



Chaire de recherche du Canada
**Gestion intégrée des rejets
miniers sulfureux par remblayage**



**Université du Québec
en Abitibi-Témiscamingue**

UTILISATION DU CIMENT DANS LE REMBLAYAGE DES MINES SOUTERRAINES : GÉNÉRALITÉS, ÉVOLUTION DES PRATIQUES ET UTILISATION DE SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS COMME COMPLÉMENT CIMENTAIRE

Olivier PEYRONNARD, Mostafa BENZAAZOUA

Courriel : olivier.peyronnard@uqat.ca

Tel : 819-762-0971 poste 2381

Atelier national sur les sites contaminés fédéraux
IBIC, Montréal, mai 2010

Plan de la Présentation

2

- **Généralités sur le remblayage minier**
 - Définition
 - Typologie
 - Liants hydrauliques
- **Remblais Miniers en Pâte Cimentée (RMPC)**
 - Généralités
 - Paramètres d'influence
 - Intérêts environnementaux
- **Nouvelles pratiques**
 - Liant alternatifs à base de sous-produits industriels
 - Nouvelles techniques de remblayage cimenté
- **Conclusions**

Généralités sur le Remblayage Minier

Définition

3

- L'exploitation des mines souterraines (métaux de base et/ou précieux) laissent des vides = **cavités souterraines**
- Remblayage minier : **Comblement des cavités** avec :
 - Stériles rocheux (roches sans valeurs économiques)
 - Résidus de concentrateur (résidus de la concentration du minerai)
 - Ajout fréquent d'un liant hydraulique
- Rôle de support de terrain
 - Auto-portance
 - Résistances aux sollicitations liées au minages des chantiers alentours

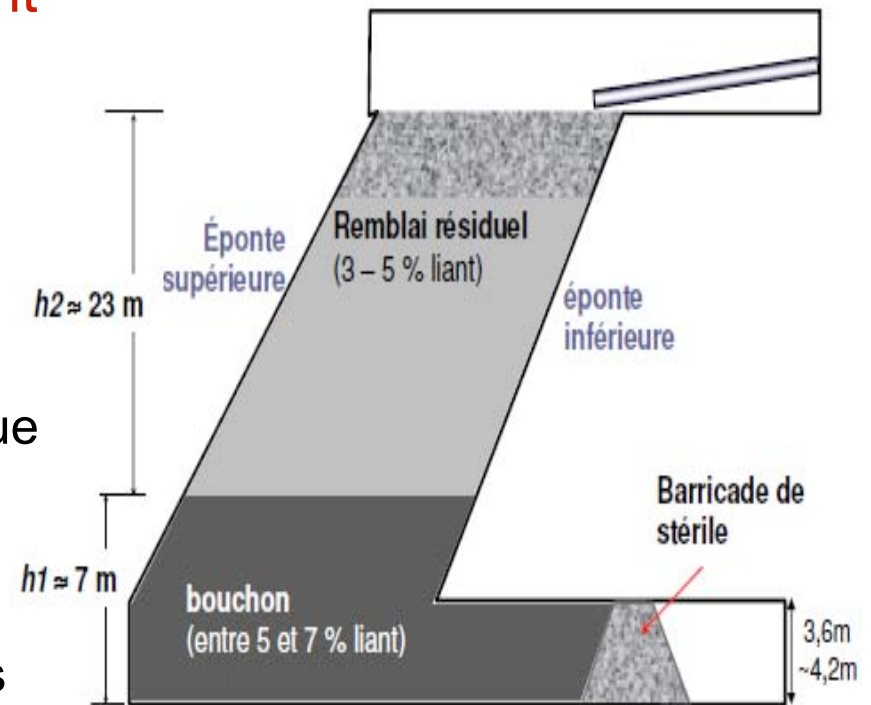


Figure 1 : Illustration du remblayage minier

Généralités sur le Remblayage Minier

Typologie des remblais miniers

4

■ Remblai rocheux (cimenté ou non) :

- Roches stériles (d'origine minière ou non)
- Particules de tailles entre 1 mm et plusieurs dizaines de cm
- Ajout possible d'un coulis de ciment avant ou après mise en place dans les cavités

➔ **Résistances mécaniques pouvant être très élevées**

■ Remblai hydraulique (cimenté ou non) :

- Résidus de concentrateur (éventuellement hydrocyclonés)
- Amendement granulaire (sable...)
- Liant hydraulique
- Grande quantité d'eau (60 à 75% solide)

