

R355

**ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE  
DE LA POLITIQUE DE CONTRÔLE  
DES DRAINAGES MINIERS ACIDES:  
Le cas des choix technologiques**

**ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA  
POLITIQUE DE CONTRÔLE DES DRAINAGES  
MINIERS ACIDES:**

**Le cas des choix technologiques**

**Jean-François Blais**

*Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-EAU)*

*Université du Québec, 2700 rue Einstein,*

*Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 4C7*

**Documentation préparée pour le compte du**

Conseil canadien de la recherche

sur l'évaluation environnementale

## REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'un contrat de recherche pour étudiants diplômés octroyé en 1991 par le Conseil canadien de la recherche sur l'évaluation environnementale (CCREE). Je tiens à remercier tout particulièrement le Dr. R.D. Tyagi mon directeur de thèse pour sa disponibilité de tout instant et l'encouragement qu'il m'a apporté tout au long de ces travaux. Je remercie également les professeurs Jean-Louis Sasseville et Roger Guay ainsi que messieurs André Paquet (Centre de recherches minérales, Ministère de l'Énergie et des ressources, Gouvernement du Québec) et Yves Thomassin (Association minière du Québec) pour leur appui, ainsi que pour les commentaires pertinents qu'ils m'ont livrés. Une grande reconnaissance également au comité d'expert du domaine minier ayant répondu au questionnaire sur l'évaluation environnementale des technologies de contrôle du drainage minier acide. Une liste des personnes ayant contribué à la réalisation de cette recherche est présentée à l'annexe 1.

## RÉSUMÉ

La lutte contre le drainage minier acide (DMA) représente, à l'heure actuelle, le plus important défi de l'industrie minière canadienne. Pour faire face aux perturbations environnementales sérieuses issues du DMA, les autorités publiques ont mis sur pied des programmes de R & D visant à développer des technologies de contrôle adéquates sur un plan environnemental et économique. L'objectif de cette étude était donc d'effectuer l'évaluation environnementale de cette politique publique (EEPP) de développement technologique.

L'analyse des programmes de R & D soutenus par les autorités gouvernementales (fédérale et provinciales) a permis de mettre en évidence la performance, en terme de protection de l'environnement, des différentes options technologiques qui sont explorées. Si cette démarche gouvernementale représente une alternative fort profitable du point de vue environnemental, celle-ci n'est pas nécessairement optimisée. Ainsi, cette recherche a fait ressortir que certaines technologies fort prometteuses n'ont pas été retenues dans les programmes de recherche. En effet, l'exploitation et le traitement des résidus miniers générateurs d'acides par des techniques intégrant l'utilisation de la lixiviation bactérienne, semble être une voie d'intérêt pour la restauration définitive et sécuritaire des parcs à résidus miniers sulfureux. Il apparaît donc souhaitable que l'étude de ces approches de traitement des résidus miniers soit envisagée dans la politique publique de contrôle du DMA.

Ce rapport propose également une méthodologie simple et peu onéreuse basée sur la consultation d'un comité d'expert, pour l'évaluation environnementale des technologies de contrôle du DMA et de restauration des parcs à résidus miniers générateurs d'acides.

## ABSTRACT

The problem created by acid mine drainage (AMD) is a challenge for the Canadian mining industries. To tackle the environmental repercussions of AMD, public authorities have given shape to R & D programme aimed at developing technologies for adequate and economic containment of this problem. The objective of this study, therefore, was to evaluate the public policy for choosing an appropriate technology.

Analysis of R & D programmes supported by government agencies (federal as well as provincial) shows evidences of performance of the different technological options explored, in terms of environmental protection. Even though these efforts by the government indicate a highly profitable alternative from environmental point of view, it need not be the optimum process. Treatment of acid producing mining residues by an integrated technique of bacterial leaching seems to be a very attractive way of restoring mining sites. It is, therefore, apparent that bacterial leaching of mining residues should be envisaged in the public policy for control of AMD.

At the same time, this report proposes a simple and economical method, based on the recommendations of an expert committee, for the evaluation of technologies for the control of AMD and restoration of acid producing mine sites.

## TABLE DES MATIÈRES

		<u>Page</u>
	REMERCIEMENTS.....	i
	RÉSUMÉ.....	ii
	ABSTRACT .....	iii
	TABLE DES MATIÈRES.....	iv
	LISTE DES TABLEAUX.....	v
	LISTE DES FIGURES.....	vi
	LISTE DES ANNEXES.....	vi
	INTRODUCTION .....	1
1	MÉTHODOLOGIE .....	2
2	POSITION DU PROBLÈME.....	3
	2.1 Causes et impacts environnementaux du DMA .....	4
	2.2 Le contrôle législatif.....	6
3	LES TECHNOLOGIES DE CONTRÔLES.....	9
	3.1 Traitement des eaux acides .....	9
	3.2 Isolement des déchets générateurs d'acides.....	14
	3.3 Inactivation biochimique des résidus.....	20
4	LA POLITIQUE CANADIENNE DE R & D.....	23
	4.1 Orientation de la politique publique .....	24
	4.2 Analyse de la politique publique.....	30
5	CONCLUSIONS.....	34
	BIBLIOGRAPHIE.....	37
	ANNEXES.....	45

## LISTE DES TABLEAUX

		<u>Page</u>
Tableau 1A	Description sommaire des procédés chimiques de traitement des eaux de drainage acides.....	10
Tableau 1B	Avantages et inconvénients des procédés chimiques de traitement des eaux de drainage acides .....	11
Tableau 2A	Description sommaire des procédés biologiques de traitement des eaux de drainage acides.....	12
Tableau 2B	Avantages et inconvénients des procédés biologiques de traitement des eaux de drainage acides .....	13
Tableau 3A	Description sommaire des procédés physiques de stabilisation des résidus miniers .....	15
Tableau 3B	Avantages et inconvénients des procédés physiques de stabilisation des résidus miniers .....	16
Tableau 4A	Description sommaire des procédés chimiques et biologiques de stabilisation des résidus miniers .....	17
Tableau 4B	Avantages et inconvénients des procédés chimiques et biologiques de stabilisation des résidus miniers .....	18
Tableau 5	Répartition budgétaire global du programme de recherche (MEND) .....	25
Tableau 6	Projets complétés du programme MEND .....	26
Tableau 7	Projets en cours du programme MEND.....	27
Tableau 8	Nouveaux projets de recherche du programme MEND .....	28
Tableau 9	Description des projets de recherche du programme BC AMD.....	29
Tableau 10	Importance relative des facteurs pour l'évaluation environnementale des technologies de contrôle du DMA.....	32
Tableau 11	Évaluation environnementale comparative des technologies de contrôle du DMA.....	33

**LISTE DES FIGURES**

	<u>Page</u>
Figure 1	Coût de production du métal en fonction de la teneur du minerai ..... 21

**LISTE DES ANNEXES**

	<u>Page</u>
Annexe 1	Liste des personnes ressources ayant participé à cette étude..... 45
Annexe 2A	Questionnaire sur l'évaluation environnementale des technologies de contrôle du DMA (version française) ..... 46
Annexe 2B	Questionnaire sur l'évaluation environnementale des technologies de contrôle du DMA (version anglaise) ..... 58

## INTRODUCTION

Les activités minières canadiennes engendrent annuellement plus de 500 millions de tonnes de déchets, dont une partie importante contient des sulfures métalliques. Ces déchets sulfurés composés de roches stériles et de résidus sont entassés dans des haldes et terrils miniers couvrant une superficie de 15 000 hectares (Nolan et al., 1987). Les eaux de drainage de ces dépôts s'acidifient progressivement dans le temps suite à la production d'acide sulfurique résultant de l'oxydation des sulfures métalliques. Les réactions biochimiques responsables de la production des drainages miniers acides (DMA) peuvent se poursuivre pendant des siècles, jusqu'à l'oxydation complète des sulfures présents dans les roches stériles et résidus.

