

Restauration des sites miniers : ne pas répéter les erreurs du passé

Par : Bruno Bussière, ing, PhD
Titulaire de la chaire, UQAT



Chaire de recherche
industrielle CRSNG-UQAT en
restauration des sites miniers

Historique

- La contamination des eaux par l'interaction entre les rejets miniers et leur environnement ne date pas d'hier
- Georgius Agricola (1556) mentionne :

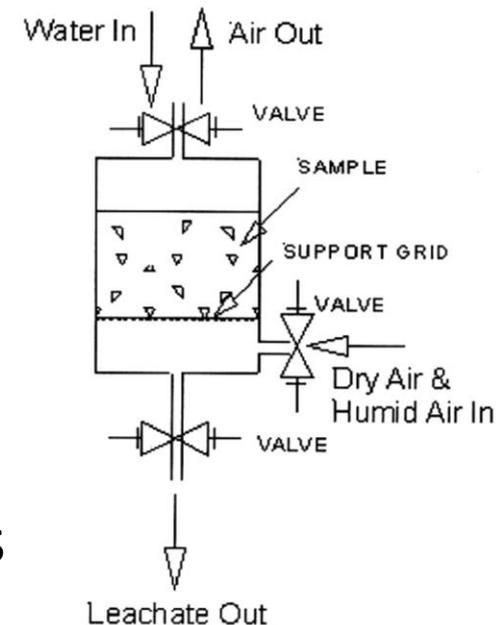
Further, when the ores are washed, the water which has been used poisons the brooks and streams, and either destroys the fish or drives them away.
- Malgré ces observations, le problème de la génération d'acide (DMA) a été identifié beaucoup plus tard



Historique

- La recherche sur le DMA a débuté dans les années 20 sur les matériaux provenant des mines de charbon des Appalaches (Payne, 1987)
- En parallèle, on s'est intéressé aux aspects fondamentaux du DMA tels que l'oxydation de la pyrite (Colmer and Hinckle 1947)
- On retrouve des informations sur les premiers tests de prédiction cinétiques de la qualité d'eau dans les années 40–50, toujours en lien avec les charbonnages des Appalaches (Braley, 1949)

HUMIDITY CELL



Villeneuve, 2004

Historique

- Quant aux essais plus qualitatifs de prédiction (essais statiques), les travaux ont débuté dans les années 70 (West Virginia University, 1971)
- Sachant les effets néfastes du DMA, on s'est également intéressé, dans les années 60–70, à son traitement avant le retour dans l'environnement (Kostanbeder and Haines, 1970)
- Encore une fois, la grande majorité de ces travaux a été réalisé au USA, en lien avec le DMA provenant des charbonnages

Historique

- Au Canada, on retrouve les premiers travaux où l'on indique des problèmes de DMA provenant de sites miniers au début des années 70 (Hawley and Shikaze 1971)
- Ces travaux étaient en lien avec les mines de métaux de l'Ontario (Hawley 1972)
- On commence à parler restauration à ce moment – restauration correspondant à la stabilisation des surfaces à l'aide de la végétation (Leroy 1973)



Historique

- À la fin des années 70, on en vient rapidement à la conclusion que revégéter ne règle pas le problème de génération de DMA (Moffet *et al.* 1977)
- C'est donc au début des années 80 que débute les travaux modernes sur la restauration des sites miniers générateurs de DMA
- Au Canada, la recherche a été concentrée principalement à travers les programmes RATS et MEND – partenariats fédéral/provincial/industrie (18 M\$ entre 1988-1998)

Historique

- Les mines d'avant les années 80 n'ont pas opéré en tenant compte de l'environnement



Site Manitou avant
restauration – drainage
minier acide (DMA)

Site Aldermac avant
restauration - DMA

Chaire industrielle Poly-UQAT



Historique

- Au Québec, on estime qu'il en coûtera entre 750 M\$ et 1,2 G\$ pour restaurer les sites miniers abandonnés, dont environ 70 % sont situés en A-T et dans le Nord du Québec
- Maintenant que nous connaissons mieux les problèmes, les entreprises minières doivent opérer en tenant compte de l'environnement et prévoir la fermeture avant même de débiter les opérations
- C'est ainsi que nous éviterons de répéter les erreurs du passé

Plan de la présentation

1. Problématique environnementale à contrôler
2. Principales méthodes de restauration existantes
3. Les besoins en recherche
4. Les futurs travaux de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers
5. Conclusion

Problématique

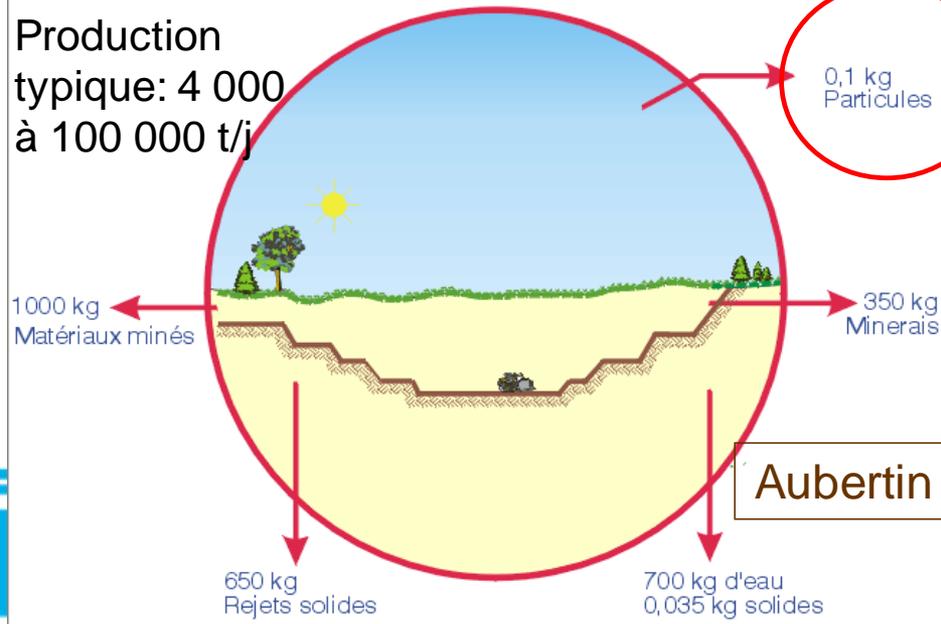
- Les principaux problèmes environnementaux de l'industrie minière (à l'étape d'exploitation ou de fermeture) sont liés aux rejets miniers
- Quels sont ces principaux rejets solides?
 - Les stériles miniers
 - Les résidus miniers (aussi appelés rejets de concentrateur)
 - Autres (boues de traitement, mort-terrain, etc.)
- Produits en quantités différentes selon le type d'exploitation (souterraine ou ciel ouvert)