➔ **Résistances mécaniques modérées voire faibles**

■ Remblai minier en pâte cimentée :

- Résidu de concentrateur épaissi
- Liant hydraulique (toujours)
- Eau (70 à 85% solide)

➔ **Bonnes résistances mécaniques et possibilité d'utiliser des résidus sulfureux**

Généralités sur le Remblayage Minier

Liants hydrauliques et remblais miniers

5

□ Quatre principaux liants

- Ciment **Portland** de type **GU** (General Use, anciennement type 10)
- Ciment **Portland résistant aux sulfates** (HS, anciennement type 50), parfois en mélange avec GU (moins onéreux)
 - ➔ **Si risque attaque sulfatique (teneurs élevées en sulfures dans le résidu et/ou en sulfates dans les eaux)**
- Ciment aux **laitiers de haut-fourneaux** : 70 - 90% de slag en mélange avec Portland
 - ➔ **Très fortes résistances mécaniques** (notamment à long terme)
 - ➔ **Développement des résistances pouvant être lent**
 - ➔ **Faibles résistances si teneurs en sulfates très élevées**
- Ciment aux **cendres volantes** de charbon : 30 – 50 % de Fly Ash en mélange avec Portland
 - ➔ **Réduction des coûts (liant moins onéreux)**
 - ➔ **Cimentation lente**

Généralités sur le Remblayage Minier

Liants hydrauliques et remblais miniers

6

□ Consommation de liants

- Au Québec, principalement GU et laitiers (Slag)
- Reste du Canada : GU et Fly Ash type F
- ~ 5% de la production annuelle canadienne de ciment

environ 500,000 t/an

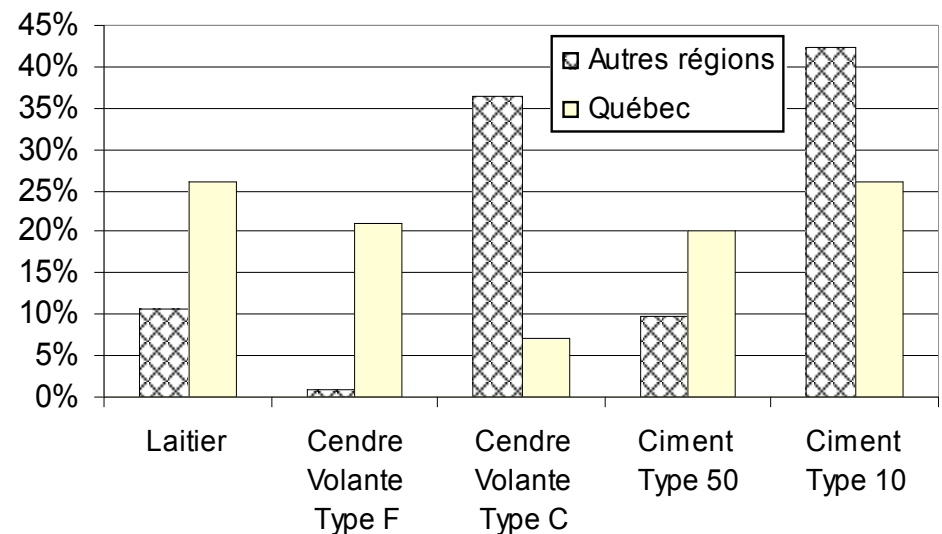


Figure 2 : Proportions relatives d'utilisation des différents liants pour le remblayage minier (d'après Gauthier, 2004)