Afin de réduire les impacts sur l'environnement résultant de l'acidification des dépôts miniers, les gouvernements fédéral et provinciaux ont entrepris d'imposer aux exploitants miniers la restauration des sites dangereux. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de technique fiable permettant la fermeture définitive et sécuritaire des sites miniers. Le développement de technologies appropriées s'imposaient ainsi comme première étape de cet effort de restauration. On peut penser que le choix des orientations de recherche et développement auxquels les autorités ont accordées des ressources financières (près de 20 millions de \$) constituent l'assise de la politique de restauration actuelle.

Quelles technologies sont susceptibles d'être produites par ces travaux de R & D soutenus par les gouvernements fédéral et provinciaux? Quelle est leur efficacité pour la restauration des sites ou la réduction des impacts environnementaux? Quels risques subsistent-ils suite à leur application? Existient-ils de meilleurs choix technologiques qui ne sont pas pris en compte par la politique de soutien à la restauration des sites de résidus miniers ou de contrôle des rejets acides? Si oui, dans quelle mesure il aurait été avantageux, tenant compte des impacts potentiels sur l'environnement, d'opter pour des technologies possiblement plus performantes?

C'est de ces questions portant sur l'analyse environnementale de la politique de choix des technologies de contrôle des drainages acides et de restauration des sites de résidus miniers dont il est question dans ce rapport.

## 1 MÉTHODOLOGIE

Dans une première section les mécanismes chimiques et biologiques responsables de la production du DMA seront décrits succinctement. Par la suite, un aperçu général des effets du DMA sur les écosystèmes naturels sera présenté. Les mesures législatives prises par les autorités gouvernementales pour forcer l'industrie minière à tenir compte des impacts environnementaux issus des activités d'exploitation seront également discutées. La section suivante est consacrée à la description et à l'analyse des différentes options technologiques utilisées et étudiées au Canada et à l'étranger pour lutter contre la production du DMA.

La troisième partie de ce rapport traite de l'approche gouvernementale de contrôle du DMA. Ainsi, dans un premier temps l'orientation de la politique publique canadienne sera définie par l'analyse des programmes de R & D (MEND et BC AMD). Cet exercice permettra de faire ressortir les types de technologies qui sont susceptibles d'être développées par ces travaux de recherche. Par la suite, ces technologies seront comparées, en termes d'impacts et de risques environnementaux, à une autre option technologique (inactivation biochimique) qui n'a pas été retenu dans la politique de développement technologique. L'analyse comparative de ces technologies sera effectuée par une méthode d'évaluation quantitative préparée par l'auteur et qui est basée sur une évaluation par un comité d'experts du milieu minier. De cette manière il sera possible de comparer les répercussions environnementales qui risquent de subsister après l'implantation de la technologie de contrôle et ainsi de confronter l'intérêt que représentent chacune des options technologiques.

La politique publique canadienne du contrôle du DMA constitue certainement une approche positive de lutte contre ce problème environnemental important. L'Évaluation Environnementale de la Politique Publique (EEPP) de développement technologique doit donc se faire par comparaison avec d'autres possibilités technologiques, afin de pouvoir déterminer si la démarche gouvernementale représente la meilleure alternative du point de vue environnemental. Cette analyse permettra de formuler des critiques et des recommandations sur l'intégration des considérations environnementales au choix de politiques technologiques publiques dans le secteur du contrôle de la pollution. Plus spécifiquement, il sera possible de faire des recommandations sur la répartition des efforts canadiens engagés pour contrer les effets du DMA et possiblement de stimuler ou d'intéresser la recherche et le développement des technologies les plus prometteuses, tant sur le plan économique qu'environnemental.

## **2 POSITION DU PROBLÈME**

L'analyse de la politique publique de contrôle du DMA nécessite une connaissance de base des perturbations environnementales issues de ces activités minières. Les causes du DMA et ces impacts sur les écosystèmes naturels seront donc décrits brièvement dans la section suivante. De plus, les différentes mesures législatives dirigées vers la protection des environnements adjacents aux exploitations minières seront exposées et discutées.

## 2.1 Causes et impacts environnementaux du DMA

Le drainage minier acide entraîne une contamination importante des milieux terrestres et aquatiques adjacents aux sites miniers. Le ruissellement des eaux de surface et la diffusion dans la nappe phréatique des eaux acides fortement chargées en métaux sont les principaux vecteurs de contamination de ces milieux. L'acidification importante des écosystèmes naturels cause un déséquilibre de la balance ionique des membranes des organismes et une hydrolyse ou dénaturation de diverses composantes cellulaires (Carlson-Gunnoe et al., 1983; Wortman et al., 1986). Un des effets les plus importants de l'acidification des milieux est la destruction du système de tampon bicarbonate. Sous un pH d'environ 4.2 les ions carbonate et bicarbonate sont transformés en acide carbonique, lequel est perdu sous forme de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Ce phénomène cause d'une part une perte de la capacité tampon du milieu récepteur, et d'autre part affecte la croissance de plusieurs organismes photosynthétiques utilisant l'ion bicarbonate comme source de carbone inorganique (Kelly, 1988).

L'accumulation des métaux par les plantes aquatiques et terrestres, par les organismes benthiques et par les animaux suite à une contamination par des effluents miniers acides a été largement vérifiée (Kelly, 1988; Tessier et al., 1982; Tyler et al., 1989). En milieu terrestre, l'acidification entrave la croissance des plantes en réduisant l'efficacité des activités physiologiques d'absorption du phosphore, du calcium et du magnésium (Rorison, 1972). Les métaux accumulés dans le sol peuvent aussi devenir toxiques pour les plantes terrestres en affectant entre autres la réplication de l'ADN et de l'ARN et en inactivant certains systèmes enzymatiques (Tyler et al., 1989).

Des centaines d'études scientifiques ont été effectuées pour mesurer les impacts environnementaux résultant de la contamination des eaux de rivières et de lacs par des effluents miniers acides. De façon générale, l'acidification des cours d'eau cause une baisse de productivité

primaire (plantes aquatiques) et une réduction appréciable de la diversité et des concentrations de phytoplanctons, de zooplanctons et du benthos (Kelly, 1988; Mount, 1973; Warner, 1971). Les populations de poissons sont également réduites et dans certains cas une élimination totale a été observée (Kelly, 1988). D'après Downs et Stocks (1977) le DMA affecte des zones de pêches et de récréation sur plus de 21 000 km de lacs et rivières.

