

Évaluation de l'application de la gestion intégrée des résidus à la mine Doyon

Isabelle DEMERS^{1,2}, Mostafa BENZAAZOUA^{1,2}, Bruno BUSSIÈRE^{1,2}, Mamert MBONIMPA^{1,2},
Eliane FRIED^{1,2,4}, Annie BLIER³

1. Chaire CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers

2. UQAT, Rouyn-Noranda, Québec

3. IAM Gold Inc. Mine Doyon

4. Maintenant chez SNC Lavalin

Contacts : Isabelle.Demers@uqat.ca ou Mostafa.benzaazoua@uqat.ca ou Bruno.bussiere@uqat.ca ou Mamert.mbonimpa@uqat.ca
Eliane.fried@snclavalin.com ou Annie_blier@iamgold.com

Résumé

La gestion de résidus miniers générateurs de drainage minier acide est un aspect important dans une opération minière. Une gestion intégrée des résidus a été proposée; ce type de gestion permet, entre autres, la ré-utilisation des rejets du concentrateur. Ainsi, un circuit de flottation placé avant que le rejet du concentrateur chemine vers le parc à résidus permettrait de concentrer les minéraux sulfureux du rejet pour produire un concentré de sulfures et un rejet désulfuré. Le concentré de sulfures serait ensuite utilisé dans la préparation de remblai cimenté en pâte et retourné sous terre comme support de terrain. Les rejets désulfurés, n'étant plus générateurs d'acide, peuvent être utilisés comme matériaux de recouvrement pour les aires d'entreposage où on retrouve des résidus potentiellement générateurs de DMA. Cet article résume les travaux effectués en laboratoire visant à appliquer une gestion intégrée des résidus à la mine Doyon. Des essais en usine pilote ont permis de démontrer, en continu, la faisabilité du procédé de désulfuration par flottation. En effet, une récupération de sulfures d'environ 95 % a été obtenue en utilisant des amines comme collecteur (indifférent à la présence de cyanures), le rejet de flottation ayant approximativement 0,3% S. L'impact de l'ajout du concentré de sulfures au remblai cimenté en pâte a été évalué, et les résultats ont montré qu'il y a même une influence positive sur la résistance mécanique du remblai. Des essais de lixiviation sur le remblai en pâte ont démontré que le remblai contenant du concentré de sulfures a un comportement environnemental similaire au remblai fait avec les rejets totaux. Finalement, des travaux réalisés en laboratoire ont prouvé que le rejet désulfuré utilisé comme matériau de recouvrement permet de prévenir la production de DMA d'un parc à résidus générateur d'acide.

Abstract

Management of acid mine drainage generating tailings is an important issue for operating mines. An integrated tailings management scenario was proposed to reduce the costs associated with tailings management by, among others, the

re-use of concentrator tailings. A sulphide flotation circuit placed before the concentrator tailings disposal in the tailings impoundment would produce a sulphide-rich concentrate and desulphurized (low sulphide) tailings. The concentrate could be used as a component of cemented paste backfill and returned underground for ground support. The low sulphide tailings, non acid generating, could be used as cover material to be placed over potentially acid-generating tailings storage areas. The article summarizes laboratory work on the application of integrated tailings management for Doyon mine. Pilot scale tests confirmed the feasibility of tailings desulphurization by flotation. A sulphide recovery of approximately 95% was achieved with amine collectors (insensitive to cyanide); the flotation tailings having approximately 0.3% S. The impact of the addition of sulphide concentrate into paste backfill was evaluated, and results confirmed that there is even a positive impact on mechanical strength. Leaching tests performed on paste backfill showed that paste made with sulphide tailings has a similar environmental behaviour as paste made with total tailings (before desulphurization). Finally, laboratory work confirmed that desulphurized tailings used as cover material over acid generating tailings can prevent the production of acid mine drainage.

Introduction

Les opérations minières doivent prévoir un plan de restauration du site minier bien avant l'arrêt des opérations, et même à l'étape de préfaisabilité pour des nouveaux projets. Ce plan de fermeture inclut la gestion des résidus miniers qui, dans certains cas, peuvent être générateurs d'acide. La gestion responsable de ces résidus générateurs d'acide est importante pour prévenir la contamination de l'environnement par du drainage minier acide (DMA) chargé en métaux dissous. Plusieurs méthodes de contrôle du DMA, consistant pour la plupart à placer une barrière à l'eau et/ou à l'oxygène, peuvent être appliquées à la fermeture du site (e.g. MEND 2001). Ces approches sont cependant souvent coûteuses à implanter. Une nouvelle approche intégrée a récemment été proposée; elle permet de gérer les rejets de concentrateur générateurs d'acide

durant l'opération et, ainsi, de réduire les travaux à effectuer à la fermeture du site (Benzaazoua et al. 2008). La gestion intégrée des résidus en amont consiste à retirer une partie des minéraux sulfureux des rejets du concentrateur pour en faire une fraction non génératrice d'acide et un concentré de sulfures qui, lui, a un volume nettement plus faible que celui initial. Ce concentré de sulfures peut être intégré au remblai cimenté en pâte et retourné sous terre comme support de terrain (Bois et al. 2005). La fraction désulfurée, étant non génératrice d'acide, peut ainsi soit être disposée dans un parc à résidus, ou soit être utilisée comme matériau de recouvrement pour la restauration de parcs à résidus générateurs de DMA. Les avantages de cette approche sont nombreux (Bois et al. 2005) :

- Volume de rejets problématiques diminué ;
- Très peu ou pas d'effluent acide à traiter ;
- Restauration simplifiée des parcs à résidus non générateurs d'acide ;
- Possibilité de produire sur le site même le matériau de recouvrement pour une barrière sèche ;
- Coûts de restauration étalés sur une grande période de temps plutôt qu'à la fermeture ;
- Avantages liés à l'utilisation du remblai cimenté en pâte.

Ce système de gestion intégrée des résidus est présentement implanté dans quelques sites au Canada, par exemple au site Onaping de Xstrata (Martin and Fyfe 2007). La désulfuration des rejets renfermant de la pyrrhotite y est

faite par gravimétrie (hydrocyclone), la partie fine ayant entre 0,4 et 1 % sulfures est utilisée comme couverture sur les résidus générateurs d'acide, tandis que la partie grossière ayant entre 2 et 3 % sulfures est utilisée comme remblai souterrain.