Remblais Miniers en Pâte Cimentée

Généralités

7

□ Composition

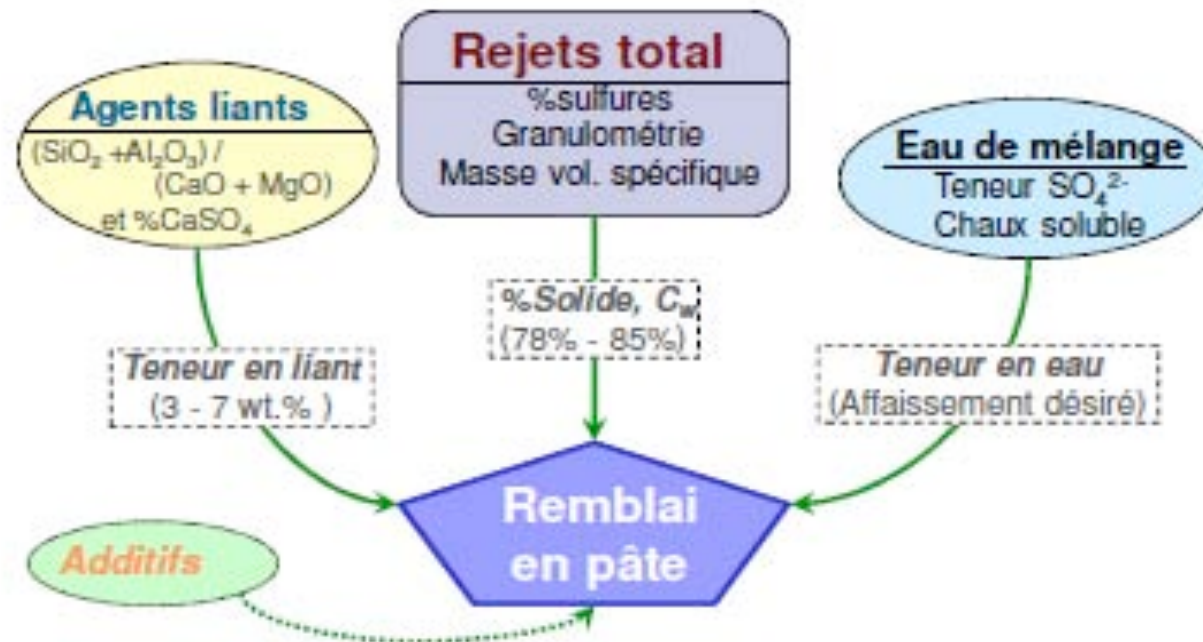


Figure 3 : Facteurs influençant le développement des résistances des RMPC (d'après Benzaazoua *et al.*, 2002)

□ Résistances usuelles :

Optimisation de recettes (types de liant, taux de liant, % solide) pour atteindre UCS finales entre 500 et 1500 kPa

Remblais Miniers en Pâte Cimentée

Paramètres d'influences

8

□ Facteurs d'influence

- Minéralogie du résidu :
 - Minéraux argileux : augmentation la demande en eau, consolidation et drainage amoindris
 - Minéraux sulfureux : libération de sulfates (oxydation)
- Granulométrie du résidu (teneurs en fines et grossières) :
 - Drainage des eaux
 - Consolidation
- Chimie des eaux et du résidu :
 - Sulfates : attaque sulfatique et influence hydratation
 - Métaux : inhibition de l'hydratation des liants
 - Calcium (eau de procédé) : participe à l'hydratation des liants

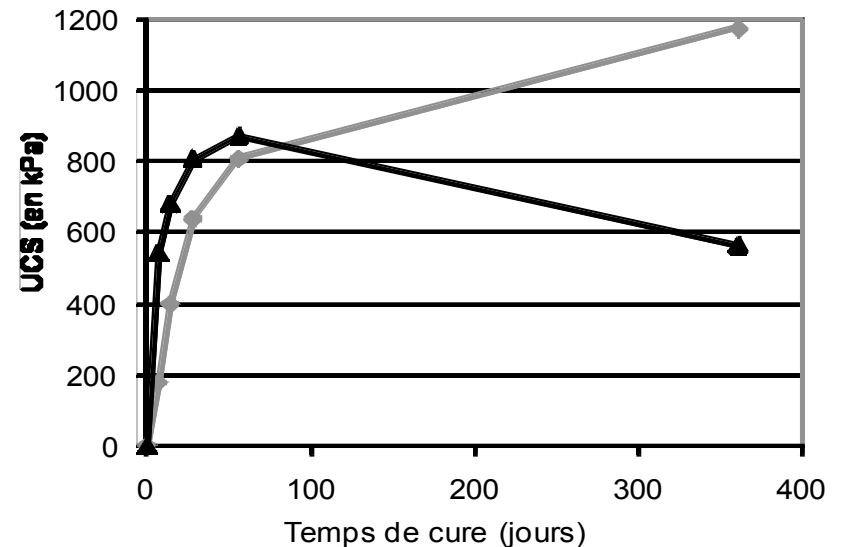


Figure 4 : Illustration du phénomène d'attaque sulfatique

Remblais Miniers en Pâte Cimentée

Paramètres d'influences

9

- Facteurs d'influence (suite)
 - Type de liant (liés à la chimie du résidu et des eaux) :
 - Cinétique du développement des résistances
 - Sensibilité aux sulfates
 - Capacité à stabiliser les résidus miniers : fixation des polluants, réduction de la réactivité apparente (oxydation)
 - Taux de liant : résistances mécaniques proportionnelles aux taux de liant
 - Quantité d'eau totale (% solide de la pâte) : Cinétique d'hydratation des liants
 - Température des chantiers : Cinétique d'hydratation des liants