L'accumulation des métaux dans la chaîne alimentaire animale et humaine est également une conséquence envisageable de la contamination des cours d'eau. La présence de cadmium, de plomb, d'arsenic, de mercure, de cyanures (exploitation aurifère) et de matériels radioactifs (extraction de l'uranium) est particulièrement redoutée. Par exemple, chez l'homme et les animaux l'absorption excessive de cadmium cause une accumulation dans les reins et le foie, où il peut causer des dommages histologiques et fonctionnels graves. Les effets biologiques du cadmium incluent aussi des interférences avec des systèmes enzymatiques fondamentaux tel la phosphorylase oxydative, par blocage des groupement thiols. Cet élément toxique interfère également avec la synthèse des acides nucléiques (Doyle et al., 1978). Le temps de demi-vie du cadmium chez l'humain est de 10 à 30 ans.

La pollution des eaux minières résulte en grande partie de l'oxydation chimique et/ou biologique de sulfures métalliques suite aux travaux d'excavation et de traitement du minerai. Les eaux de drainage acides ainsi produites solubilisent les métaux présents et les entraînent dans le réseau hydrographique adjacent. Ces effluents miniers acides peuvent provenir des eaux d'exhaure d'une mine à ciel ouvert ou d'une mine souterraine ou encore des eaux de ruissellement et d'infiltration qui s'écoulent des dépôts de résidus et de stériles. La composition des minerais en sulfures a une influence déterminante sur la production d'effluents acides, toutefois l'oxydation des sulfures requiert également de l'oxygène et de l'eau. Ainsi, en limitant l'apport d'oxygène, l'oxydation est ralentie. De même, si l'apport en eau est insuffisant, celle-ci sera également limitée.

D'autres facteurs influent sur la vitesse des réactions et, finalement, sur la qualité des effluents: ce sont notamment la température, la nature et structure des sulfures, la surface effective des particules, l'abondance du dioxyde de carbone, des éléments nutritifs et des éléments traces essentiels à la croissance des microorganismes (Bell, 1988). Outre la quantité de minéraux sulfurés présente, le facteur le plus déterminant quant à la qualité des effluents miniers est souvent la présence de minéraux neutralisant les acides. Les minéraux carbonatés comme le calcaire et la dolomite sont les principaux neutralisants naturels des déchets de mine. Ces minéraux peuvent neutraliser l'acide qui résulte de l'oxydation des sulfures, empêchant ainsi la baisse de pH nécessaire au développement des microorganismes (Environnement Canada, 1987). Dans ces conditions, le processus d'acidification ne peut vraiment s'engager, si bien que les effluents ne sont pas contaminés.

On voit donc que la production du DMA résulte d'un ensemble de conditions physiques et de réactions chimiques et biochimiques complexes. De plus, vue l'étendue des gisements en surface et en profondeur, des excavations et des dépôts de résidus et de déchets dans une exploitation minière, il est aisé de comprendre que le contrôle de l'acidification des effluents soit difficile.

## 2.2 Le contrôle législatif

Les pressions écologiques grandissantes ont amené les autorités gouvernementales à légiférer en ce domaine pour forcer les exploitants miniers à tenir compte des dommages causés à l'environnement. La juridiction législative concernant le drainage minier acide est partagée entre les agences provinciales et fédérales. Ainsi, au mois de juin 1991, le gouvernement du Québec a adopté la loi 130 amendant la loi sur les mines. Cette loi stipule qu'un plan de remise en état des sites doit être soumis par tout promoteur minier désirant faire de l'exploration, de l'extraction ou du traitement de minerai. De plus, celui-ci doit fournir une garantie financière pour s'assurer de la

réalisation future des travaux de restauration des sites. Cette loi devrait être effective en mai 1992 (Perrier et Maclatchy, 1991).

Plusieurs autres provinces ont également modifié leur réglementation concernant l'ouverture et la fermeture des sites miniers afin de contraindre les exploitants miniers à prendre les moyens nécessaires dès le début des travaux pour restreindre les répercussions environnementales issues de ces activités minières (Errington, 1991). En plus de réduire les effets néfastes sur les environnements adjacents aux sites miniers, ce type de planification permettra de réduire le fardeau financier inhérent au traitement des eaux acides et au maintien des infrastructures de prévention de l'acidification, après la période de l'exploitation minière.

Au niveau fédéral, la réglementation concernant la gestion du drainage minier acide tend également à se resserrer. Le service de la protection de l'environnement d'Environnement Canada a publié en 1977 des règlements et directives sur les effluents liquides des mines de métaux. Ces règlements ont été établis selon la meilleure technologie économiquement réalisable. Ces valeurs limites sont également utilisées pour la réglementation dans plusieurs provinces (Gignac et Perron, 1991). Les amendements apportés à la loi fédérale sur les pêches au cours des dernières années constituent des outils efficaces pouvant être employés pour la prévention de la pollution et la protection des habitats contre les déversement d'effluent minier contaminé. Ainsi, en janvier 1991, les amendes maximales pour les infractions relatives à la contamination des eaux fréquentées par les poissons ont été haussées considérablement (article 40).

L'adoption de la loi canadienne sur le processus d'évaluation en environnement, qui est anticipée pour le printemps 1992, permettra l'établissement d'un processus d'audition qui se substituera au décret de 1984 sur les lignes directrices visant le processus d'évaluation et d'examen en environnement. Cette législation, ainsi que les propositions du plan vert du Canada rendu public à la fin de 1990 témoignent clairement de la volonté des citoyens et des autorités

gouvernementales à instaurer une surveillance accrue des impacts environnementaux issus des activités industrielles.

L'application des normes environnementales aux exploitants miniers canadiens vient toutefois imposer de nouvelles contraintes de productivité à cette industrie (Sasseville et Thomassin, 1990). Les coûts de contrôle de la pollution pour satisfaire aux normes environnementales peuvent atteindre jusqu'à 7% des revenus d'exploitation, tout en ne produisant presque aucun retour sur les investissements (Roche Ltée, 1987). L'appauvrissement des gisements riches en métaux, l'augmentation des coûts d'exploitation et de mains d'œuvres, l'exploitation minière dans les pays en voie de développement et les taxes élevées affectent déjà significativement la compétitivité internationale de l'industrie minière canadienne (Ministère des finances, 1986). Il est donc tout à fait essentiel que les autorités gouvernementales évaluent la faisabilité économique de leur politique environnementale en mesurant les effets sur la capacité concurrentielle de l'industrie.

### 3 LES TECHNOLOGIES DE CONTRÔLES

Les prochaines sections sont consacrées à l'évaluation des diverses méthodes de contrôle du DMA étudiées au Canada et à l'étranger. Ces technologies peuvent être regroupées en trois catégories; 1) traitement des eaux acides; 2) isolement des résidus générateurs d'acides; 3) inactivation biochimique des résidus.