L'approche de gestion intégrée des résidus a été évaluée pour le site de la mine Doyon, propriété d'IAM Gold Inc. Durant l'étude, la mine Doyon traitait environ 3 000 tonnes par jour de minerai d'or par broyage et cyanuration. Les rejets du concentrateur renfermant environ 5 % sulfures (essentiellement de la pyrite) étaient en partie déposés dans le parc à résidus (environ 40 %) et en partie retournés sous terre sous forme de remblai cimenté en pâte (environ 60 %). Le plan de fermeture de la mine Doyon prévoyait l'ennoiement des résidus, ainsi, des digues conçues à cet effet ont été installées autour des parcs #2 et #3. Cependant, la mine Doyon veut réviser son plan de fermeture et désire exclure l'ennoiement comme méthode de restauration, à cause des risques à long terme reliés principalement à la stabilité physique des digues. Deux principaux facteurs ont encouragé la mine Doyon à réviser son plan de restauration : 1) la capacité maximale des parcs à résidus est presque atteinte ; 2) les rejets de concentrateur sont générateurs de DMA. La mine Doyon a démontré de l'intérêt pour le concept de gestion intégrée des résidus qui permettrait de produire un matériau pour la construction d'un recouvrement (barrière à l'oxygène) au-dessus des parcs à résidus. Le nouveau concept

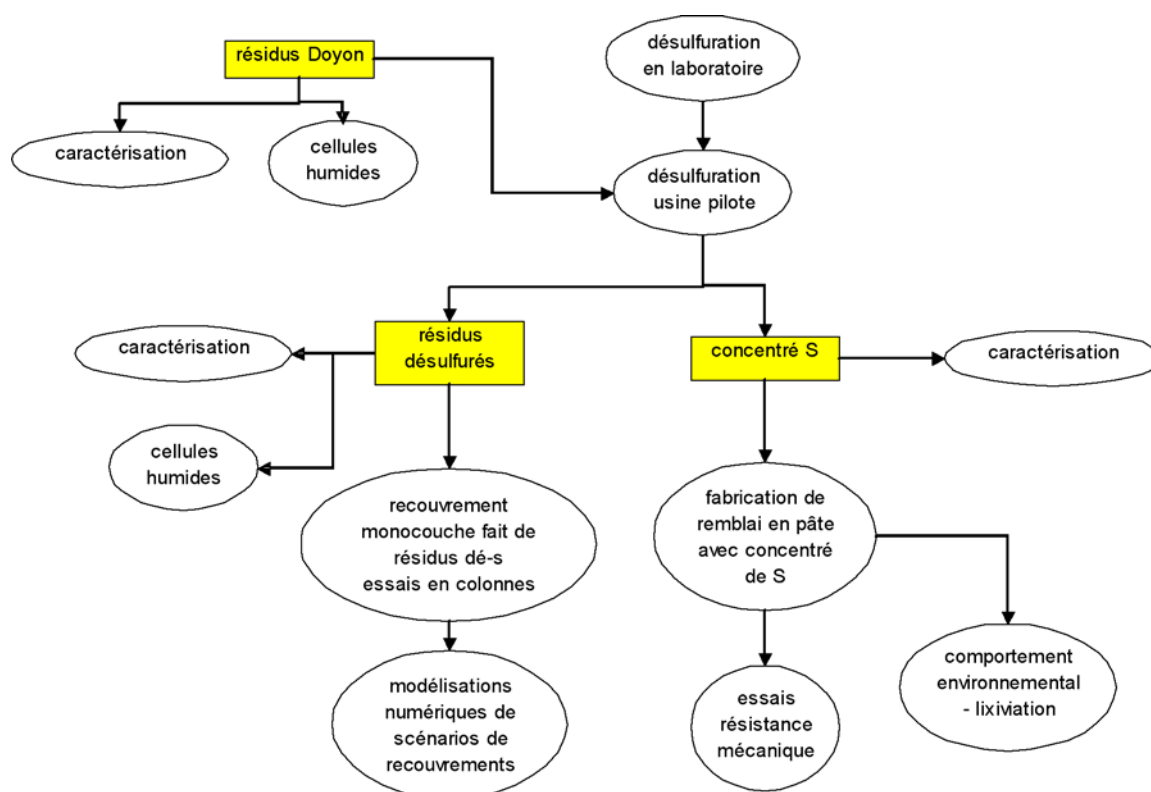


Figure 1 : Processus d'évaluation de l'application de la gestion intégrée des résidus à la mine Doyon

augmenterait aussi significativement la quantité de résidus (désulfurés ou non) que les parcs peuvent contenir ; en effet, l'épaisseur d'eau et la revanche nécessaire dans le cas d'un recouvrement aqueux ne seront plus requis, ce qui représente un volume de 4,4 millions de m³ pour le cas de la mine Doyon. Spécifiquement, l'approche suggérée et évaluée pour le cas de la mine Doyon implique l'ajout d'un circuit de désulfuration par flottation des sulfures pour produire le matériel désulfuré en guise de matériau de recouvrement, ainsi que l'utilisation du concentré de sulfures dans la fabrication du remblai cimenté en pâte à l'usine de remblai existante. La méthode de restauration proposée pour les parcs à résidus générateurs d'acide est un recouvrement monocouche fait de rejets désulfurés avec élévation du niveau de la nappe phréatique.

L'étude présentée dans cet article décrit la démarche expérimentale utilisée pour effectuer l'évaluation de l'application de la gestion intégrée des résidus à la mine Doyon. L'emphase est mise sur la méthodologie et les outils utilisés pour une telle évaluation. Des résultats pertinents sur le cas spécifique de la mine Doyon sont aussi présentés, suivis des recommandations pour la suite des travaux.

Approche expérimentale

L'objectif principal de l'étude était de vérifier, en laboratoire principalement, dans quelles conditions la gestion intégrée des résidus est applicable au cas de la mine Doyon. En premier lieu, la *figure 1* présente toutes les étapes effectuées pour remplir cet objectif. Chacune des étapes est décrite plus en détails dans les paragraphes suivants. Notez que dans ce schéma, les matériaux (résidus) sont encadrés et les travaux sont encerclés.