Remblais Miniers en Pâte Cimentée

Bénéfices environnementaux

10

- Réduction des aires de stockage en surface : Jusqu'à 60% du résidu de concentrateur retourné sous terre
- Réduction des risques de génération de drainage minier acide :
 - Maintient d'un fort degré de saturation : limitation de l'oxydation des sulfures
 - Alcalinité des liants accroît le pouvoir de neutralisation
- Réduction de la mobilité des polluants :
 - Faible conductivité hydraulique
 - Rétention de certains métaux dans les hydrates cimentaires :
 - Précipitation/co-précipitation sous forme stable du fait des pH élevés (hydroxydes notamment)
 - Substitution dans les réseaux cristallins (ex: arseno-ettringite)
 - Sorption en surface des C-S-H (ex: zinc)

Nouvelles Pratiques

Liants alternatifs à base de sous-produits industriels

11

- Trois types de propriétés cimentaires
 - Hydraulique : Capacité à prendre en masse par réaction en phase aqueuse (ex: laitiers de haut fourneaux, ciment Portland)
 - Pouzzolanique : Capacité à cimenter par réaction en phase aqueuse avec de la chaux (ex: cendres volantes)
 - Activateurs d'hydratation : Initie ou accélère l'hydratation d'un liant
- Sous-produits industriels présentant des propriétés liantes :
 - Pouzzolanique/hydraulique (riches en silice et/ou alumine):
 - Cendres biomasse, boues de papeterie...
 - Scories métallurgiques
 - Verre usagé
 - Activateurs (résidus riches en calcium ou alcalins):
 - Poussières de cimenterie
 - Gypse artificiels (résidu production acide phosphorique, fluorhydrique...)
 - Chaux usagée

Nouvelles Pratiques

Liants alternatifs à base de sous-produits industriels

12

- Intérêts économiques des liants alternatifs :
 - Approvisionnement en liant : jusqu'à 80% du coût des opérations de remblayage
 - ➔ **Importantes économies possibles**
 - Débouché économique pour les sous-produits
- Bénéfices environnementaux :
 - Réduction des émissions de GES (crédit carbone)
 - Combustion d'énergie fossile (fours cimentiers à 1450°C)
 - Calcination du calcaire
 - Économie de matières premières
 - Ingrédient du ciment Portland (argile et calcaire)
 - Énergie fossile
 - Réduction des volumes dédiés au stockage des sous-produits

Nouvelles Pratiques

Liants alternatifs à base de sous-produits industriels

13

□ Performances mécaniques

- GU et Slag nécessaire pour initier hydratation et obtenir de fortes résistances
- UCS > 500 kPa avec des liants comportant jusqu'à 50% de sous-produits
- UCS > 1000 kPa pour 30% de sous-produits
- Activation par un mélange Anhydrite-Portland : développement accéléré des résistances
- 5% de CKD permet d'accélérer l'hydratation des liants