#### 3.1 Traitement des eaux acides

Durant l'exploitation, les eaux de mine sont captées et traitées en vue d'être, soit réutilisées ou soit rejetées dans le milieu récepteur. L'interception et le traitement de ces eaux permettent dans la plupart des cas le rejet d'un effluent de qualité acceptable pour le maintien de l'équilibre des écosystèmes naturels adjacents. Toutefois, l'acidification des eaux d'exhaure, de ruissellement et d'infiltration se poursuit après la fermeture du site minier et oblige les compagnies minières à entretenir les installations pour recueillir et traiter ces effluents. Généralement, les eaux sont neutralisées à la chaux ou avec d'autres agents alcalins, ce qui entraîne la formation d'hydroxydes métalliques insolubles (tableau 1). Le maintien de l'opération de ces unités de traitement, est fort coûteux pour l'industrie, environ 500 000\$ par année pour une période de temps indéfinie (Roche Ltée, 1987), et constitue de plus une dépense entièrement improductive. Du point de vue environnemental ces méthodes sont peu recommandables puisque celles-ci se limitent à l'interception des eaux de ruissellement acides et n'empêchent en rien la contamination de la nappe phréatique.

Bien que d'autres procédés chimiques aient été étudiés pour l'épuration des eaux usées minières (tableau 1), ces techniques exigent également un entretien soutenu. Ces techniques sont surtout utilisées pour le traitement final des effluents (polissage). Pour faire face à ces problèmes,

**Tableau 1A**

Description sommaire des procédés chimiques de traitement des eaux de drainage acides

Procédé	Description	Références
1. <u>Précipitation chimique</u>		
a) formation d'hydroxydes	Neutralisation des eaux acides à l'aide de composés basiques (chaux, calcaires, dolomite, soude caustique, carbonate de soude, ammoniac anhydre, hydroxyde de sodium) entraînant une précipitation des métaux sous forme d'hydroxyde.	Miller <i>et al.</i> , 1983; Gilbert, 1975; Wilmoth et Scott, 1976; Robertson et Kirsten (B.C.) Inc., 1989.
b) formation de sulfures	Précipitation des métaux sous forme de sulfures par ajout de composés sulfurés (Na <sub>2</sub> S, (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S, BaS, H <sub>2</sub> S) dans les effluents.	Ritcey, 1989; Larsen et Ross, 1976.
2. <u>Ultrafiltration, microfiltration, osmose inverse, adsorption, échange d'ion, électrodialyse</u>	Adsorption des métaux des effluents acides sur divers supports ou concentration des métaux par utilisation de membranes.	Miller <i>et al.</i> , 1983; Bates <i>et al.</i> , 1984; Scott et Bragg, 1975; Ritcey, 1989.
3. <u>Extraction par solvants</u>	Transfert des ions contaminants de l'eau à un solvant, lequel est récupéré et réutilisé.	Ritcey, 1989; Scott et Bragg, 1975.
4. <u>Évaporation ou congélation</u>	Concentration des métaux par évaporation de l'effluent ou séparation des métaux par précipitation lors de la formation de cristaux.	Ritcey, 1989; Scott et Bragg, 1975.
5. <u>Ozonation</u>	Oxydation de l'ion ferreux en ion ferrique suivi de la neutralisation de l'effluent.	Ritcey, 1989; Scott et Bragg, 1975.
6. <u>Xanthane-amidon insoluble</u>	Précipitation des métaux et neutralisation de l'effluent par ajout d'une solution de xanthane-amidon insoluble.	Anon, 1980; Wing, 1983.

**Tableau 1B**

Avantages et inconvénients des procédés chimiques de traitement des eaux de drainage acides

Procédé	Avantages	Inconvénients
1. <u>Précipitation chimique</u>		
a) formation d'hydroxydes	Conservation de l'alcalinité des eaux et production d'une eau de qualité acceptable.	Production imposante de boues et problème de disposition. Entretien requis. L'effluent traité contient des concentrations élevées de sulfate.
b) formation de sulfures	Les solubilités de sulfures de métaux sont de plusieurs ordres moindres que les solubilités des hydroxydes de métaux.	Réoxydation possible des sulfures en acide sulfurique. Entretien requis.
2. <u>Ultrafiltration, microfiltration, osmose inverse, adsorption, échange d'ion, électrodialyse</u>	Bon rendement d'enlèvement des métaux avec certaines techniques.	La neutralisation des effluents traités est requise. Problème de disposition des métaux concentrés. Saturation et dégradation des matrices. Entretien requis.
3. <u>Extraction par solvants</u>	De très bons rendements de récupération des métaux peuvent être obtenus.	Le solvant peut contaminer l'effluent. Entretien requis.
4. <u>Évaporation ou congélation</u>	Techniques prometteuses qui permettent l'obtention de bons rendements d'extraction des métaux.	Problème de disposition des métaux concentrés. Corrosion des équipements. Entretien requis.
5. <u>Ozonation</u>	Meilleur contrôle et moins coûteux que l'oxydation conventionnelle de l'ion ferreux.	Exige une neutralisation de l'effluent. Entretien requis.
6. <u>Xanthane-amidon insoluble</u>	Peu coûteux et efficace. Les métaux précipités dans le complexe polysaccharidique se décantent facilement.	Problème de disposition des boues produites. Entretien requis.

**Tableau 2A**

Description sommaire des procédés biologiques de traitement des eaux de drainage acides

Procédé	Description	Références
7. <u>Décharges artificielles et marécages</u>	Accumulation des métaux et neutralisation des effluents par utilisation de marécages ou de décharges.	Henrot et Wieder, 1990; Hellier, 1989; Hedin <u>et al.</u> , 1988; Fennessy et Mitsch, 1989; Robertson et Kirsten (B.C.) Inc., 1989.
8. <u>Boue activée ou disque biologique rotatif</u>	Les effluents acides sont passés dans des bioréacteurs où les métaux sont concentrés dans la biomasse produite.	Bates <u>et al.</u> , 1984; Miller <u>et al.</u> , 1983.
9. <u>Biosorption</u>	Adsorption des métaux sur des supports constitués de biomasse (algues, bactéries, moisissures, organismes aquatiques) ou de dérivés (AMT-Bioclaim, Bio-fix, Alga-sorb.).	Lakshmanan <u>et al.</u> , 1985; Brierley <u>et al.</u> , 1986; Townsley <u>et al.</u> , 1986; Jeffers <u>et al.</u> , 1989; Hasset <u>et al.</u> , 1980; Sloan <u>et al.</u> , 1984; Bennet <u>et al.</u> , 1991; Brierley, 1990.
10. <u>Organismes prédateurs</u>	Des rotifères, des zooflagellés et des ciliés sont utilisés comme prédateurs des thiobacilles.	Shearer et Everson, 1969; Seed, 1971; Christison <u>et al.</u> , 1985.
11. <u>Bactéries sulfato-réductrices</u>	Précipitation des métaux (réduction) et neutralisation des effluents dans un bioréacteur utilisant des bactéries sulfato-réductrices.	Tuttle <u>et al.</u> , 1969; Nakamura, 1988; Jongejan, 1984; Wakao <u>et al.</u> , 1979; Dvorak <u>et al.</u> , 1991.
12. <u>Oxydation biologique du fer ferreux</u>	Précipitation du fer présent dans les effluents acides par oxydation biologique de l'ion ferreux en bioréacteur.	Olem et Unz, 1977; Nakamura <u>et al.</u> , 1986.