Problématique

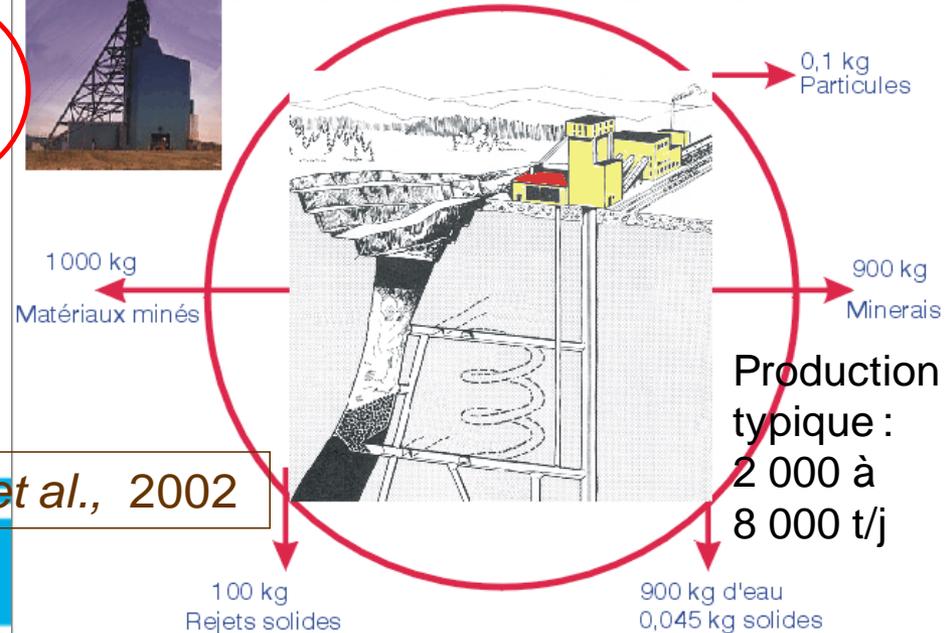
- Production de rejets
 - Production de stériles plus importante pour les mines à ciel ouvert : va dépendre du rapport stériles/minerai (typiquement de 1:1 à 6:1) – fonction du prix – et du tonnage
 - Rapport stériles/rejets > pour les mines souterraines

BILAN DE MATIÈRES PRODUIES
LORS D'OPÉRATIONS EN FOSSE

Production
typique: 4 000
à 100 000 t/j



BILAN DE MATIÈRES PRODUIES
LORS D'OPÉRATIONS SOUTERRAINES



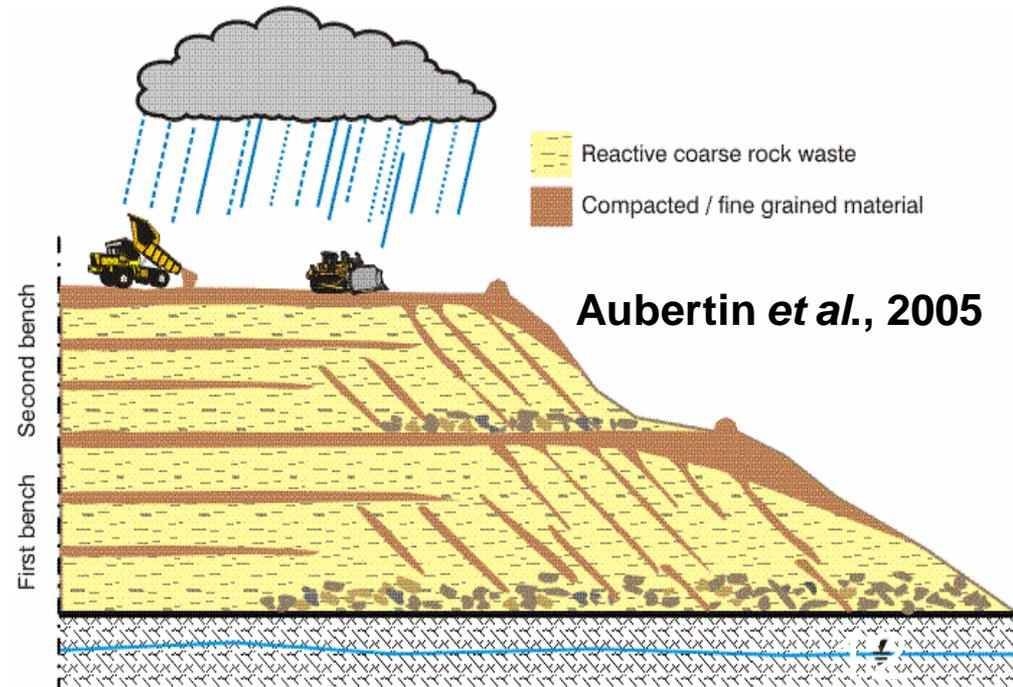
Aubertin *et al.*, 2002

Production
typique :
2 000 à
8 000 t/j

Problématique

- Particularités des haldes à stériles
 - Nappe phréatique basse
 - Matériaux grossiers hétérogènes
 - Perméabilité à l'eau et à l'air élevée

Rio Tinto Fer et Titane



Problématique

Les **résidus miniers** : transportés sous forme de pulpe jusqu'aux parcs à résidus

- Particularités :
 - Dans un état lâche et fortement saturé
 - Se consolident lentement en raison du mode de mise en place, de sa teneur en eau initiale et de sa faible conductivité hydraulique
 - Nappe phréatique près de la surface
 - Peut entraîner des problèmes de stabilité physique



Chaire industrielle Poly-UQAT

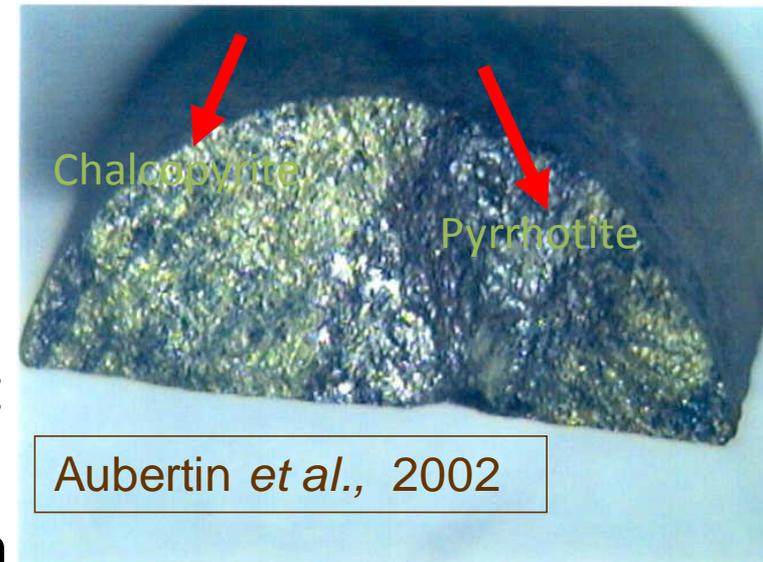


Problématique

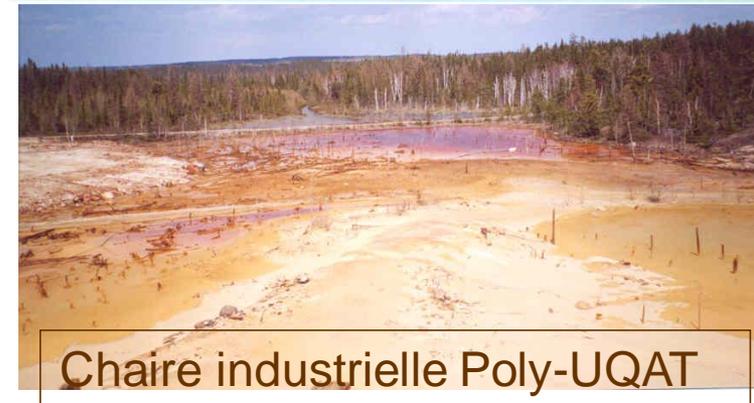
- Qu'est-ce qui fait qu'un site minier peut avoir des effets significatifs sur l'environnement?
 - Problèmes de stabilité physique (pas abordé ici)
 - Problèmes de stabilité chimique : drainage minier acide (DMA) et drainage minier neutre (DMN)
- Qu'est-ce que le DMA et le DMN?
 - Drainages miniers contaminés par des phénomènes géochimiques naturels – réactions entre certains minéraux des rejets et leur environnement

