniques des résidus et des remblais en pâte. De l'analyse statistique des données on en déduit donc que :

- les paramètres caractérisant les propriétés physiques et géotechniques sont corrélés négativement avec les paramètres caractérisant les propriétés densimétriques et les propriétés chimiques du remblai, c'est-à-dire que ces deux groupes de paramètres varient en sens inverse.
- les paramètres caractérisant les propriétés physico-mécaniques sont également corrélés négativement avec les paramètres caractérisant les propriétés hydrauliques du remblai, c'est-à-dire que ces deux groupes de paramètres varient en sens contraire.

6. Conclusions

Cette activité de recherche intitulée «*Investigation de la stabilité chimique et son impact sur la qualité des remblais miniers cimentés*», a été réalisée à partir d'une large grille d'essais au laboratoire utilisant des méthodes de caractérisation faisant appel à des connaissances pluridisciplinaires. Trois résidus provenant des mines LRD (60 % de sulfures), LVT (30 % de sulfures) et HML (9 % de sulfures), ont été utilisés pour fabriquer 33 recettes de mélanges de remblai en utilisant 4 types de liant hydraulique (CP, FA, CL, SL) à 3 proportions différentes (3 %wt, 4,5 %wt et 6 %wt). Le liant CP est obtenu avec le rapport 50:50 de Portland type 10:Portland type 50, le liant FA avec le rapport 50:50 de Portland type 10:cendres volantes (fly ash), le liant CL avec le rapport 20:80 de Portland type 10:scories ou laitier (slag) et le liant SL composé de 100% de scories. Cette étude a permis une meilleure connaissance des nombreuses propriétés du remblai minier cimenté en pâte (structurale, physique, chimique et mécanique) conduisant à l'amélioration de sa qualité en vue de son utilisation sécuritaire. En effet, les nombreux résultats obtenus concernent tous les aspects conditionnant directement ou indirectement la résistance mécanique (ou la cohésion) du remblai cimenté en pâte, par conséquent ses potentiels à se liquéfier et s'altérer chimiquement. Les principales conclusions qui découlent de cette étude sont :

1. Quelque soit les types de résidu et de liant utilisés dans les recettes de mélange, la résistance mécanique augmente avec l'augmentation du pourcentage de liant.
2. Pour les trois résidus de compositions minéralogiques différentes, l'acquisition de résistance mécanique par les remblais dépend de la composition chimique du liant, du pourcentage du liant et de la durée de cure. Les meilleurs résistances mécaniques ont été obtenues **à partir de 28 jours de cure** avec le liant CP (ciments Portland types 10 et 50) pour le remblai LRD, le liant SL (scories) pour le remblai LVT et le liant CL (ciment aux scories) pour le remblai HML.
3. L'évolution de la résistance à la compression uniaxiale UCS dans le temps (ou la vitesse d'hydratation des liants) est fonction du type de liant utilisé et de sa proportion dans la recette de mélange. C'est-à-dire que pour un pourcentage donné de liant, la meilleure résistance à court terme (après 14 jours de cure) peut être obtenue avec le liant X alors que la meilleure résistance à long terme (à partir de 91 jours de cure) est obtenue avec le liant Y. Par exemple avec un pourcentage optimum de 4,5 %wt de liant, la meilleure résistance mécanique à court terme du remblai LVT est obtenue avec le liant FA (ciment aux cendres volantes) tandis que la meilleure résistance à long terme est obtenue avec le liant SL (scories). Par contre à 6 %wt de liant, les deux meilleures résistances sont obtenues avec le même liant SL.

4. Selon le critère économique (un remblai en pâte performant et à coût raisonnable), le pourcentage de 4,5 %wt a été choisi comme optimum. Avec 4,5 %wt de liant, **CP est le liant conseillé pour la mine LRD (résidu très sulfureux)**, **CL est le liant conseillé pour les mines LVT (résidu moyennement sulfureux) et HML (résidu peu sulfureux)**.
5. Il a été possible de mettre en évidence le lien direct entre la surface spécifique et la résistance mécanique du remblai cimenté en pâte (tout comme pour les bétons), à savoir que plus la résistance mécanique augmente et plus la surface spécifique est élevée. L'intérêt de cette relation est que moyennant une courbe de calibrage pour une mine donnée, il sera possible d'estimer (ou de prédire empiriquement) la valeur de UCS simplement à partir de la mesure de la surface spécifique du remblai.
6. Plus la granulométrie du résidu est grossière (exemple du résidu HML), plus le remblai obtenu sera poreux (quelque soit le liant utilisé), plus il sera perméable (selon le type de liant) et plus les résistances à court et à long terme obtenues sont moins élevées par rapport aux résistances obtenues avec des résidus plus fins.

En résumé, il n'existe pas de recette « miracle » pour les remblais en pâte; chaque type de résidu et chaque eau de gâchage exigent que l'on s'attarde sur une optimisation en laboratoire d'une recette de liant (types de réactif hydraulique utilisés et leurs proportions dans le remblai), au lieu de procéder par des essais sur le terrain (souvent coûteux et éventuellement dangereux pour la vie des mineurs).

7. Ébauche d'un outil expert

En combinant l'ensemble des données issues de cette étude avec des équations empiriques, il est possible de mettre au point un outil ou un système expert d'aide au design des remblais à l'échelle de la mine (Figure 6).