**Tableau 2B**

## Avantages et inconvénients des procédés biologiques de traitement des eaux de drainage acides

Procédé	Avantages	Inconvénients
7. <u>Décharges artificielles et marécages</u>	Méthode peu onéreuse demandant peu d'entretien.	Efficacité à long terme douteuse. Résultats variables en pratique. Saturation des sites après un certain temps. Ajout de produits alcalins parfois nécessaire.
8. <u>Boue activée ou disque biologique rotatif</u>	Obtention d'un effluent de bonne qualité lorsque les procédés sont bien opérés.	Dilution importante requise des effluents acides, pour éviter une inhibition de croissance de la microflore hétérotrophe. Surveillance étroite des systèmes nécessaire. Production de boues fortement contaminées en métaux.
9. <u>Biosorption</u>	Rendement élevé d'extraction pour certains métaux.	Problème de désorption des métaux et de recyclage de la biomasse. Neutralisation des effluents nécessaire. Techniques plus onéreuses que l'échange d'ion. Entretien requis.
10. <u>Organismes prédateurs</u>	Procédé peu coûteux demandant peu d'entretien.	Prédateurs ( $> 25\mu$ ) incapables de pénétrer à l'intérieur des terrils. Consommation des thiobacilles par les eucaryotes trop faible pour empêcher la production d'effluents acides.
11. <u>Bactéries sulfato-réductrices</u>	Obtention d'un effluent de bonne qualité.	Risque de réoxydation des sulfures de métaux et des composés soufrés réduits. Exige une surveillance étroite.
12. <u>Oxydation biologique du fer ferreux</u>	Précipitation efficace du fer retrouvé dans les effluents.	Après neutralisation du fer sous forme ferrique, l'effluent doit être neutralisé.. Technologie exigeant une surveillance étroite.

quelques procédés biologiques ont été étudiés (tableau 2). Toutefois, l'opération de ces technologies requiert également un certain niveau d'entretien. La mise en place des décharges artificielles ou marécages est une option qui est présentement fort étudiée et testée dans plusieurs sites miniers. Ces installations constituent un traitement passif peu coûteux puisque le niveau d'entretien est réduit considérablement. L'efficacité à long terme de ces techniques est discutable puisque, d'une part, on se retrouve avec un écosystème fortement contaminé dont les effets sur la flore et la faune indigènes sont peu connus (Hedin et al., 1988). D'autre part, la capacité de ces systèmes est limitée, de sorte qu'après un certain temps la construction ou l'aménagement d'autres sites est requis (Hellier, 1989). Néanmoins, cet usage constitue une avenue prometteuse comme technique d'épuration finale des eaux acides issues de la capacité technologique limitée des moyens de prévention du DMA et d'inactivation biochimique des résidus.

### 3.2 Isolement des résidus générateurs d'acides

Puisque le traitement perpétuel des eaux acides minières représente une contrainte importante pour les compagnies minières, ces dernières se sont donc intéressées fortement à la mise au point de méthodes permettant la restauration définitive des sites. À cette fin, le contrôle du DMA par la prévention de l'oxydation des minerais sulfurés est en théorie réalisable, en limitant les apports de réactifs essentiels (air et eau) ou en bloquant les réactions essentielles de l'acidification. Les nombreux essais effectués dans des sites miniers ont démontré, cependant, que la production d'acide peut être ralentie, mais qu'il est presque impossible de l'enrayer complètement. Les tableaux 3 et 4 décrivent les principaux procédés examinés pour contrer l'acidification.

De manière générale, les conditions à remplir quant à la sécurité et à la stabilité physique des mines fermées sont stipulées dans les règlements appliqués dans la province (ou le territoire) où se situe la mine. Dans bien des cas, la loi prévoit aussi la restauration des lieux, c'est à dire la reconstitution de la couverture végétale là où le terrain a été modifié par des travaux d'exploitation.

**Tableau 3A**

Description sommaire des procédés physiques de stabilisation des résidus miniers

Procédé	Description	Références
13. <u>Revégétation directe</u>	Reconstitution d'une couverture végétale directement sur les résidus miniers.	Moffet <u>et al.</u> , 1977; McCready, 1987; Watkin et Watkin, 1983; Monenco Limited, 1984.
14. <u>Revégétation après recouvrement</u>		
a) barrières naturelles	Reconstitution d'une couverture végétale sur les déchets, après recouvrement avec divers matériaux (sable, gravier, terre, roches, copeaux de bois, argiles, boues d'épuration).	Bell, 1988; Watkin et Watkin, 1983; Monenco Limited, 1984; McCready, 1987; Robertson et Kirsten (B.C.) Inc., 1989; Aughenbaugh, 1990.
b) barrières synthétiques	Aménagement d'une couverture de matériau (PVC, plastique, ciment, asphalte) empêchant l'oxygène de pénétrer, suivi de l'implantation d'une couverture végétale.	Nicholas et Foree, 1982; Caruccio et Geidel, 1987; Opitz <u>et al.</u> , 1985; Ripley <u>et al.</u> , 1982; Robertson et Kirsten (B.C.) Inc., 1989.
15. <u>Inondations des déchets</u>	Élévation d'un niveau de la nappe phréatique ou des eaux de surface afin de submerger les déchets de façon permanente.	Environ. Canada, 1987; Monenco Limited, 1984; Ritcey, 1991; Robertson et Kirsten (B.C.) Inc., 1989.
16. <u>Détournement des eaux de surface</u>	Détournement des eaux pour les empêcher d'atteindre les déchets acidogènes.	Environ. Canada, 1987; Ritcey, 1989.
17. <u>Façonnement et compression des déchets</u>	Les déchets sont entassés et comprimés afin que les eaux de surface en soient détournées.	Environ. Canada, 1987; Ritcey, 1989.
18. <u>Remplissage</u>	Les déchets sont retournés dans les puits souterrains à la fin de l'exploitation	Ritcey, 1989; Lovell, 1983.
19. <u>Enlèvement des déchets</u>	Les déchets à fort potentiel d'acidification sont enlevés et transportés dans un lieu plus sécuritaire.	Environ. Canada, 1987; Ritcey, 1989.
20. <u>Calcination des sulfures</u>	Les résidus sulfureux sont chauffés à haute température.	Wagner <u>et al.</u> , 1985.