Problématique

- Drainage minier acide (DMA) :
 - Produit de l'oxydation naturelle (chimique, électrochimique ou biologique) de minéraux sulfureux que l'on retrouve dans les matériaux rocheux exposés à l'air et à l'eau
 - DMA = faible pH, concentrations en métaux lourds et en sulfates solubles élevées, grande concentration en solides dissous
 - Peut aussi avoir du drainage neutre contaminé (DNC)



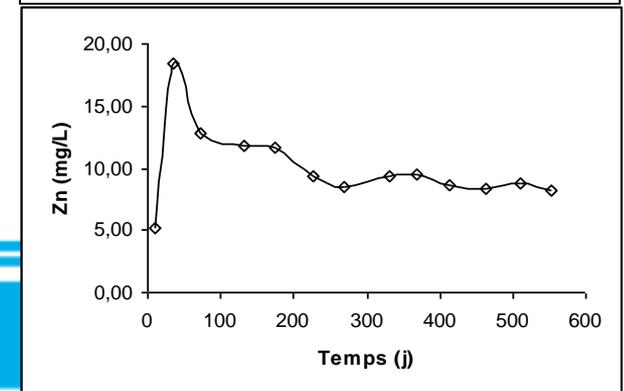
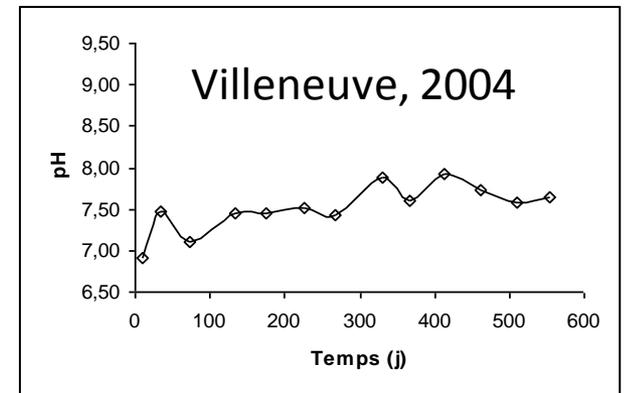
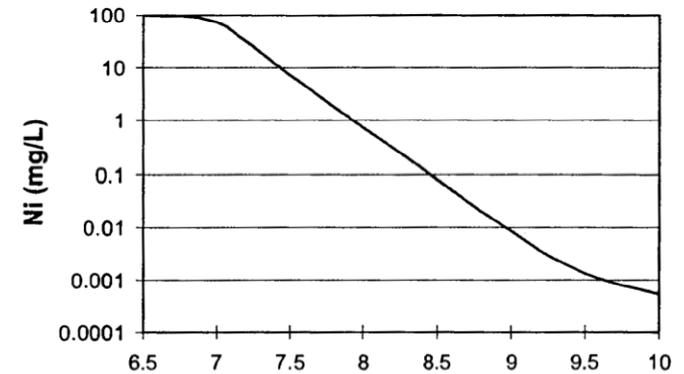
Aubertin *et al.*, 2002



Chaire industrielle Poly-UQAT

Problématique

- Drainage neutre contaminé (DNC)
 - L'acidification du milieu n'est pas essentielle pour qu'il y ait oxydation des sulfures
 - On peut donc avoir des contaminants relargués à la suite de l'oxydation à pH neutre – DNC
 - Le DNC : un drainage minier dont la qualité chimique est affectée par le passage à travers le rejet minier, mais qui n'est pas acide (MEND 2004)



Plan de la présentation

1. Problématique environnementale à contrôler
2. Principales méthodes de restauration existantes
3. Les besoins en recherche
4. Les futurs travaux de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers
5. Conclusion

Méthodes de restauration

- La restauration vise à remettre le site dans un état satisfaisant¹
- État satisfaisant :
 - Éliminer les risques inacceptables pour la santé et assurer la sécurité des personnes
 - Limiter la production et la propagation de substances susceptibles de porter atteinte au milieu récepteur et, à long terme, viser à éliminer toute forme d'entretien et de suivi
 - Remettre le site dans un état visuellement acceptable
 - Remettre le site des infrastructures dans un état compatible avec l'usage futur

¹ Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec, MRNF, 1997.

Méthodes de restauration

- Si pas de DMA ou DNC, simple revégétation
- DMA = 3 ingrédients $\cancel{2FeS_2} + \cancel{7O_2} + \cancel{2H_2O} \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+$
- Objectifs des méthodes de restauration : empêcher l'interaction entre les 3 ingrédients
- L'enlèvement des sulfures : approche intéressante de gestion des résidus miniers (mais pas vraiment une méthode de restauration)
- On met l'emphasis dans ce qui suit sur les principales approches de restauration
- Pour chaque approche, il faut s'assurer de la stabilité physique des ouvrages! – tremblement de terre, cas extrême de pluie ou de sécheresse

Méthodes de restauration

- Utilisation d'un recouvrement en eau



- Objectif : limiter la migration de O_2 – l'eau est une excellente barrière à la migration des gaz

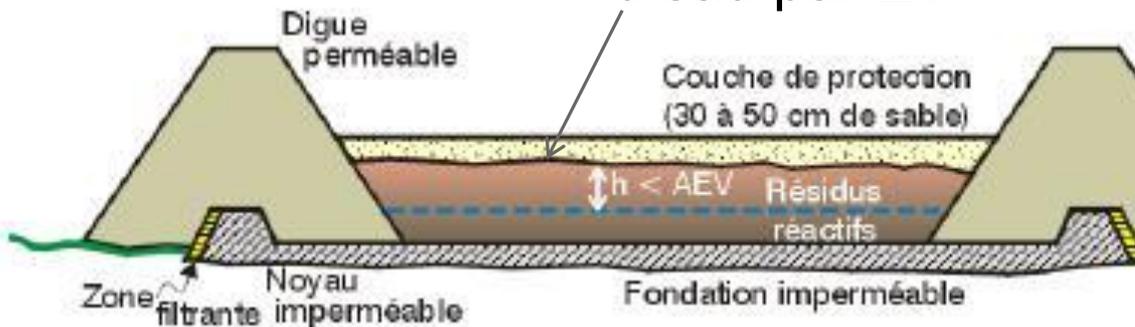
- Défi : maintenir stables à long terme des digues de retenue d'eau

Appliqué avec succès sur deux sites : Louvicourt et Solbec-Cupra

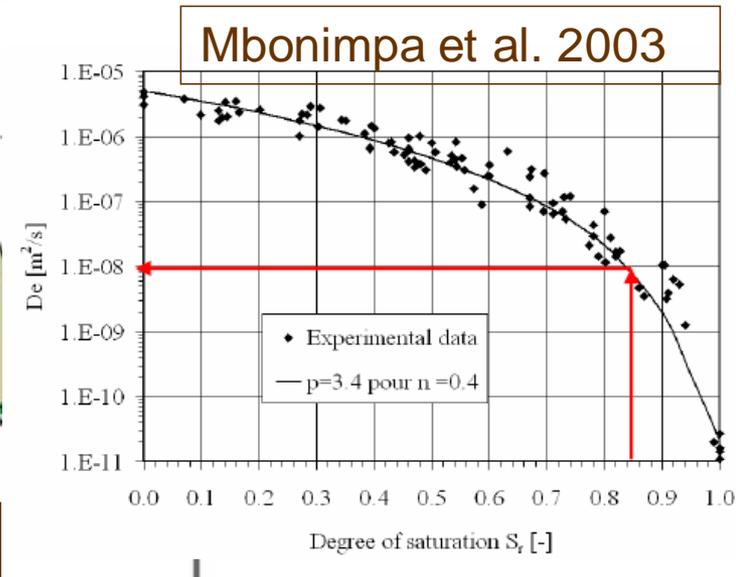
Méthodes de restauration

- Utilisation d'un recouvrement monocouche avec nappe surélevée – barrière à l'oxygène