Caractérisation

Au départ, les résidus provenant du concentrateur ont été caractérisés. Le même type de caractérisation a été effectué sur les résidus désulfurés et le concentré de sulfures suite à l'étape de désulfuration. Cette caractérisation complète comprend :

- l'analyse chimique des solides par digestion complète avec HNO₃/Br₂/HF/HCl suivie d'analyse ICP-AES, analyse des sulfates par extraction dans HCl dilué à 40 % ;
- l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) avec analyse quantitative utilisant la méthode de Rietveld avec le logiciel TOPAS (Rietveld 1993) ;
- le potentiel de génération d'acide évalué à l'aide de la méthode Sobek modifiée (PA calculé selon le %S et PN évalué par titration) (Lawrence and Scheske 1997) ;
- la distribution granulométrique évaluée à l'aide d'un analyseur de particules au laser (Malvern Mastersizer) ;
- la densité relative déterminée avec un pycnomètre à hélium ;

- la conductivité hydraulique saturée déterminée à l'aide d'un essai au perméamètre à parois rigides selon la norme ASTM D5084 ;
- la courbe de rétention d'eau obtenue par un essai avec cellule Tempe en s'inspirant de la norme ASTM D3152.

Quelques résultats des caractérisations sont présentés dans la section des résultats. L'objectif d'une caractérisation aussi exhaustive est de bien connaître le matériau en question pour pouvoir mieux adapter les procédés subséquents, ainsi que de prédire son comportement à long terme. En ce sens, les essais en cellules humides (norme ASTM D5744-96) ont été utilisés pour vérifier le potentiel de génération d'acide des rejets actuels du concentrateur et des rejets désulfurés. L'essai en cellule humide consiste à placer 1 kg de résidu dans une cellule en plexiglas et de faire subir à ce résidu des cycles de rinçage et séchage d'une durée de 7 jours. Plus de détails sur cette procédure sont disponibles dans Benzaazoua *et al.*, (2008).

Désulfuration

L'objectif de la désulfuration environnementale est de rendre le rejet non générateur d'acide. Ceci est considéré atteint lorsque le rejet de désulfuration a un potentiel de neutralisation PN plus élevé que le potentiel d'acidité PA (Benzaazoua *et al.* 1998). Pour ce faire, il faut extraire une quantité suffisante de minéraux sulfureux des rejets. Plusieurs méthodes ont été évaluées pour effectuer la désulfuration (ex. Humber 1997; Bussière *et al.* 1998); cependant, la flottation directe des sulfures est généralement la plus appropriée (Benzaazoua *et al.* 2000).

Une fois bien caractérisés, les rejets de la mine Doyon ont été désulfurés par flottation. Les premiers essais, qui ont été effectués en laboratoire, ont permis de déterminer les conditions optimales de flottation pour ce rejet. Une cellule Denver de 2,5 L a été utilisée pour traiter une pulpe d'un pourcentage solide de 35 % pendant 10 minutes, avec du MIBC comme moussant. Le dosage et le type de collecteur a été déterminé par ces essais; le KAX et l'Armac-C (amine à 12 carbones) ont été évalués à cette échelle (plus de détails sur les réactifs dans Kongolo *et al.* 2004).

Les essais de flottation à l'échelle pilote ont été effectués à l'aide du banc de flottation mobile de l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM). Le banc de flottation, présenté à la *figure 2*, a été installé à la sortie du concentrateur, de manière à obtenir des rejets frais à un débit de 3 L/min. Six cellules mécaniques de 10 L chacune sont instrumentées pour des mesures continues de pH et Eh. Les essais avec le banc de flottation ont permis d'étudier différents paramètres, tels que le dosage de collecteur, le débit de pulpe, les points d'addition de collecteur, la présence de moussant, etc. Ces essais ont aussi permis de produire les quantités de rejet désulfuré et de concentré de sulfures pour les étapes suivantes, soit

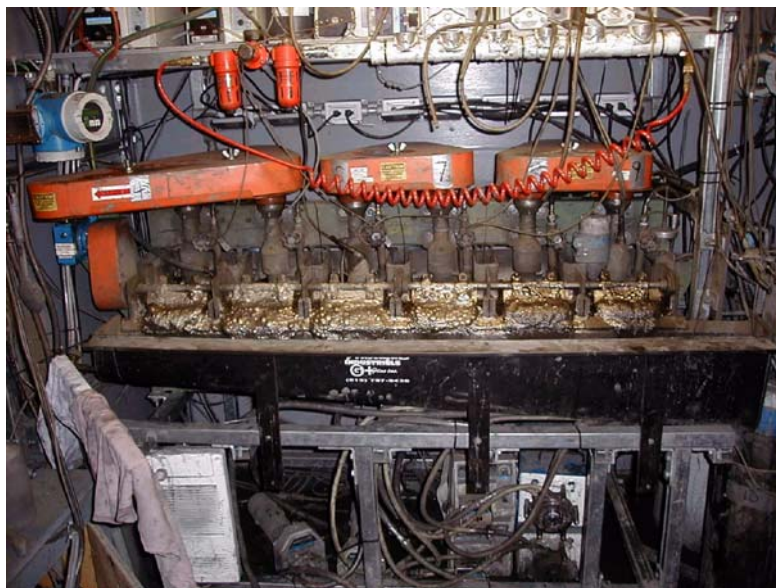


Figure 2 : Banc de flottation mobile de l'URSTM.

l'étude sur l'impact de l'ajout de concentré de sulfures dans le remblai en pâte et l'étude sur l'utilisation du rejet de désulfuration comme matériau de recouvrement pour limiter la production de DMA.

Recouvrement monocouche fait de rejets désulfurés

Les rejets désulfurés ont été caractérisés tel que décrit dans la section « caractérisation ». Cette caractérisation a montré que ces rejets désulfurés sont non générateurs d'acide, et qu'ils possèdent les caractéristiques géotechni-

ques appropriées pour être utilisés en remplacement de matériaux naturels (Aubertin et al. 1995 ; Aubertin et al. 1997 ; Ricard et al. 1997 ; Bussière et al. 2004). Il a alors été proposé d'utiliser ces résidus comme matériau de recouvrement pour les parcs à résidus potentiellement générateurs d'acide présents sur le site de la mine Doyon. Une couverture faite de rejets préalablement désulfurés, combinée au maintien élevé du niveau de la nappe phréatique dans les rejets générateurs d'acide (les digues relativement étanches des parcs # 2 et #3 permettent de contrôler le niveau de la nappe phréatique) (ex : SENES 1996 ; Ouangrawa et al. 2005), permettrait de réduire de façon significative la diffusion de l'oxygène et, conséquemment, préviendrait l'oxydation des minéraux sulfureux. En effet, en gardant les résidus générateurs d'acide saturés ou très près de la saturation, l'oxydation de la pyrite est fortement réduite et aucune (ou très peu) acidité n'est produite.