**Tableau 3B**

Avantages et inconvénients des procédés physiques de stabilisation des résidus miniers

Procédé	Avantages	Inconvénients
13. <u>Revégétation directe</u>	Demande peu d'entretien. Coût moyen variant entre \$ 4000 et \$ 6000 / hectare.	Inefficace pour la réduction des eaux de drainage acide
14. <u>Revégétation après recouvrement</u>		
a) barrières naturelles	Intégration du site dans un environnement naturel. Élimine le ruissellement de surface, et restreint le volume des eaux d'infiltration.	Efficacité inconstante. Coût élevé variant entre \$ 40 000 et \$ 65 000 / hectare
b) barrières synthétiques	Moyen théoriquement efficace de limiter l'acidification. Niveau d'entretien moyen.	Coût élevé pour la couverture de grands amas de déchets (\$ 40 000 à \$ 100 000 / hectare). Difficulté de constituer une couverture étanche et de trouver une quantité suffisante de matériau de recouvrement
15. <u>Inondations des déchets</u>	Permet probablement de réduire substantiellement la production d'effluents acides à long terme.	Coût modéré ou élevé. Difficulté importante de submerger les amas élevés. Risque de contamination peu connu.
16. <u>Détournement des eaux de surface</u>	Emploi relativement simple et peu onéreux. Peu d'entretien requis.	Élimination incomplète des effluents acides, en raison des précipitations et des émergences d'eau souterraine.
17. <u>Façonnement et compression des déchets</u>	Les effluents sont moins pollués suite à la limitation de l'apport d'eau et d'oxygène.	Coût moyen. Les résidus de préparation du minerai sont difficiles à travailler. Il est peu probable que l'acidification soit complètement enrayée.
18. <u>Remplissage</u>	Réduction importante de la production d'effluents acides en surface.	Coût très élevé. Oxydation probable causée par le transport des déchets.
19. <u>Enlèvement des déchets</u>	Moyen efficace si la production d'effluents acides est localisée	Nécessité de trouver un lieu de décharge sûr. Difficulté de localiser les secteurs à haut potentiel d'acidification.
20. <u>Calcination des sulfures</u>	Production de résidus complètement inertes qui peuvent être déposés facilement	Technique fort dispendieuse.

**Tableau 4A**

Description sommaire des procédés chimiques et biologiques de stabilisation des résidus miniers

Procédé	Description	Références
21. <u>Agents bactéricides</u>	Application de bactéricides sur les déchets; lauryl sulfate de sodium, benzoate de sodium, acide benzoïque, sorbate de potassium.	Kleinmann <u>et al.</u> , 1981; Onysko <u>et al.</u> , 1984; Dugan, 1987; Halbert <u>et al.</u> , 1984.
22. <u>Composés inorganiques</u>	Application de phosphate minéral, de composés silicatés, de carbonates ou de chlorure de sodium sur la surface des déchets et en profondeur.	Renton <u>et al.</u> , 1988; Hoffmann <u>et al.</u> , 1981; Nebgen <u>et al.</u> , 1981; Chiado <u>et al.</u> , 1988; McCreedy, 1987; Bell, 1988; McSweeney et Madison, 1988; Blowes <u>et al.</u> , 1991.
23. <u>Augmentation de l'alcalinité</u>	Les déchets sont couverts de chaux ou de calcaire, permettant une alcalinisation des eaux d'infiltration.	Environ. Canada, 1987; Ritcey, 1989.
24. <u>Biofilm bactérien</u>	Production d'un biofilm bactérien (polymères extracellulaires) dans les déchets agissant comme un agent scellant empêchant l'entrée d'oxygène.	Blenkinsopp <u>et al.</u> , 1991.

**Tableau 4B**

A avantages et inconvénients des procédés chimiques et biologiques de stabilisation des résidus miniers

Procédé	Avantages	Inconvénients
21. <u>Agents bactéricides</u>	Emploi facile. Inhibe rapidement la production d'effluents acides.	Coût moyen. Difficulté d'atteindre les déchets situés en profondeur. Efficace à court terme seulement.
22. <u>Composés inorganiques</u>	Ces techniques permettent de limiter rapidement l'acidification des effluents.	Coût relativement élevé. Peut rester sans effet si les composés ne sont pas bien mélangés aux déchets. Étant inefficace à long terme, ces techniques sont plus indiqués comme mesure préventive que curative.
23. <u>Augmentation de l'alcalinité</u>	Emploi simple et peu coûteux.	Inefficace à long terme. Il est difficile de déterminer le bon dosage de chaux et de faire en sorte que l'épandage couvre tous les secteurs à fort potentiel d'acidification.
24. <u>Biofilm bactérien</u>	Emploi simple et peu coûteux si un substrat peu onéreux pourrait être utilisé. Les essais préliminaires se sont avérés prometteurs.	Probablement inefficace à long terme à assurer une étanchéité des terrils.

Néanmoins, l'instauration d'une couverture végétale directement sur le matériel minier s'est avéré inefficace pour inhiber la production d'acide (McCready, 1987a; Roche Ltée, 1987). Suite à ce constat, divers matériaux naturels et synthétiques de recouvrement sur lesquels la végétation peut être implantée, ont été testés. Les résultats obtenus pour des périodes de quelques années avec les couvertures naturelles sont très variables, il semble donc que ces techniques laissent subsister, à long terme, un niveau de risque élevé de perturbations des écosystèmes environnants. En effet, la mise en végétation des terrils miniers après recouvrement permet dans la plupart des cas la croissance d'une végétation permanente. Toutefois, ces mesures ne garantissent pas une amélioration de la qualité des eaux d'infiltration (Roche Ltée, 1987) et de plus, la technique de recouvrement est particulièrement onéreuse avec des coûts variant entre 40 000 et 65 000 \$ par hectare (Barth et Martin, 1981; Montreal Engineering Ltd, 1975). Il faut noter également que l'emprunt de matériaux de recouvrement près des sites miniers peut entraîner une dégradation de terres non perturbées (Laird, 1973).

L'utilisation des barrières synthétiques, plus imperméables à l'oxygène que les barrières naturelles, est efficace pour empêcher le DMA sur de courtes et moyennes périodes. Cependant, la biodégradation de ces couvertures, laisse planer un doute sur l'efficacité à long terme de celles-ci (Bell, 1988). De plus, le bris de ces structures à la suite des travaux d'aménagement et des mouvements géologiques est un problème redouté. L'emploi de ces barrières cause également des contraintes au niveau des possibilités d'utilisation des sites à d'autres fins, restreignant ainsi la valeur d'option.

Les résultats obtenus récemment tendent à indiquer que l'inondation des installations, permet de juguler les réactions d'oxydation. Cette approche est dans bien des cas fort coûteuse, et il est impensable dans plusieurs sites (amas de stériles) de pouvoir submerger les déchets (Environnement Canada, 1987). De plus, les réservoirs d'eau ainsi formés seront probablement

incapables de soutenir la croissance et le développement des organismes aquatiques vue la contamination par les métaux. Il n'y aura donc pas de possibilité de récupérer les usages des sites.