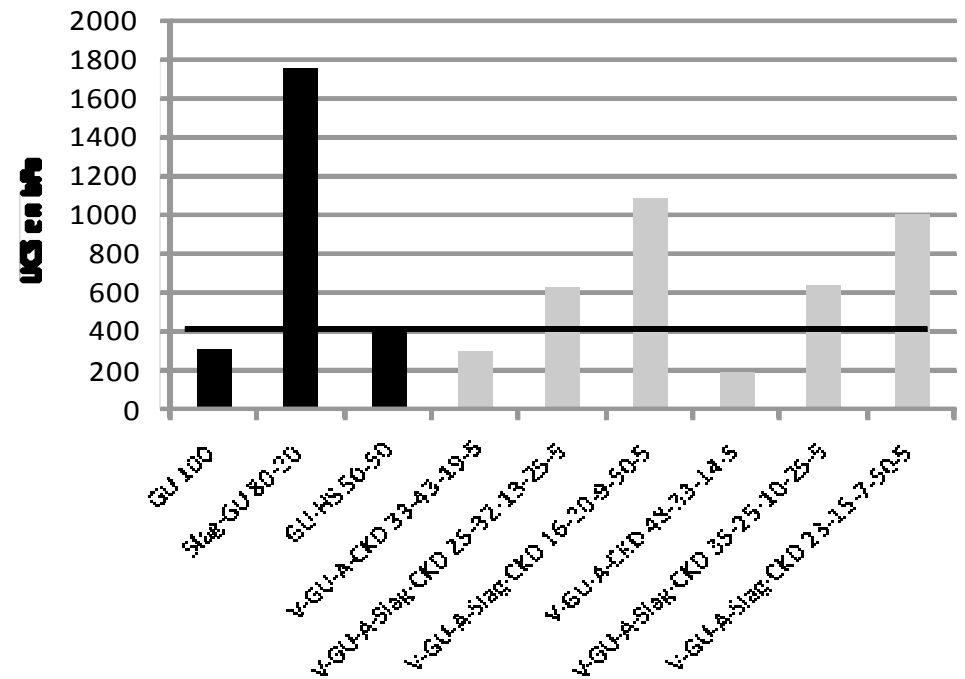


Figure 5 : Résistances en compression uniaxiale obtenus après 56 j de cure pour des liants à base de verre (4,5% de liant, trait noir = UCS pour liant de la mine)

Nouvelles Pratiques

Nouvelles techniques de gestion des résidus miniers

14

- Dépôt en pâte de surface (DPS)
 - Stockage en surface des résidus de concentrateur
 - Dépôt en couches de résidus épaissis (~ 75% solide)



Figure 6 : Exemple de la mine Bulyanhulu, Tanzanie (photo Vincent Martin)

- ➔ Dignes de rétention d'eau inutiles
- ➔ Possibilité de réduire les risques de génération d'acidité
- ➔ Récupération et recyclage de l'eau (filtration)

Nouvelles Pratiques

Nouvelles techniques de gestion des résidus miniers

15

□ Dépôt en pâte de surface (DPS)

■ Ajout de liant

- ➔ Augmentation de la stabilité physique (gain de cohésion)
- ➔ Réduction des risques de génération d'acidité (résidu saturé)
- ➔ Réduction de la perméabilité
- ➔ Stabilisation chimique de certains métaux

Faible taux de liant nuit aux performances environnementales

■ Ajout ponctuel de liant (Ph.D de Thomas Deschamps, 2009) :

0	0
0	0
0	2
0	0
0	0
0	2
0	0
0	0
2	0
2	2

■ Ajout dans les couches inférieures :

- ➔ Volumes percolant à travers les résidus plus faible
- ➔ Oxydation moindre des résidus (résidus saturés)
- ➔ Capacité de neutralisation de l'acidité éventuellement générée

■ Couches cimentées intercalées :

- ➔ Encapsulation des résidus
- ➔ Faible diffusion de l'oxygène dans les résidu
- ➔ Faible percolation des eaux

Nouvelles Pratiques

Nouvelles techniques de gestion des résidus miniers

16

- Amendements Alcalins Cimentaires (Deschamps et al. 2008, Symposium sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda)
 - Restauration ou remédiation des parcs à résidus (anciens ou récents)
 - Recouvrement des parcs par un mélange de résidus et d'un amendement alcalin lors de la restauration
 - ➔ Neutralisation de l'acidité générée
 - Utilisation d'amendement cimentaire
 - ➔ Formation d'une couche imperméable en surface des parcs limitant la diffusion de l'oxygène et donc empêchant l'oxydation ultérieure des résidus
- Liants à base de sous-produits particulièrement pertinents
 - Pas besoin de développer de fortes résistances mécaniques
 - Possibilité d'utiliser des matériaux disponibles localement

Conclusions

17

- Remblayage minier = pratique incontournable pour l'exploitation des mines souterraines modernes
- Remblai en pâte cimentée
 - Généralisation de la technique à travers le monde
 - Bénéfices environnementaux et économiques
 - Permet une gestion intégrée des résidus miniers, notamment pour les résidus sulfureux
- Grande consommation de ciments (500,000 t/an)
 - **Liants à base de sous-produits industriels**
 - Réduction des coûts de remblayage et débouché économique pour les sous-produits valorisés
 - Bénéfices environnementaux importants (GES, matières 1^{ères}...)
- Transfert de la technologie pour le stockage en surface et la restauration/remédiation des parcs à résidus
 - Dépôt en pâte de surface
 - Amendement alcalins cimentaires

18

Questions/Réponses