Le programme expérimental réalisé à cette fin comprend l'évaluation au laboratoire de l'efficacité de systèmes de recouvrements monocouches faits de rejets désulfurés, placés sur des rejets générateurs d'acide. Ainsi, 11 colonnes instrumentées simulant un recouvrement sur des rejets générateurs d'acide ont été mises en place. Les colonnes contenaient toutes à la base 30 cm de rejet générateur d'acide de la mine Doyon ; les recouvrements sont différents selon la colonne. Les paramètres qui ont été évalués dans cette étude sont : 1) l'épaisseur du recouvrement (50 cm et 1 m) ; 2) le niveau de la nappe phréatique (à la surface des rejets générateurs d'acide et 1,3 m sous la surface de ces rejets) ; 3) la teneur en sulfures du recouvrement (0,3 et 1,2 %). Deux types de colonne témoin sans recouvrement ont été installées, soit

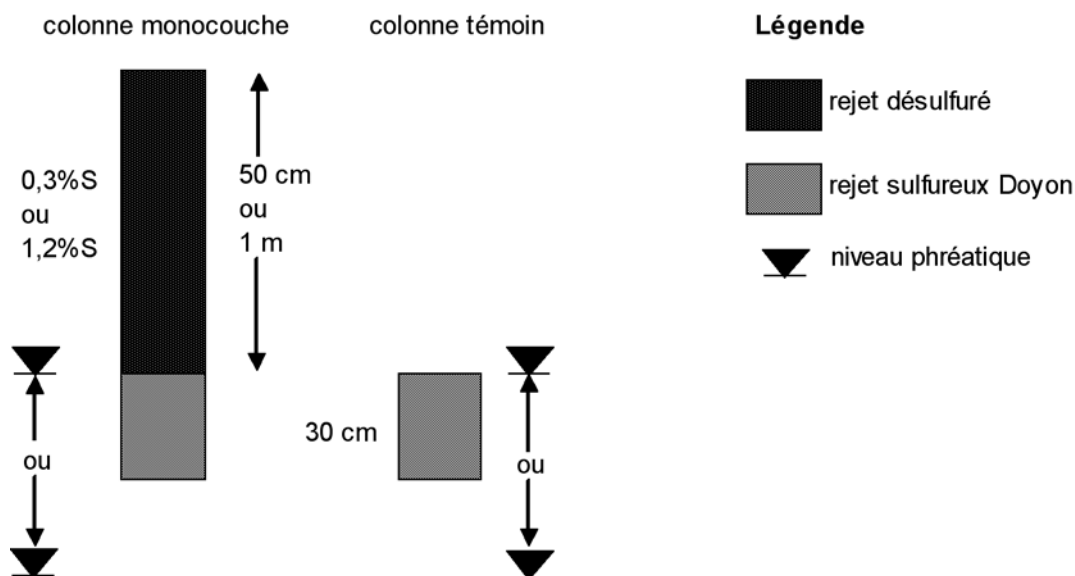


Figure 3 : Configuration des colonnes instrumentées pour l'évaluation de la performance de recouvrements monocouches faits de résidus désulfurés de la mine Doyon

une avec la nappe phréatique à 1,3 m sous la surface des rejets, et l'autre avec la nappe phréatique au niveau de la surface des rejets (rejets saturés), voir la *figure 3*. De plus, deux colonnes servant de comparaison avec d'autres techniques de restauration quant à l'efficacité à prévenir le DMA ont été montées : un recouvrement d'un mètre d'eau et un recouvrement multicouche de type CEBC ayant sa couche de rétention d'eau faite de rejets désulfurés. Trois colonnes sont doublées, afin de valider les résultats obtenus. Une analyse statistique a permis de conclure que les résultats des essais en colonnes sont valables et répétables lorsque la procédure de montage et de suivi est bien effectuée (Demers et Bussière, 2008).

L'essai en colonne consiste à alterner des périodes de mouillage et de séchage. Pour ce faire, un rinçage périodique (après 4 semaines de séchage) est effectué avec 2 litres d'eau déionisée. Durant ce rinçage, le drainage de la colonne est forcé pour recueillir le lixiviat au bas de la colonne. Suite au rinçage (durée d'environ 1 semaine), la colonne est laissée ouverte à l'air ambiant et le niveau phréatique est rétabli, pour une période de 4 semaines. Différentes mesures sont effectuées sur les colonnes :

- Mesures hebdomadaires de succion, à l'aide de tensiomètres et de capteurs de pression positionnés en haut et au bas du recouvrement ;

- Mesures hebdomadaires de la concentration d'oxygène et du dioxyde de carbone dans des échantillons d'air interstitiel retiré avec une seringue à partir de ports installés à des intervalles de 10 cm sur la hauteur du recouvrement. Les gaz ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse (Agilent MicroGC) ;

- Mesures de consommation d'oxygène aux deux semaines, selon la méthode développée par Elberling *et al.*, (1994) ;

- Analyse géochimique du lixiviat des colonnes recueillies une fois par mois, suite à l'ajout de 2L d'eau déionisée au-dessus de chaque colonne. Cette analyse inclut le pH, le Eh, la conductivité, les métaux dissous, l'alcalinité et l'acidité.

L'essai en colonnes instrumentées a duré 13 mois. À la fin de l'essai, les colonnes ont été méticuleusement démantelées, et des analyses post-démantèlement selon un profil vertical ont été effectuées. Il s'agit de l'analyse chimique des solides (incluant les sulfates), du potentiel de neutralisation, de la minéralogie et de la granulométrie. Plus de détails sur la mise en place des colonnes sont disponibles dans Demers et Bussière (2008).

Suite aux essais en laboratoire, des modélisations numériques du mouvement des fluides ont été effectuées pour optimiser de façon préliminaire le scénario de restauration pour la mine Doyon. Le modèle a été établi en une dimension à l'aide du logiciel Vadose/W, qui simule le transport de l'eau, de la chaleur et des gaz dans un milieu plus ou moins saturé et réactif à l'oxygène. Les propriétés des

matériaux utilisées dans le développement du modèle provenaient des caractérisations faites sur les matériaux de la mine Doyon, et les conditions climatiques utilisées étaient celles mesurées à l'aéroport de Rouyn-Noranda (23 km du site Doyon).