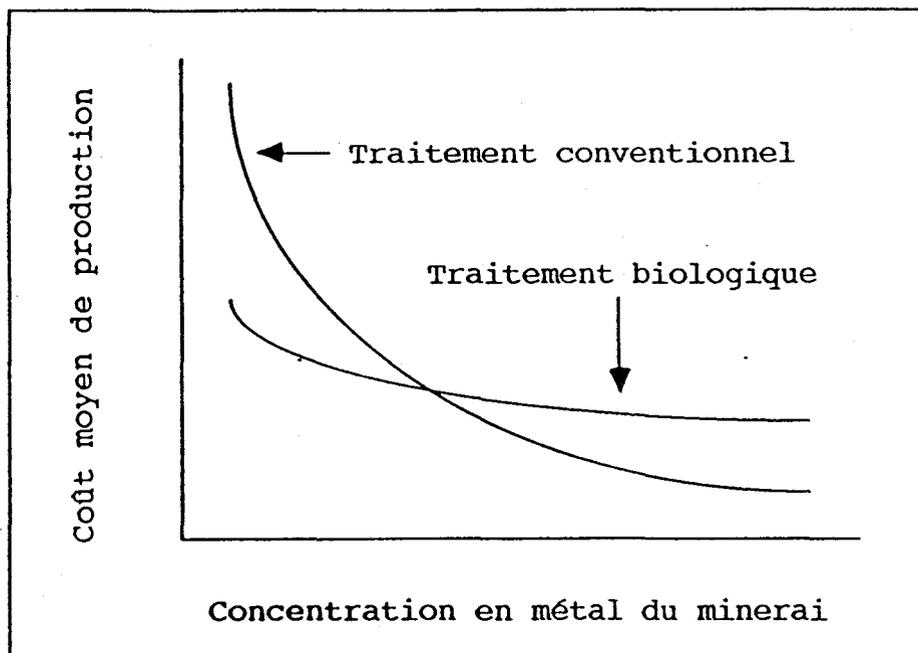
Le remplissage des puits souterrains avec les stériles et résidus permettrait en théorie une réduction importante du potentiel acidogène des sites, toutefois, cette pratique comporte des coûts énormes. De plus, la manutention des déchets favoriserait l'apport en oxygène et par conséquent la production d'eaux fortement contaminées dans la mine, et également la possibilité de générer la création de réactions exothermiques incontrôlables dans les déchets enfouis (Bell, 1988).

Les autres procédés physiques de stabilisation des résidus miniers (tableau 3), sont des moyens recommandables mais insuffisants à eux seuls, pour contrôler l'acidification des eaux minières. L'application de composés chimiques (bactéricides, sels inorganiques, agents alcalins) s'avère particulièrement efficace pour inhiber rapidement l'acidification des effluents. Cependant, les effets ne sont que transitoires et ces usages ne sont donc pas indiqués pour un contrôle durable du problème minier.

### 3.3 Inactivation biochimique des résidus

L'autre approche envisageable pour contrôler le DMA consiste non pas à essayer d'inhiber l'action des microorganismes, mais plutôt d'exploiter leur présence et leur activité dans les déchets miniers. La biolixiviation issue de ce concept permet d'une part d'abolir de façon définitive une partie du potentiel acidogène des déchets par une catalyse de l'oxydation des sulfures. D'autre part, cette approche peut être économiquement intéressante selon la composition en métal du minerai ou des résidus. Ainsi en 1989, plus de 25% du cuivre extrait aux États-Unis, soit l'équivalent de 650 millions de dollars, a été obtenu par lixiviation biologique (Debus, 1989) sur des minerais à faible teneurs en cuivre.

Le Canada participe également au développement de ces biotechnologies, notamment pour l'extraction de l'or et de l'uranium (Lawrence, 1990; McCready, 1987; McCready et Gould, 1989, 1990). L'intérêt économique que peut représenter l'utilisation de techniques de biolixiviation s'accroît avec la diminution de la teneur en métal (or, uranium, métaux de base) des gisements (Debus, 1989; Guay et Silver, 1976, 1980; Gibbs *et al.*, 1985; McNulty et Thompson, 1990). En effet, les coûts de production du métal par biolixiviation deviennent inférieurs aux procédés conventionnels pour les minerais à faible teneurs (Figure 1).



**FIGURE 1.** Coût de production du métal en fonction de la teneur du minerai

En plus de l'intérêt que peut représenter la biolixiviation pour la récupération de métaux à partir de minerais à faible teneur, cette technologie pourrait valoriser les résidus miniers générés par l'industrie minière par la récupération des métaux présents dans ces déchets. Ainsi, si les résidus miniers contiennent des teneurs en métaux insuffisantes pour une extraction rentable par les voies conventionnelles, les bénéfices obtenus par biolixiviation permettraient de réduire d'autant les frais consacrés au contrôle de la pollution (Dr. Roger Guay, communication personnelle). D'autre part, ce type de contrôle du DMA apparaît être avantageux puisque le désamorçage du potentiel acidogène peut se faire durant l'exploitation de la mine, par intégration du procédé dans la chaîne de production du minerai et également par traitement des résidus miniers disposés dans l'environnement.

Pour le contrôle du DMA deux variantes de biolixiviation bactérienne sont possibles soit; la biolixiviation en tas et la biolixiviation en bioréacteur. Dans le premier cas, les résidus ou stériles sont disposés en piles de 10 à 20 mètres sur des surfaces imperméabilisées, les amas sont alors arrosés et les eaux de lixiviation obtenues sont neutralisées et les métaux précipités (Lundgren et Malouf, 1983; Lundgren et Silver, 1980; Bosecker et Kursten, 1978). Cette technique semble à première vue peu envisageable au Canada, où les conditions météorologiques ne sont propices à la croissance bactérienne que pendant une courte période de l'année (McCready, 1987b). Toutefois, l'activité biologique lors de l'oxydation des sulfures entraîne une hausse importante de la température dans les tas. Ces réactions exothermiques pourraient permettre le maintien d'une température adéquate pour une croissance rapide des bactéries oxydant les sulfures (Norris, 1990). Les conditions physico-chimiques ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , nutriments, disponibilité des substrats, température, etc.) prévalant dans les tas miniers ne permettant pas une croissance optimale des microorganismes oxydant les sulfures, la décontamination (désulfuration) de ces rejets miniers nécessiterait quelques années de traitement.

La lixiviation en bioréacteur permet une oxydation plus rapide des sulfures que la lixiviation en tas toutefois les coûts d'opération sont plus élevés. Les différentes études en bioréacteurs opérés en mode continu ont démontré que des temps de bioréaction (temps de résidence) de l'ordre de 7 jours seraient suffisants pour l'obtention de bons rendements de désulfuration de résidus et minerais (Groudev, 1986; Hackl et al., 1989; Helle et Onken, 1987). Contrairement à la lixiviation en tas, l'oxydation biologique des sulfures en réacteur ne peut se faire sur les stériles mais seulement sur les résidus obtenus de la préparation du minerai. La présence de toxiques dans les résidus (cyanures et surfactants) résultant de l'étape flottation du minerai constitue une contrainte à la croissance des bactéries lixiviantes. L'opération d'un tel procédé exige, de plus, beaucoup de travail d'entretien et le risque de contamination des eaux minières est réel si la disposition sur le site des résidus lixiviés et/ou de la fraction pyritique non-traitée est inadéquate. Les effluents acides résultants de l'oxydation des sulfures doivent aussi être neutralisés avant le rejet dans l'environnement. Il faut également prendre note que cette pratique ne permettra pas à l'industrie de se soustraire à l'obligation de restaurer le site, et par conséquent d'établir une couverture végétale. Cependant, le confinement sécuritaire de la fraction sulfureuse non-oxydée sur le site permettrait probablement de ne pas devoir utiliser des barrières synthétiques, mais seulement des barrières naturelles (sable, terre, argile, etc.).

#### **4 LA POLITIQUE CANADIENNE DE R & D**

La section précédente a permis de faire ressortir les avantages et les limites associés aux différentes alternatives technologiques envisageables pour la restauration des sites miniers ou pour le contrôle des rejets acides. Cette partie du rapport est consacrée dans un premier temps à mettre à jour les divers travaux de R & D soutenus par les gouvernements fédéral et provinciaux visant le contrôle du DMA. Par la suite, une méthode d'évaluation quantitative sera appliquée pour l'analyse comparative de cette politique publique canadienne de recherche.