Réduit les pertes d'eau par ET



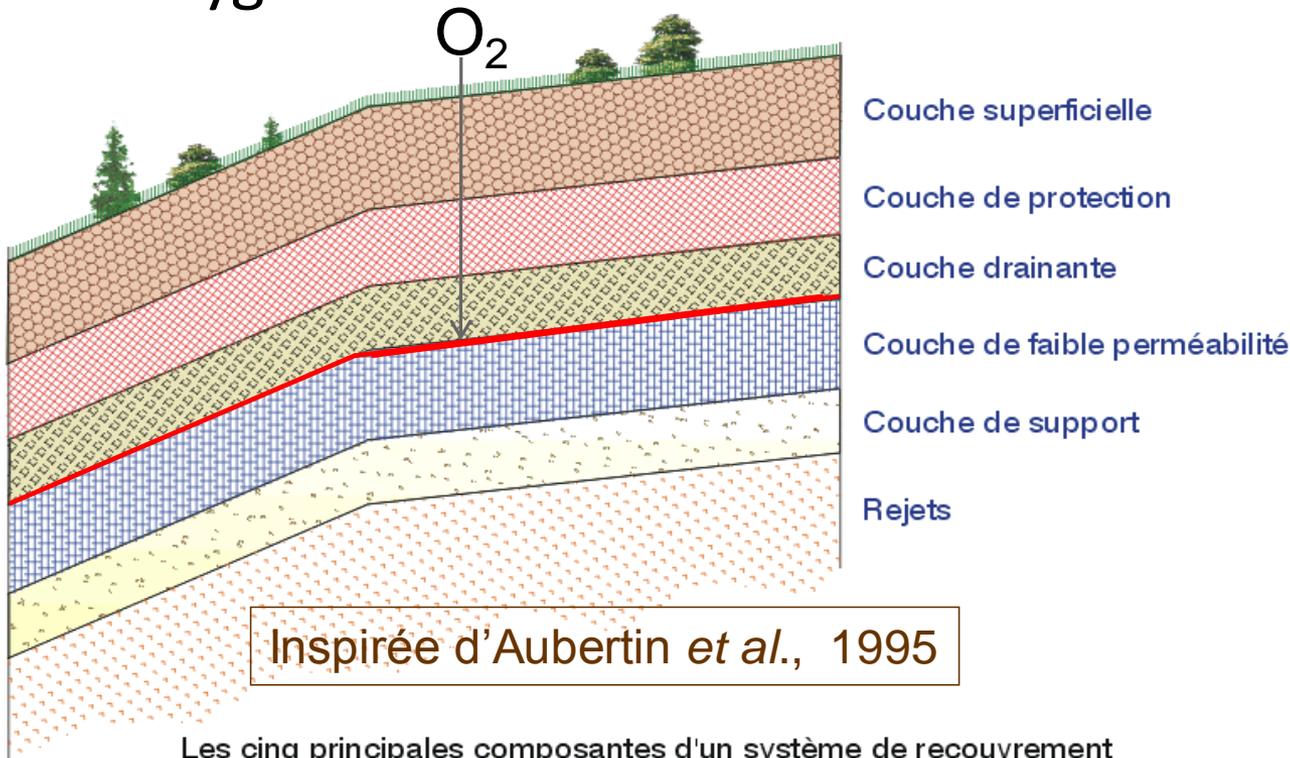
Aubertin et al. 1999



- Objectif : maintenir les rejets générateurs de DMA saturés en tout temps = peu d'O₂
Application prévue à Aldermac et Manitou

Méthodes de restauration

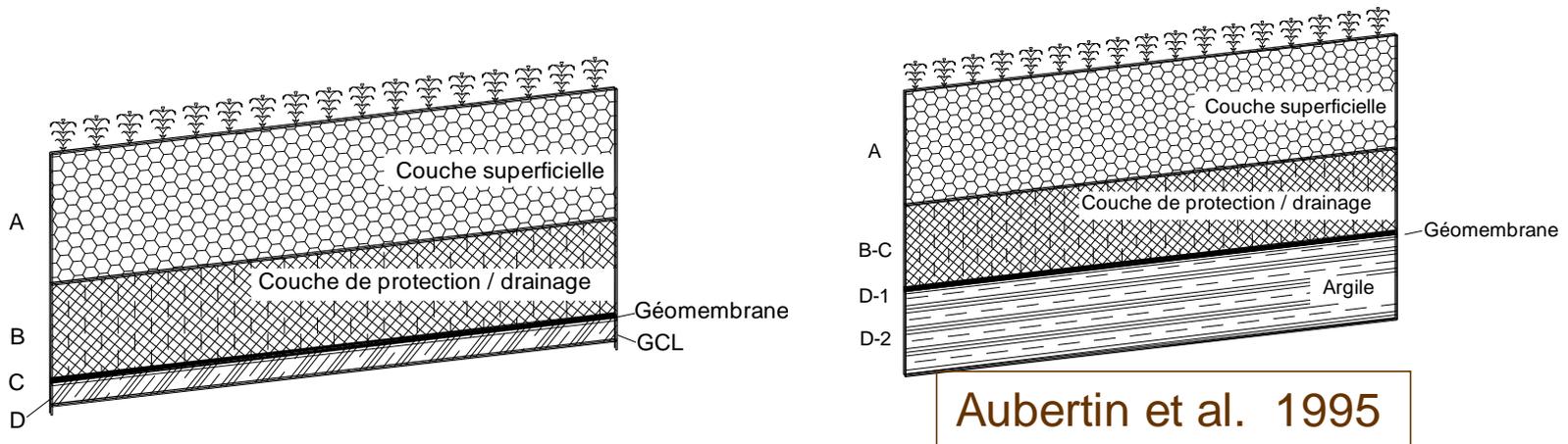
- Utilisation de CEBC pour limiter le DMA – Barrière à l'oxygène



Appliquée avec succès sur trois sites en A-T : LTA (1995-96), Lorraine (1999) et B-H (2003)

Méthodes de restauration

- Recouvrements faits de matériaux peu perméables ou géosynthétiques – Barrière à l'eau



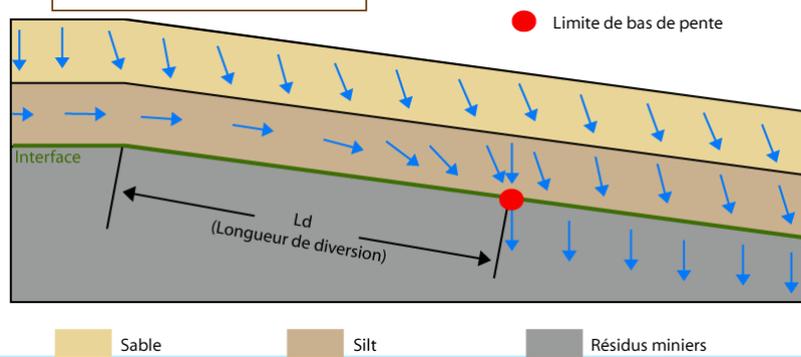
- Défi : empêcher l'infiltration d'eau à long terme dans un climat humide comme celui du Québec; durabilité du matériau

Appliqués au site Poirier (Joutel) et à une partie du site Aldermac (2009)