Dans un premier temps, le modèle a été validé avec les résultats issus des essais en colonne en laboratoire. Les profils de concentration d'oxygène et de succion, ainsi que les flux d'oxygène simulés correspondaient bien aux valeurs mesurées. Les résultats détaillés de cette validation sont disponibles dans Demers *et al.* (2008a). Suite à cette validation, différents scénarios de recouvrement monocouche ont été établis. Trois paramètres ont été variés durant les modélisations : le niveau de la nappe phréatique (à la surface des rejets générateurs d'acide, 75 cm sous l'interface rejets-recouvrement, 1,5 m sous l'interface rejets-recouvrement) ; l'épaisseur du recouvrement (50 cm, 75 cm, 1 m) ; et la teneur en sulfures dans le recouvrement (0,3, 0,6, 0,8 %). Les modélisations ont été effectuées pour une période d'un an avec des conditions climatiques normales. Certaines modélisations ont aussi été faites en incluant une période de sécheresse estivale. L'étape de modélisation a permis de proposer un scénario préliminaire de recouvrement fait de rejets désulfurés pour le cas de la mine Doyon.

Remblai en pâte

Le remblai cimenté en pâte est un matériau composé de résidus miniers, de ciment (et/ou autres liants) et d'eau, qui est retourné sous terre pour remblayer les chantiers miniers (vides) dont l'exploitation est terminée. Le remblai en pâte agit comme support de terrain et permet de récupérer le minerai contenu dans les piliers, tout en diminuant le volume de rejets de concentrateur à entreposer en surface. Dans le cadre d'une gestion intégrée des résidus, l'utilisation du remblai est un choix approprié. Combiné avec la désulfuration environnementale, il constitue une façon intéressante d'entreposer le concentré de sulfures. En effet, environ 60 % des rejets de concentrateur sont retournés sous terre sous forme de remblai en pâte à la mine Doyon. Les essais effectués visaient à évaluer l'influence de l'ajout de concentré de sulfures dans la fabrication du remblai en pâte d'un point de vue de la résistance mécanique et du comportement environnemental.

La première étape consistait à préparer le remblai en pâte. La recette actuelle de la mine Doyon a été utilisée comme référence, soit un liant composé d'un mélange 30:70 de ciment Portland et scories à une proportion de 5 % (par masse de rejets secs). Trois types de rejets ont été évalués : 1) les rejets complets (actuels) de la mine Doyon ; 2) le concentré de désulfuration; et 3) un mélange 50:50 de ces deux matériaux. Le taux d'affaissement (consistance) au cône était de 16,5 cm pour les trois types de pâte produite. Le curage a été effectué dans une chambre à température et humidité contrôlées (environ 90 % humidité à 20°C) pendant 14, 28 et 90 jours. La méthode de préparation et

de curage des échantillons de remblai en pâte suivie est celle utilisée à l'URSTM-UQAT depuis plusieurs années (Benzaazoua et al. 1999).

Une fois les échantillons de remblai en pâte curés, ils sont soumis à l'essai de compression uniaxiale à l'aide d'un appareil MTS (capacité de 50 kN, taux de déformation de 0,1 mm/min). Les échantillons sont ensuite soumis à un essai de lixiviation intensive dans des mini-cellules d'altération, selon la procédure développée par Cruz et al. (2001). Cet essai implique la lixiviation d'une petite quantité de solides (67 g) par 50 mL d'eau déionisée deux fois par semaine, tout en étant exposé à l'air ambiant, et ce, durant environ 25 semaines. Les mini-cellules d'altération ont permis d'évaluer la stabilité des éléments chimiques dans la matrice des remblais en pâte étudiés.

Résultats

Dans cette section, quelques résultats pertinents sont présentés de façon synthétisée. Le lecteur intéressé par les résultats complets est prié de consulter les publications suivantes : Benzaazoua et al. (2008), Demers (2008), Demers et al. (2008b).

Caractérisation

Le tableau 1 présente une partie des résultats de la caractérisation des rejets provenant du concentrateur de la mine Doyon, des rejets désulfurés avec le banc pilote et du concentré de sulfures.

Les rejets de la mine Doyon ont une teneur en sulfures plutôt faible (3,6 %), mais comme ils contiennent très peu de minéraux neutralisants (PN = 19,8 kg CaCO₃/t), ils sont tout de même générateurs d'acide. Cet aspect a été

vérifié par les essais en cellules humides et les essais en colonnes (colonne témoin sans recouvrement). Les essais en colonne ont permis d'observer une baisse significative du pH, qui a atteint des valeurs sous 4 après environ 450 jours. L'essai en cellule humide étant d'une durée plus courte et ayant des cycles de mouillage – séchage aussi plus courts, il n'a pas pu permettre d'observer la génération d'acide par le rejet Doyon. Un autre critère utilisé pour déterminer le potentiel de génération d'acide est la courbe d'oxydation/neutralisation (Benzaazoua et al. 2004), présentée à la figure 4 pour les rejets Doyon et désulfurés, obtenue à partir des résultats des essais en colonnes. Ce graphique présente les concentrations de calcium, magnésium et manganèse présents dans le lixiviat, représentant la dissolution des minéraux neutralisants, versus les concentrations de sulfates dans le lixiviat, représentant l'oxydation des minéraux sulfureux. Les concentrations mesurées au laboratoire sont extrapolées sous la forme d'une droite. La composition initiale des matériaux est ensuite placée dans le plan de la courbe d'oxydation/neutralisation extrapolée. Le critère stipule que, si la

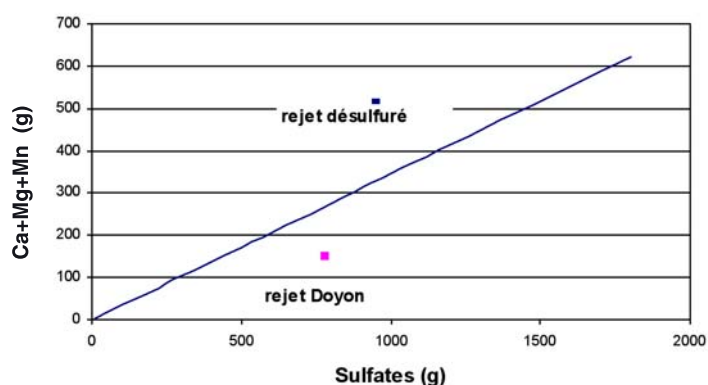


Figure 4 : Courbe de neutralisation obtenue à partir des résultats des essais en colonnes pour les rejets Doyon et désulfurés.