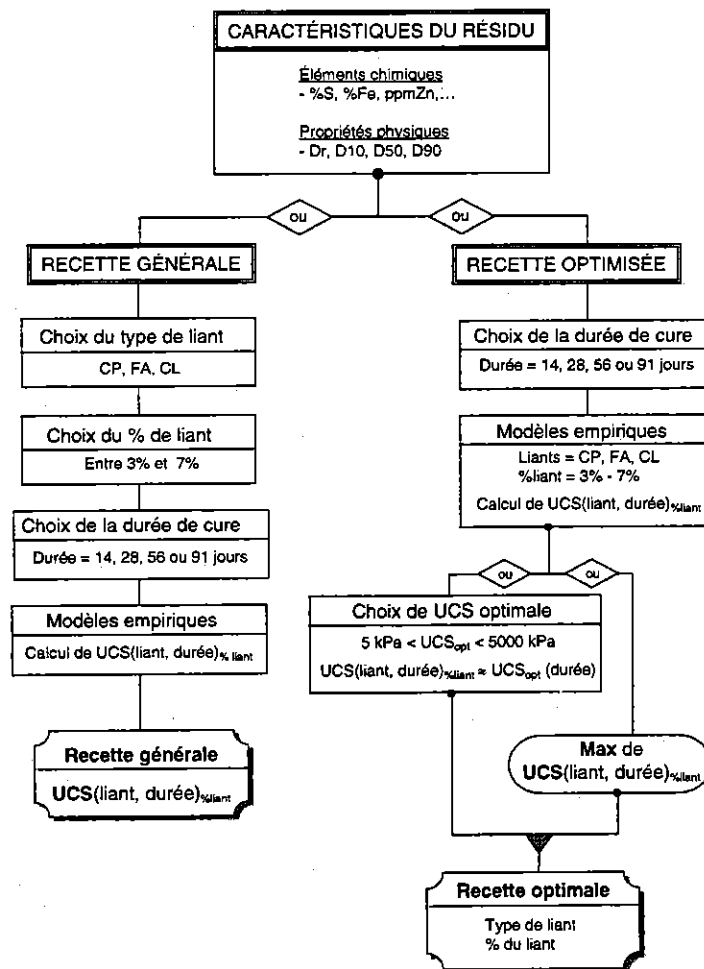


Figure 7. Organigramme de l'ébauche de l'outil expert

Rapport synthèse

À partir des caractéristiques initiales d'un résidu donné, destiné à la fabrication du remblai en pâte, l'opérateur a le choix entre (i) une recette quelconque (ou générale) et (ii) une recette optimisée. Dans le premier cas, l'opérateur doit choisir le type de liant parmi trois liants proposés (CP, FA et CL), le pourcentage du liant (entre 3 et 7%wt) et l'âge du remblai (cure à 14, 28, 56 et 91 jours). Dans le deuxième cas, l'opérateur doit choisir l'âge du remblai et, optionnellement, la résistance optimale désirée. Avec ces choix, l'outil expert utilise différentes équations empiriques pour calculer la résistance UCS correspondante.

8. Applicabilité des résultats du projet

Le simple fait d'avoir prouvé, résultats à l'appui, que l'acquisition de la résistance mécanique par le remblai en pâte dépendait à la fois de la chimie du résidu et de l'eau de gâchage ainsi que de ses propriétés physiques est un grand apport. À la lumière des résultats de cette étude, le résidu minier apparaît plus que jamais comme un "granulat" complexe ne réagissant pas de la même manière avec les différents types de liant. Désormais, il ne sera plus question de prendre n'importe quel résidu et de le mélanger avec n'importe quel ciment pour obtenir la résistance mécanique désirée. Il faudrait donc passer par l'optimisation des recettes de remblai pour chaque mine ou chaque type de résidu. La solution qui consiste à reprendre la recette de remblai en pâte d'une mine A (pour laquelle cette recette est adaptée) et de l'appliquer à la recette de la mine B n'est plus à envisager. Cette démarche pourrait être très dangereuse pour la sécurité des travailleurs miniers.

Tous les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont directement ou indirectement profitables pour les mines concernées. D'autre part, nous estimons que toute mine présentant des caractéristiques physiques et chimiques similaires à ces trois mines pourrait utiliser ces résultats (ou s'en inspirer) pour l'optimisation des recettes de remblai en pâte comme par exemple les mines Bouchard-Hebert (Cambior) et LRD (Agnico-Eagle). Certains résultats sont d'ailleurs déjà appliqués par des mines de la région :

- Cas de LRD : modification de la recette prévue par le consultant à la lumière des résultats de ce projet et souhait de pousser l'étude sur d'autres aspects importants (voir demande de renouvellement).
- Cas de LVT : l'optimisation réalisée dans le cadre de cette étude concorde avec celle faite sur le site minier. Une réunion avec des responsables de cette mine est prévue bientôt afin de discuter des résultats de ce projet.

9. Retombées

L'ensemble des résultats de cette étude s'intègrent directement dans le cadre de l'utilisation sécuritaire du remblai cimenté en pâte dans les mines souterraines du Nord-Ouest Québécois. Cette utilisation sécuritaire du remblai en pâte ne peut aboutir que par une très bonne connaissance de l'ensemble de ses propriétés (physique, chimique et mécanique). Les principales retombées pour les mines, les consultants et les chercheurs s'intéressant au remblai en pâte sont :

- meilleure connaissance pluridisciplinaire du remblai en pâte sulfureux (caractérisations physique et géotechnique, chimique, microstructurale et mécanique);
- meilleure connaissance du rôle de chaque paramètre physique, microstructural et chimique sur l'acquisition de la résistance mécanique du remblai en pâte;
- meilleure connaissance des phénomènes d'hydratation des différents types de liant dans les remblais en pâte sulfureux;
- meilleure connaissance des phénomènes chimiques se déroulant dans les remblais en pâte sulfureux, offrant un meilleur guide pour l'optimisation des recettes.