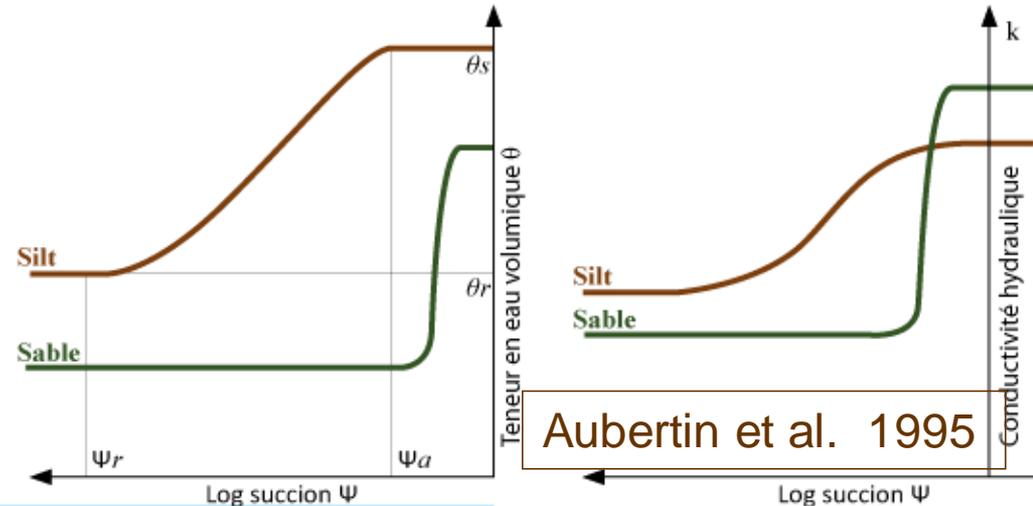
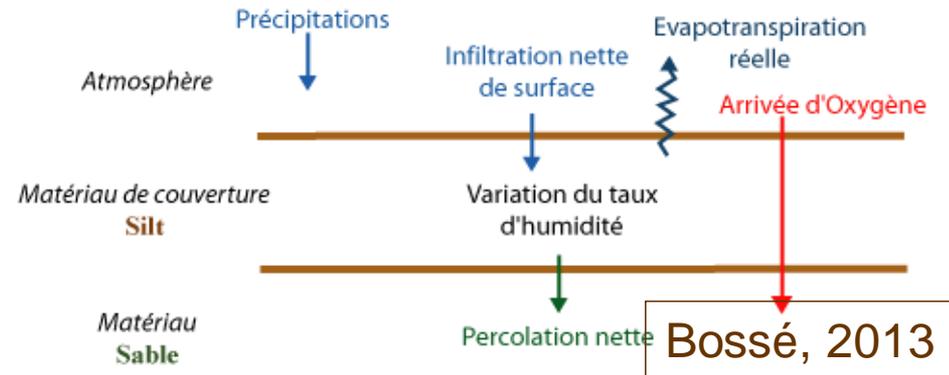
Méthodes de restauration

- Objectif des recouvrements SR : stocker l'eau durant la saison humide et retourner cette eau à l'atmosphère par E_t

Bossé, 2013



Recouvrements type SR

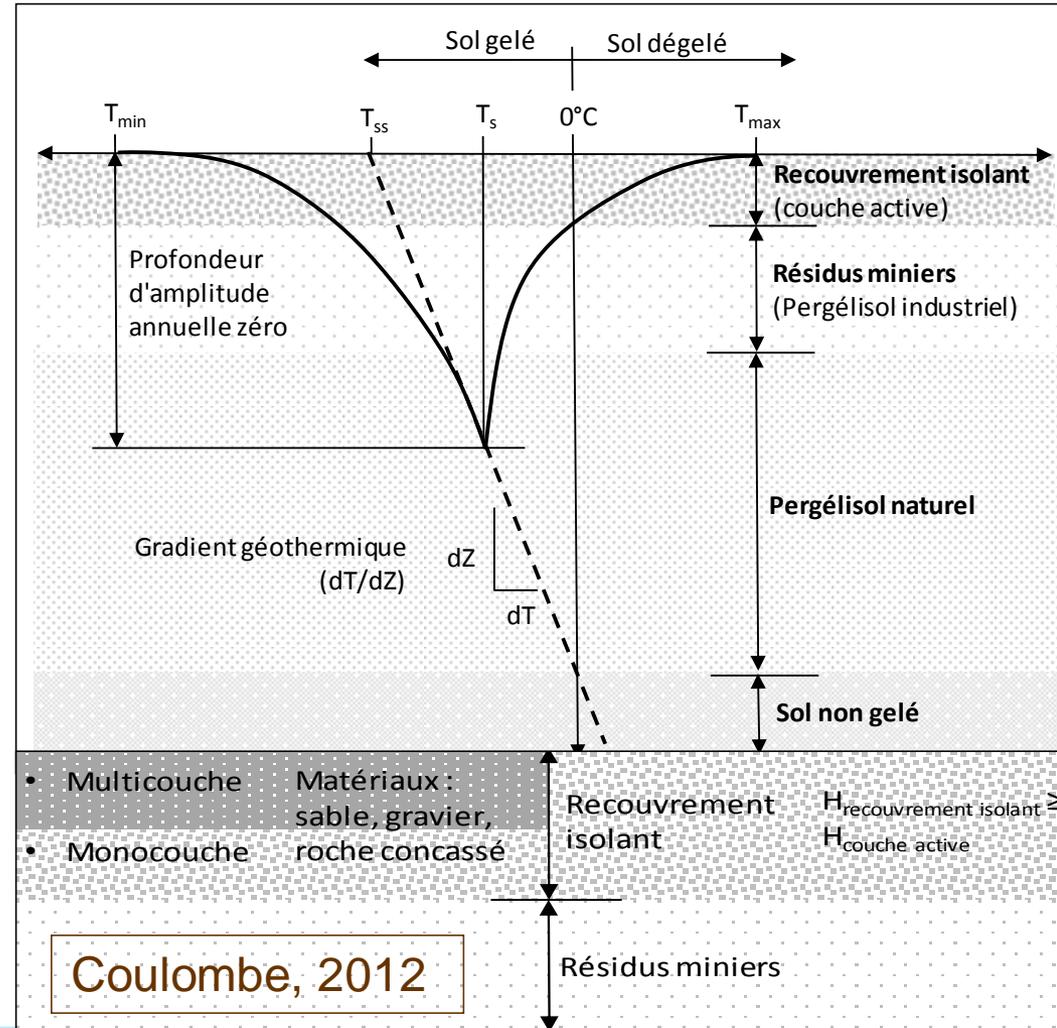
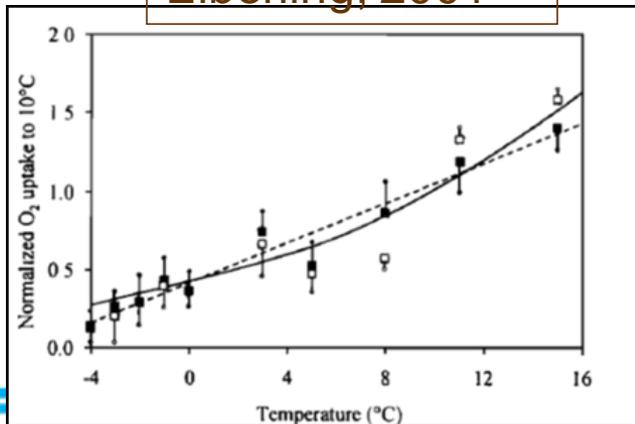


Méthodes de restauration

Recouvrements isolants

- Objectif : maintenir à des $T^\circ < 0^\circ\text{C}$ les rejets pour contrôler les réactions d'oxydation et éviter la migration des contaminants

Elberling, 2001



Coulombe, 2012

Plan de la présentation

1. Problématique environnementale à contrôler
2. Principales méthodes de restauration existantes
3. Les besoins en recherche
4. Les futurs travaux de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers
5. Conclusion

Besoins en recherche

- Même s'il est clair qu'il y a eu des progrès importants quant au développement de méthodes de restauration minière, il reste encore du chemin à parcourir
- Des rencontres avec des compagnies minières ainsi qu'une revue de littérature détaillée ont permis d'identifier les principaux défis actuels associés à la restauration des sites miniers

Besoins en recherche

- Peut-on construire des recouvrements partiellement ou complètement avec des matériaux miniers (résidus miniers ou stériles)? Pourrait réduire l'empreinte environnementale des sites
- Est-ce que les recouvrements SR sont une option en climat froid aride/semi-aride? (MEND 2012)
- Quelle est la performance *in situ* des recouvrements monocouche avec nappe surélevée pour des résidus frais ou oxydés? (Phase II : thèses de Ouangrawa, Demers, Pabst)
- Quelle est la performance de recouvrements avec géomembrane à moyen et long terme? (Brachman, Rowe, Bouazza) Est-ce une option en climat nordique?