	Rejets Doyon	Rejets désulfurés	Concentré de sulfures
Fe (%poids)	4,8	1,59	7,33
Zn (%poids)	0,013	0,004	0,033
Cu (%poids)	0,063	0,017	0,075
S (%poids)	3,6	0,25	5,65
Ca (%poids)	1,3	1,1	1,24
Minéralogie (%poids)	Quartz (50 %) ; muscovite (25 %) ; albite (7 %) ; pyrite (6,5 %) ; chlorite (3,8 %) ; actinolite (3,8 %) ; calcite (2,5 %) ; dolomite (0,56 %)	Quartz (62 %) ; muscovite (25%) ; albite (3,6 %) ; chlorite (2,7 %) ; actinolite (2,1 %) ; calcite (2,1 %) ; dolomite (1,4 %) ; pyrite (0,54 %)	Quartz (32 %) ; muscovite (47 %) ; pyrite (11 %) ; chlorite (4,5 %) ; albite (3 %) ; actinolite (1,4 %) ; gypse (1,4 %)
D ₅₀ (µm)	21,29	28,11	12,62
Particules < 2 µm (%)	4,6	4,0	7,0
PA (kgCaCO ₃ /t)	106,8	6,3	176,6
PN (kgCaCO ₃ /t)	19,8	25	n.d.
PNN (kgCaCO ₃ /t)	-87,0	18,7	n.d.

Tableau 1 : Caractérisation des matériaux.

concentration initiale se situe dans la zone au-dessus de la courbe, les minéraux sulfureux seront épuisés avant les minéraux neutralisants, alors le rejet ne sera pas générateur d'acide. Dans le cas contraire, c'est-à-dire la concentration initiale sous la courbe, les minéraux neutralisants seront épuisés avant les minéraux sulfureux, ce qui rend le rejet potentiellement générateur d'acide. Selon la *figure 4*, le rejet de Doyon est potentiellement générateur d'acide, tandis que le rejet désulfuré est non générateur d'acide, ce qui confirme les résultats des essais statiques et cinétiques.

Désulfuration

Les essais de désulfuration en laboratoire ont été faits avec différents dosages de KAX sur de la pulpe, dont les cyanures ont été éliminés. Les meilleurs résultats ont été obtenus sur de la pulpe décyanurée par le procédé SO₂-air, avec 80 g/t de collecteur. Le rejet désulfuré obtenu avait 0,16 % S, et la récupération de masse au concentré était de 13 %. Des essais avec le collecteur Armac-C sur la pulpe de Doyon, peu affecté par la présence de cyanures, ont donné les meilleurs résultats à un dosage de 60 et 80 g/t, pour une teneur de 0,20 % S et une récupération de masse de 25 à 27%. La teneur en sulfures résiduels du rejet désulfuré était plus élevée qu'avec le KAX, ainsi que la masse du concentré, ce qui indique une plus grande dilution du concentré. Par contre, les teneurs en sulfures obtenues pour le rejet désulfuré sont considérées assez faibles pour garantir un rejet désulfuré non générateur d'acide. Ainsi, les essais avec le banc pilote ont été effectués avec un collecteur de type amine.

Les essais à l'échelle pilote effectués à l'aide du banc de flottation mobile ont permis de confirmer les résultats obtenus en laboratoire et d'optimiser le dosage de collecteur. La concentration optimale de collecteur était de 80 g/t d'Armeen-C (forme modifiée de l'Armac-C résistante aux températures froides, équivalent à 100 g/t d'Armac-C), ce qui produit un rejet désulfuré à moins de 0,4 % S et une récupération de la masse au concentré d'environ 15 %. Les rejets désulfurés et le concentré produits ont été utilisés

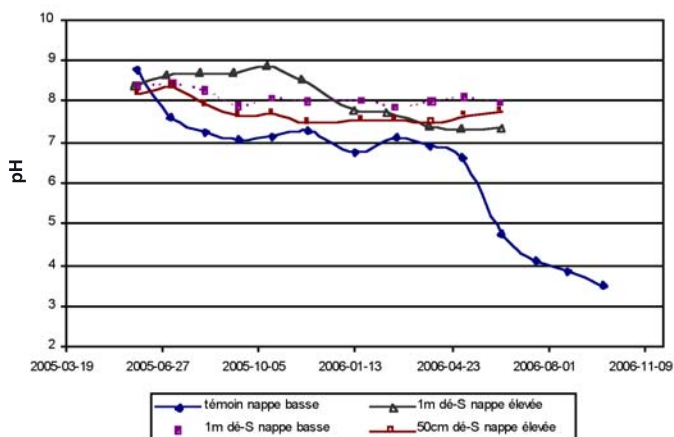


Figure 5 : Évolution du pH des différentes configurations de colonnes.

dans les travaux subséquents.

Recouvrement monocouche fait de rejets désulfurés

Un des objectifs des essais en laboratoire de scénarios de recouvrement utilisant les rejets désulfurés était de vérifier la performance de ce type de recouvrement par rapport à des recouvrements déjà reconnus pour leur efficacité. Le premier aspect évalué est la qualité de l'eau d'exfiltration des colonnes instrumentées contenant les rejets recouverts. Tous les lixiviats des colonnes avec un recouvrement monocouche, multicouche ou en eau, répondaient à la directive 019 sur la qualité des effluents miniers (norme gouvernementale du Québec), pour une épaisseur de recouvrement autant de 50 cm que d'un mètre. Leur pH est resté au-dessus de 8 durant les 13 mois de l'essai, tel que présenté à la *figure 5*, et les concentrations de fer, zinc et cuivre sont restées sous les valeurs prescrites par la norme.

Pour comparer les différents recouvrements entre eux, la notion d'efficacité a été introduite. Il s'agit de calculer l'efficacité d'un recouvrement à retenir les métaux, par rapport au cas d'une colonne témoin sans recouvrement. L'équation 1 présente la méthode de calcul utilisée :

$$Efficacité_{Zn} = \left(1 - \frac{\text{masse}_{Zn} \text{ lixiv recouvert}}{\text{masse}_{Zn} \text{ lixiv contrôle}} \right) \times 100 \quad [1]$$

Le *tableau 2* présente les résultats de l'efficacité à retenir le cuivre et le zinc. Il est intéressant de noter qu'un recouvrement monocouche d'un mètre fait de rejet désulfuré avec la nappe phréatique élevée est au moins aussi efficace qu'un recouvrement multicouche et que l'ennoisement pour le cas de la mine Doyon. Par contre, lorsque le niveau phréatique baisse, la performance du recouvrement est compromise.

configurations	Efficacité (%)	
	Zn	Cu
1m dé-S nappe élevée	98	99
1m dé-S 1,2%S nappe élevée	87	99
1m dé-S nappe basse	80	95
multicouche	93	98
ennoisement	97	99

Tableau 2 : Efficacité des recouvrements à atténuer le relargage du cuivre et du zinc.

La modélisation numérique a été utilisée pour suggérer un scénario de recouvrement préliminaire applicable au site de la mine Doyon. L'objectif était de déterminer la configuration optimale pour avoir un flux d'oxygène sous 10 mol/m²/an. Selon les essais en laboratoire, ce flux permet d'avoir un effluent non contaminé. Les résultats de la modélisation ont démontré qu'un recouvrement fait de

résidu désulfuré ayant entre 0,3 et 0,8% S d'un mètre d'épaisseur, avec le niveau de la nappe phréatique maintenu élevé (de la surface des résidus générateurs d'acide à environ 75 cm sous l'interface résidus-recouvrement) est un optimum préliminaire, et ce, en supposant des conditions climatiques normales, ainsi qu'en considérant un été particulièrement sec (le plus sec des derniers 20 ans). Une analyse plus poussée est recommandée avant d'implanter le recouvrement.

Remblai en pâte

Les résultats d'essais en compression uniaxiale sur les différents mélanges de remblai en pâte sont présentés à la figure 6. Le remblai fait avec du concentré de désulfuration est autant, sinon plus, résistant que le remblai fait avec les résidus actuels du concentrateur, avec des valeurs de résistance en compression après 90 jours de curage autour de

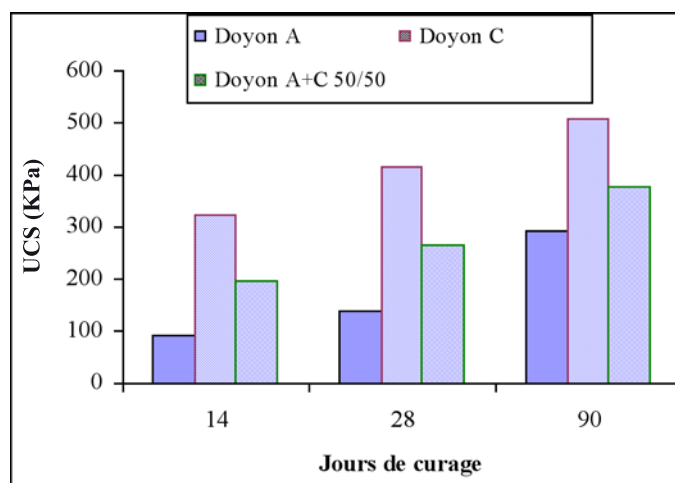


Figure 6 : Résultats des essais de compression uniaxiale sur les échantillons de remblai en pâte (Doyon A = rejets actuels, Doyon C = concentré de sulfures, Doyon A+C 50/50 = mélange à 50 % de rejets actuels et 50 % de concentré de sulfures).

500 kPa, 400 kPa et 300 kPa pour le remblai fait de concentré de sulfures, du mélange concentré/résidus, et des résidus totaux, respectivement. L'ajout de sulfures est donc bénéfique pour l'acquisition de résistance mécanique du remblai, possiblement par l'implication des sulfures dans le développement de la cohésion. (À noter que le comportement est somme toute peu performant; cela s'explique principalement par la minéralogie des résidus de la mine Doyon, qui renferment beaucoup d'argile). La possibilité d'attaque sulfatique n'a pas été observée dans cette étude.

De plus, les essais de lixiviation sur les échantillons de remblai en pâte ont démontré que le comportement environnemental (géochimique) n'est pas affecté par l'ajout de concentré de sulfures dans la pâte. Les résultats géochimiques complets sont présentés dans Benzaazoua *et al.* (2008). Le pH des deux types de remblai (fait avec du rejet Doyon [A] et concentré de sulfures [C]) est resté neutre durant toute la durée de l'essai (environ 7,5), et les concentrations en zinc dans l'effluent sont demeurées faibles, soit sous 0,15 mg/L, et similaires d'un remblai à l'autre. Le même type de résultats a été obtenu pour les autres éléments analysés.

Discussion

Les avantages de la gestion intégrée des résidus sont nombreux pour la mine Doyon. Le tableau 3 présente les caractéristiques de la gestion actuelle des résidus comparées à une éventuelle gestion intégrée, telle que celle proposée dans ce travail. Présentement, les résidus du concentrateur sont entreposés en surface de façon ennoyée, alors il n'y a pas de génération d'acide. Cependant, s'il y a une désaturation, les résidus peuvent produire du DMA. En intégrant la désulfuration, les résidus à entreposer en surface

Gestion actuelle des résidus à la mine Doyon	Gestion intégrée proposée pour la mine Doyon
Résidus sulfureux potentiellement générateurs d'acide entreposés en surface	Résidus désulfurés à entreposer en surface à la fin de la vie de la mine
Restauration des parcs à résidus avec de l'eau (ennoisement) ou avec des sols naturels (couverture)	Utilisation des résidus désulfurés comme matériau de recouvrement par-dessus les résidus générateurs d'acide
	Amélioration de la résistance mécanique du remblai en pâte avec l'ajout de concentré de sulfures
Coûts de restauration dépensés à la fin de la vie de la mine	Coûts pour installer et opérer le circuit de désulfuration; cependant coûts moins élevés à la fin de la vie de la mine
	Augmentation de la capacité d'entreposage des rejets dans le parc par rapport à l'espace nécessaire pour établir et entretenir le recouvrement d'eau (4,4 millions de m ³)

Tableau 3 : Caractéristiques de la gestion actuelle et de la gestion intégrée à la mine Doyon.

deviennent non générateurs d'acide, une fois à l'air libre. Pour la restauration des parcs à résidus, la gestion conventionnelle prévoit l'utilisation d'eau ou de sol naturel, tandis que dans la gestion intégrée, le matériau de recouvrement est fabriqué sur le site même, ce qui réduit les coûts de transport reliés à l'utilisation de sol naturel et évite d'impacter un autre site pour le prélèvement de matériel naturel (banc d'emprunt). L'addition de concentré de sulfures ne nuit pas (et est même bénéfique) à l'acquisition de résistance mécanique dans le remblai en pâte.