Besoins en recherche

- Peut-on construire des recouvrements isolants plus robustes qui contrôlent aussi la migration d'O₂?
- Quelle est la température qui contrôle l'oxydation des sulfures? (Meldrum, Elberling, Coulombe)
- Peut-on améliorer nos outils de prédiction numérique (hydrogéologique, géochimique et thermique), particulièrement dans le cas des matériaux grossiers tels les stériles? (Mayer, Molson, Therrien, Côté, Pham, Amos *et al.* at Diavik, Phases I and II : Fala, Demers, Pabst, Maqsoud, Mbonimpa)

Besoins en recherche

- Peut-on dévier l'eau latéralement en intégrant une couche de matériau fin dans les haldes à stériles? Autant en conditions tempérées que froides? (Phases I et II : Molson, Fala, Poisson, Dawood, Maqsoud, Mbonimpa; Cabral, Wilson et Azam)
- Quel est le comportement thermo-hydrique d'ouvertures de surface remplies par des stériles miniers en conditions nordiques? (Phases I et II : Thériault, Abdelghani, Awoh; Eary, MEND reports)
- Est-il possible de contrôler la migration d'oxygène dans le cas des haldes à stériles de grandes dimensions avec une nappe phréatique au bas de l'empilement? (Yanful *et al.* – Health Steel, Wilson and Andrina – Grasberg Mine)

Besoins en recherche

- Quel est l'impact des inclusions de stériles dans les parcs à résidus miniers sur le comportement des méthodes de restauration? (projet en lien avec un autre de M. James)
- Quel niveau de performance (p. ex. : flux d'oxygène ou température des rejets) est-il nécessaire d'atteindre pour contrôler la génération de DNC?
- Est-ce que l'amendement alcalin pourrait être une option? (Phase II: Bouzahzah, Benzaazoua)
- Peut-on prédire le comportement hydrogéochimique (oxydation, neutralisation, sorption, précipitation) de ce type de matériau faiblement réactif avec des modèles physiques et numériques? (Phase II: Demers)

Plan de la présentation

1. Problématique environnementale à contrôler
2. Principales méthodes de restauration existantes
3. Les besoins en recherche
4. Les futurs travaux de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers
5. Conclusion

Chaire industrielle CRSNG-UQAT

- Afin de répondre aux besoins de recherche identifiés, une chaire de recherche industrielle a été mise sur pied – début des travaux en juin 2014
- Les différents partenaires de la chaire sont le CRSNG, AEM, Mine Raglan, IAMGold, RTFT et Canadian Malartic GP
- Comme pour les phases I et II, le programme de recherche est basé sur une combinaison d'essais au laboratoire et sur le terrain ainsi que sur la modélisation mathématique

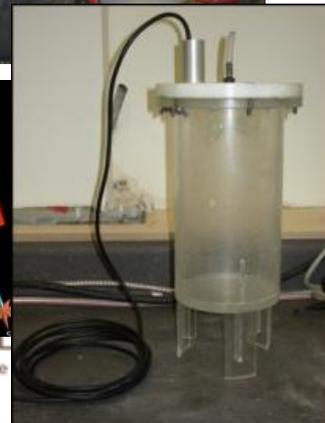
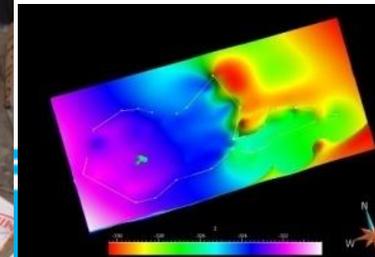
Chaire industrielle CRSNG-UQAT

- Le programme de recherche est divisé en 5 projets de recherche :
 1. Réactivité, propriétés hydrogéologiques et modélisation numérique
 2. Restauration des parcs à résidus miniers générateurs de DMA avec des recouvrements d'ingénierie
 3. Restauration de haldes à stériles génératrices de DMA
 4. Restauration de rejets miniers générateurs de DNC
 5. Transfert technologique et estimation des coûts de restauration

Chaire industrielle CRSNG-UQAT

1. Réactivité, propriétés hydrogéologiques et modélisation

– Équipement et infrastructures

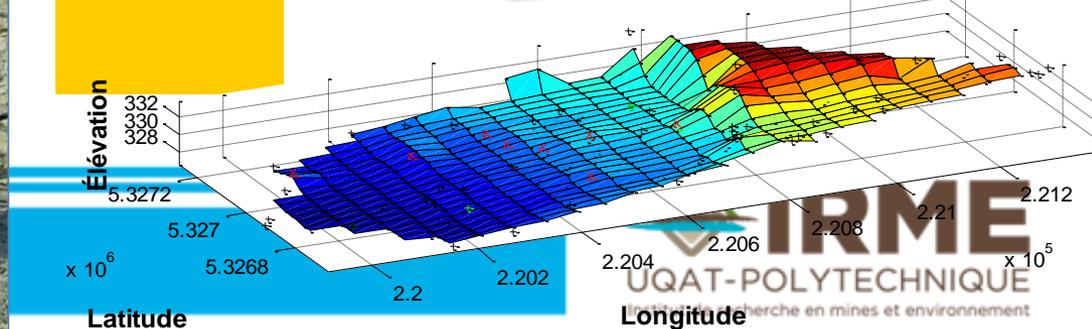
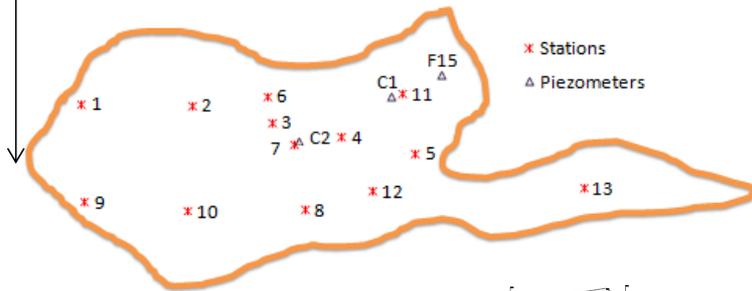
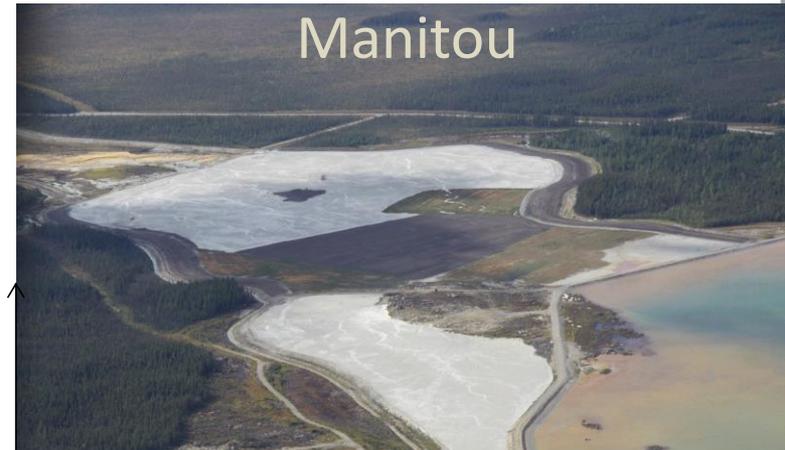
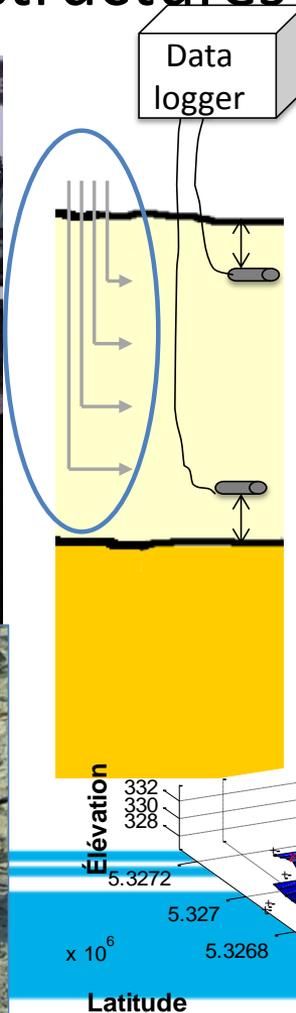