Conclusions

La gestion intégrée des résidus a été évaluée pour le cas de la mine Doyon. Divers essais en laboratoire et à l'échelle pilote ont démontré la faisabilité de la désulfuration par flottation pour le résidu de la mine Doyon. Par la suite, le concentré de sulfures a été intégré au remblai en pâte, et le résidu désulfuré a été évalué comme matériau potentiellement générateurs d'acide de la mine Doyon. Des caractérisations détaillées ont été effectuées sur tous les matériaux. Les résultats ont montré que le rejet, une fois désulfuré avec 100 g/t d'Armac-C, contient moins 0,4 %S et est donc non générateur d'acide. Ce rejet désulfuré peut servir de matériau de recouvrement pour prévenir la production de DMA d'un parc à résidus acidogène en remplacement de matériel naturel. Les essais en colonnes instrumentées, ainsi que les modélisations numériques, ont permis de conclure qu'un recouvrement d'un mètre de rejet désulfuré, avec élévation de la nappe phréatique à environ la moitié de la pression d'entrée d'air (AEV), prévient l'oxydation des sulfures contenus dans les rejets recouverts. Les essais de remblai en pâte ont montré que l'ajout du concentré de sulfures à la recette actuelle de remblai en pâte n'affecte pas négativement la résistance mécanique ni le comportement environnemental, même après 80 jours de curage.

La méthodologie d'évaluation a été appliquée à la mine Doyon, mais peut être adaptée à n'importe quel site intéressé par la gestion intégrée des résidus. Les avantages de cette méthode sont principalement l'entreposage en surface de résidus non générateurs d'acide et la déposition du concentré de sulfures sous terre dans le remblai en pâte. Les coûts du scénario proposé pour la mine Doyon seraient, selon une estimation sommaire, équivalents sinon plus bas que la restauration des parcs à la fin de la vie de la mine à l'aide de techniques conventionnelles.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier, pour leur soutien, les organismes ainsi que les personnes suivantes : programme RDC du CRSNG, le programme de bourses d'études supérieures à incidence industrielle du CRSNG, la mine Doyon, la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des résidus miniers, la Chaire de recherche du Canada sur la gestion intégrée des rejets miniers sulfureux par remblayage ainsi que les techniciens et le chimiste de l'URSTM.

Références

- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.-F., and Tremblay, L. 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. MEND report 2.22.2a.
- Aubertin, M., Bussière, B., Barbera, J.-M., Chapuis, R.P., Monzon, M., and Aachib, M. 1997. Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings. *In* 4th International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver, Canada, Vol.2, pp. 715-730.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., and Lelièvre, J. 1998. Flottation non sélective des minéraux sulphurés appliquée dans la gestion environnementale des rejets miniers. *In* Canadian Mineral Processors Ottawa, Canada, pp. 682-695.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Dagenais, A.M., and Archambault, M. 2004. Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology*, 46: 1086-1101.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., and Verburg, R. 1999. Cementitious backfill with high sulfur content: physical, chemical and mineralogical characterization. *Cement and Concrete Research*(29): 719-725.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., and Marion, P. 2000. Environmental desulphurization of four canadian mine tailings using froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 60: 57-74.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, E., and Blier, A. 2008. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, 21(4): 330-340.
- Bois, D., Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., and Poirier, P. 2005. A feasibility study on the use of desulphurized tailings to control acid mine drainage. *Cim Bulletin*, 98(1087): 74-74.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., and Mbonimpa, M. 2004. A laboratory study of covers made of low sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology*, 45: 609-622.

- Bussière, B., Benzaazoua, M., Lelièvre, J., Bois, D., and Servant, S. 1998. Valorisation des résidus miniers: une approche intégrée - Phase II. Rapport final soumis au Ministère des Ressources Naturelles du Québec, MEND Program, Rouyn-Noranda, Québec.
- Cruz, R., Méndez, B.A., Monroy, M., and Gonzalez, I. 2001. Cyclic voltammetry applied to evaluate reactivity in sulfide mining residues. *Applied Geochemistry*, 16: 1631-1640.
- Demers, I. 2008. Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide. Ph.D thesis, UQAT, Rouyn-Noranda, Canada.
- Demers, I., and Bussière, B. 2008. Repeatability evaluation of instrumented column tests in acid mine drainage prediction and cover efficiency evaluation. *In 61st Canadian Geotechnical Conference & 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*. Edmonton, Canada. September 21-24, 2008.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., and Blier, A. 2008a. Optimisation of single-layer cover made of desulphurized tailings: application to the Doyon mine tailings impoundment. *In SME annual meeting 2008*. Salt Lake City. 24 - 27 February.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., and Blier, A. 2008b. Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 21(4): 317-329.
- Elberling, B., Nicholson, R.V., Reardon, E.J., and Tibble, P. 1994. Evaluation of sulphide oxidation rates: a laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxidation product release. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 375-383.
- Humber, A.J. 1997. Separation of sulphide minerals from mill tailings. *Land Contamination and Reclamation*, 5(2): 109-116.
- Kongolo, M., Benzaazoua, M., De Donato, P., Drouet, B., and Barrès, O. 2004. The comparison between amine thioacetate and amyl xanthate collector performances for pyrite flotation and its application to tailings desulphurization *Minerals Engineering*, 17: 505-515.
- Lawrence, R.W., and Scheske, M. 1997. A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32(2): 100-106.
- Martin, J., and Fyfe, J. 2007. Innovative closure concepts for the Xstrata Nickel Onaping operations. *In Mining and the Environment IV Conference*. Sudbury, Ontario. October 19-27, 2007, p. 119.
- MEND 2001. MEND Manual, Report 5.4.2, Canmet, Ottawa, Canada.
- Quangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J.W., Zagury, G., and Bussière, B. 2005. An evaluation of the elevated water table concept using laboratory columns with sulphidic tailings *In GeoSask2005: 58th Canadian Geotechnical Conference and 6th joint IAH-CNC-CGS*. Saskatoon, Saskatchewan. September 18-21, 2005.
- Ricard, J.-F., Aubertin, M., Firlotte, F.W., Knapp, R., and McMullen, J. 1997. Design and construction of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères site, Malartic, Québec, Canada. *In 4th International Conference on Acid Rock Drainage*. Vancouver, BC, Vol.4, pp. 1515-1530.
- Rietveld, H.M. 1993. *The Rietveld Method*, R.A Young, Editor. Oxford University Press.
- SENES 1996. Review of the use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings, Report MEND 2.17.1, Richmond Hill.