Chaire industrielle CRSNG-UQAT

2. Restauration des parcs à résidus miniers générateurs de DMA

– Équipement et infrastructures

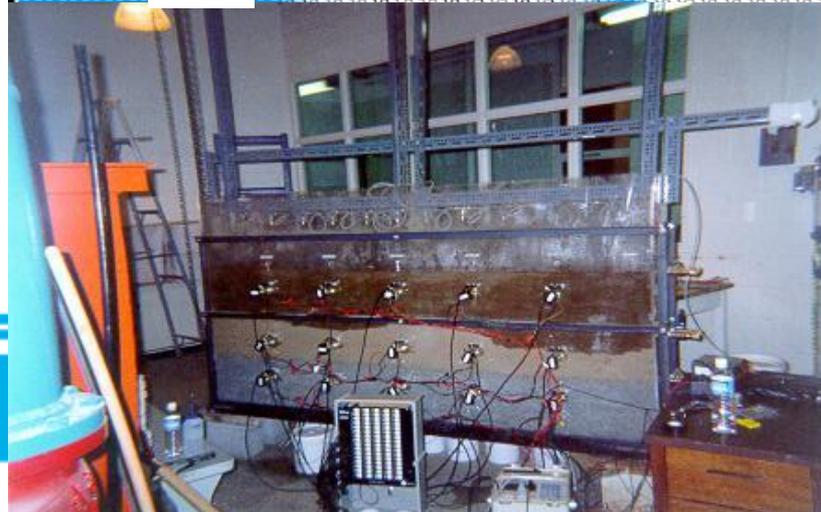
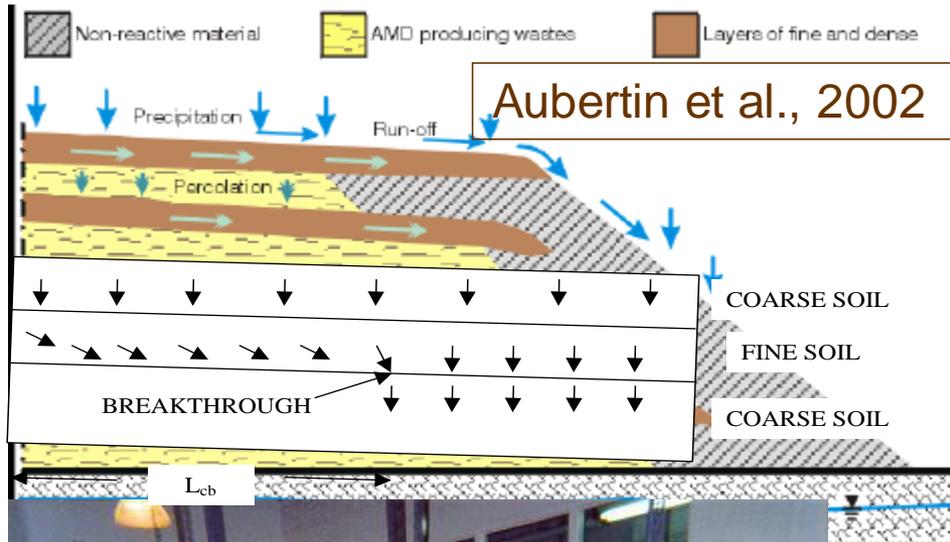
Raglan



Chaire industrielle CRSNG-UQAT

3. Restauration des haldes à stériles génératrices de DMA

– Équipement et infrastructures

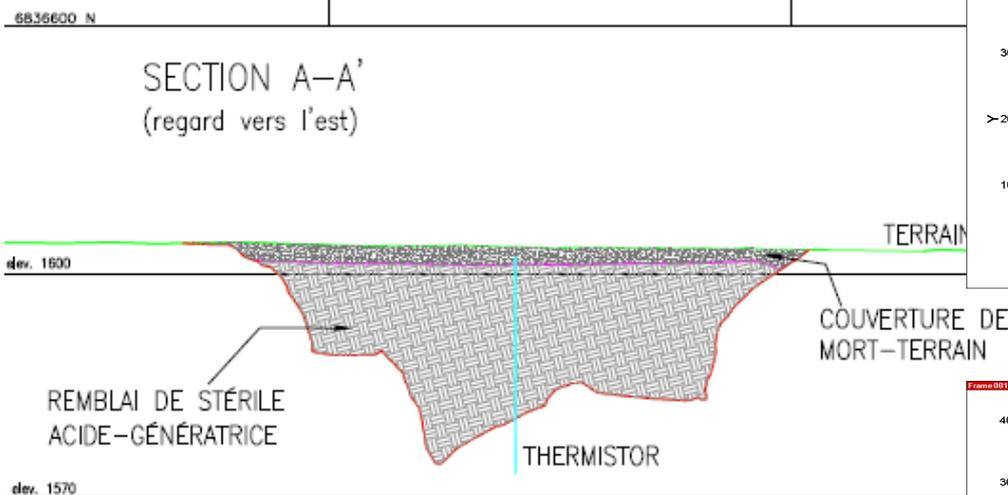


Chaire industrielle CRSNG-UQAT

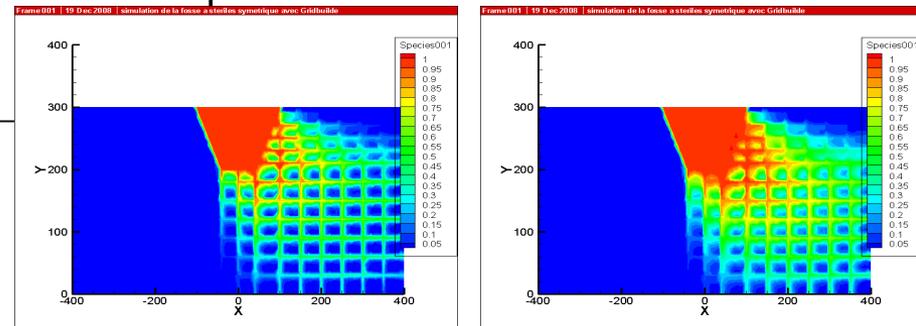
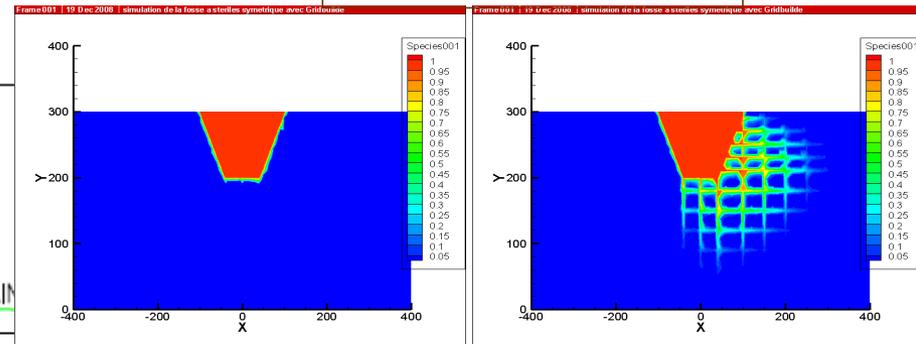
3. Restauration des haldes à stériles génératrices de DMA

– Équipement et infrastructures

Raglan – Champagne pit



Abdelghani, 2009

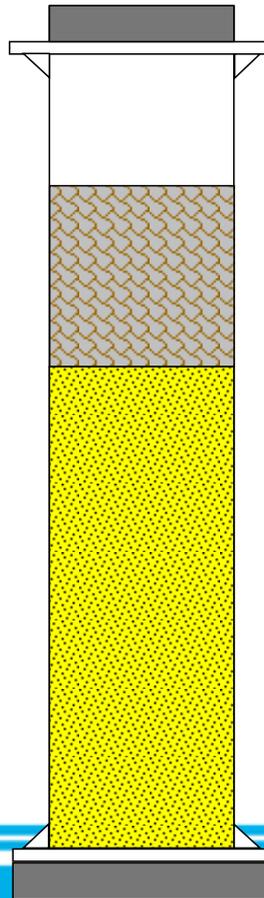


Chaire industrielle CRSNG-UQAT

4. Restauration des rejets générateurs de DNC

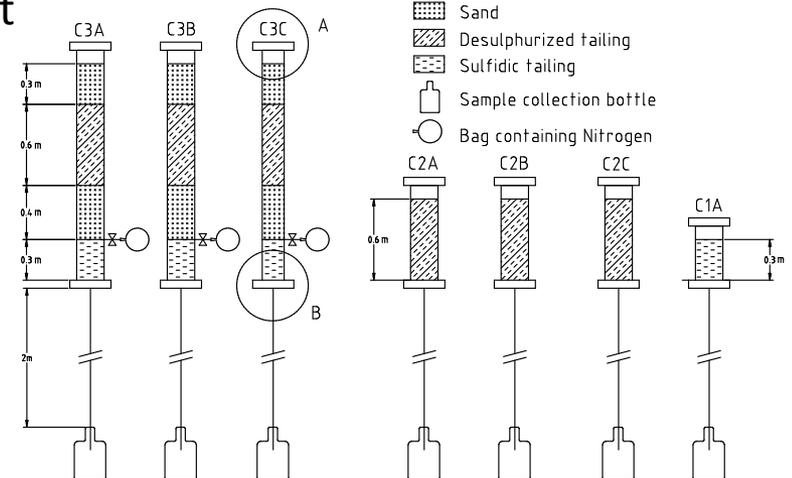
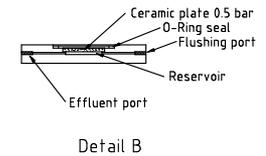
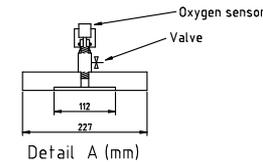
– Équipement et infrastructures

Bussièrre et al., 2004



Tailings +
amendment

CND
tailings



Chaire industrielle CRSNG-UQAT

4. Restauration des rejets générateurs de DNC

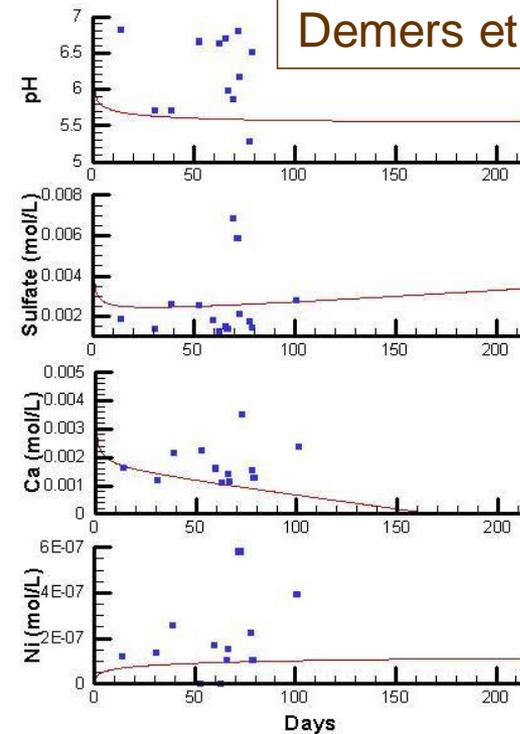
– Équipement et infrastructures

À la mine Canadian Malartic



Résultats de modélisation numérique

Demers et al., 2012



Chaire industrielle CRSNG-UQAT

Collaborateurs

- Toute une équipe de professeurs-chercheurs travaillera dans le cadre des travaux de la chaire :
 - UQAT : professeurs Benzaazoua, Demers, Maqsoud, Mbonimpa, Plante
 - Autres universités : M. Aubertin et M. James, Polytechnique; J. Côté et J. Molson, U Laval; et d'autres à venir
- À cela se greffe une équipe technique de haut niveau, des équipements à la fine pointe de la technologie et du personnel de soutien et professionnel de grande qualité

Chaire industrielle CRSNG-UQAT

Formation d'étudiants

- Les travaux seront principalement réalisés via des projets d'étudiants stagiaires et de grades supérieurs.
- On prévoit former au cours des 5 prochaines années :
 - 20 stagiaires de premier cycle
 - 16 étudiants à la maîtrise
 - 7 étudiants au doctorat
 - 2 chercheurs postdoctorants

Chaire industrielle CRSNG-UQAT

Formation d'étudiants (suite)

- Pour chaque étudiant, des collaborateurs sont impliqués dans la supervision afin d'offrir un encadrement optimal
- Tout comme pour les Phases I et II, des interactions étroites entre les étudiants et les partenaires industriels sont prévues
- La plupart des projets de MSc et de PhD vont impliquer du travail au laboratoire et sur le terrain, ainsi que des modélisations numériques
- Ils vont également être fortement encouragés à présenter leurs travaux dans des conférences nationales et internationales

Plan de la présentation

1. Problématique environnementale à contrôler
2. Principales méthodes de restauration existantes
3. Les besoins en recherche
4. Les futurs travaux de la Chaire industrielle CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers
5. Conclusion

Conclusion

- L'environnement minier et la restauration minière sont des sciences relativement jeunes
- Au cours des dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés dans ces domaines, en grande partie grâce à la R&D (MEND, Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers Phases I et II)
- Malgré ces progrès, il est nécessaire de poursuivre les recherches afin de s'attaquer aux défis qui demeurent

Conclusion

- Les outils et les techniques développés par la Chaire CRSNG-UQAT sur la restauration des sites miniers vont permettre d'améliorer les connaissances sur des problèmes jugés prioritaires par l'industrie minière → amélioration au niveau du design des méthodes de restauration → réduction des risques et impacts environnementaux de l'industrie minière → meilleure acceptabilité sociale des projets
- La chaire va aussi contribuer à former les experts de demain
- Elle va également produire de la connaissance qui sera utile ici et ailleurs dans le monde



**UN PARTENARIAT
UNIQUE,
DES SOLUTIONS
CONCRÈTES ET DURABLES**



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**



RioTinto