#### 4.1 Orientation de la politique publique

L'industrie minière se préoccupe depuis quelques décennies de la gestion des résidus sulfurés acidogènes, en particulier au terme de l'exploitation minière. La méthodologie utilisée le plus couramment consistait à implanter un couvert végétal sur les terrils réactifs. Cette mesure a certes amélioré l'aspect des sites et leur stabilité en surface, toutefois, elle ne s'est avérée que partiellement efficace pour l'élimination du drainage minier acide. Les exploitants miniers ont donc été contraints à poursuivre l'opération des installations de traitement des eaux acides, et ce, longtemps après la cessation des activités d'exploitation (Côte et Robert, 1988). Ce type de traitement actif qui impose un fardeau financier sur une période de temps indéfinie, a fait ressortir l'urgent besoin de procéder au développement de technologies qui permettront la fermeture des exploitations minières sans qu'il soit nécessaire de maintenir des systèmes de traitement de résidus ou d'entretien onéreux (Filion et Ferguson, 1989). Or, comme nous l'avons vu précédemment on connaît mal les technologies pouvant s'avérer efficaces pour la gestion à long terme des résidus sulfureux et ce tant au Canada qu'à l'étranger (Bell, 1988).

En réponse au besoin de conduire des recherches sur le DMA, le gouvernement canadien, les gouvernements provinciaux et l'industrie minière ont donc implanté deux programmes de recherches, soit le **MEND** (Mine Environment Neutral Drainage) et le **BC AMD** (British Columbia Acid Mine Drainage Task Force). Une partie importante de ces deux programmes, en terme d'effort financier, est consacrée à l'étude des divers moyens de prévention et contrôle du DMA. Ainsi, le MEND y consacre plus de 45 % d'un budget total de 12.5 millions de dollars (pour la période 1989-1994). Des travaux de recherche sont également effectués afin de mettre au point des systèmes améliorés de traitement des effluents acides, une somme de 1.285 millions de dollars est assignée à cet objectif. Ce programme de recherche qui a été formulé au printemps de 1988 comprend plus de 56 projets, regroupés dans cinq domaines de recherches (tableau 5). En

avril 1991, environ 30% du budget total (soit 3.8 millions \$) avait été dépensé. Les budgets des projets de recherche complétés et en cours, ainsi que des nouveaux projets approuvés en avril 1991 sont présentés aux tableaux 6 à 8 (Feasby *et al.*, 1991).

**Tableau 5**

Répartition budgétaire global du programme de recherche (MEND)<sup>1</sup>

Domaine	Coûts (k \$)
Prévision	3 765
Prévention et contrôle	5 705
Traitement	1 285
Surveillance	385
Transfert technologique	225
Imprévus	1 135
<b>Coût total du programme MEND</b>	<b>12 500</b>

<sup>1</sup> tirés de Feasby *et al.*, (1991)

Le programme quinquennal BC AMD a débuté en 1988 avec un budget de 3 millions de dollars assigné à la lutte contre le drainage minier acide. Les travaux de recherche du programme BC AMD peuvent être regroupés en trois domaines de recherche: 1) prévision et prévention, 2) traitement et contrôle, et 3) surveillance environnementale. Les projets réalisés depuis 1988 et ceux présentement en cours sont résumés au tableau 9.

**Tableau 6**  
Projets complétés du programme MEND

Projet	Description	Budget	Dépenses
<u>Prévision</u>			
1.11.1	Revue de littérature sur le DMA des stériles	50 000	50 000
1.15.1 (a)	DMA des puits de mines (Equity Silver)	55 000	53 000
1.16.1 (a)	Évaluation des techniques de prévision	70 000	63 000
1.16.1 (b)	Guide des procédures d'évaluation chimique	23 000	23 000
1.17.1	Étude hydrogéochimique (Waite-Amulet)	235 000	285 000
1.21.1 (a & b)	Modélisation des terrils réactifs	100 000	99 500
<u>Prévention et contrôle</u>			
2.11.1 (a)	Évaluation des sites d'immersion existants	210 000	220 000
2.11.1 (b)	Évaluation des sites d'immersion existants	250 000	136 000
2.22.1	Évaluation du hardpan	150 000	100 000
2.23.1	Documentation des méthodes de disposition	75 000	75 000
2.24.1	Guide de végétation	35 000	33 000
<u>Traitement</u>			
3.11.1 (a)	Traitement par marécage naturel	230 000	281 000
3.11.1 (b)	Traitement par marécage naturel	250 000	273 400
3.12.1 (a)	Évaluation d'un marécage naturel	40 000	40 000
<u>Surveillance</u>			
4.1.1	Guide des méthodes sur le terrain (terril)	20 000	29 000
4.3.1	Matériaux standards de référence	50 000	50 000
4.7.1	Fréquence optimale d'échantillonnage	27 000	27 000
4.7.2	Surveillance biologique du DMA	21 000	21 000
4.7.3	Surveillance des invertébrés aquatiques	53 000	53 000
4.7.4	Surveillance des sédiments	5 000	5 000
<u>Transfert technologique</u>			
5.5.1	Plan de recherche préliminaire du MEND	25 000	25 000
Total		\$ 1 974 000	\$ 1 941 900

Tableau 7

## Projets en cours du programme MEND

Projet	Description	Budget	Dépenses
<u>Prévision</u>			
1.12.1	Compilation de données prédictives du DMA	35 000	10 000
1.16.1 (c)	Évaluation des techniques de prévision (terrils)	40 000	21 000
1.19.1	Tests cinétiques pour le projet Cinola Gold	43 000	43 000
1.23.1	Compilation des règles de prévision du DMA	30 000	5 000
1.24.1	Modélisation préliminaire de la qualité des eaux d'infiltration des dépôts de stériles acides	285 000	21 000
<u>Prévention et contrôle</u>			
2.13.1	Inondation de terrils (Quirke Lake)	835 000	735 000
2.13.2	Inondation de terrils (Solbec Cupra)	260 000	65 000
2.14.1	Végétation submergée sur les parcs à résidus	100 000	25 000
2.21.1	Ingénierie des couvertures sèches (laboratoire)	230 000	216 000
2.21.2	Ingénierie des couvertures sèches (Noranda)	348 000	233 000
2.31.1	Couvertures sèches sur roches stériles (BM&S)	400 000	310 000
2.32.1	Broyage et ségrégation des roches stériles (Kutcho Creek)	195 000	140 000
<u>Transfert technologique</u>			
5.6.1	Deuxième conférence internationale sur la réduction du drainage minier acide (1991)	74 000	100 000
Total		\$ 2 875 000	\$ 1 924 000

Tableau 8

## Nouveaux projets de recherche du programme MEND

Projet	Description	Budget
<u>Prévision</u>		
1.14.1	Évaluation sur le terrain de l'hydrogéochimie de roches stériles (Mine Doyon)	362 000
1.21.1 (c)	Modélisation de terrils réactifs- préparation du manuel RATAP	30 000
1.22.1	Modèle ANSTO (Health Steele)	145 000
1.25.1 (a)	Modèle de fluctuations du sol pour le recouvrement de terrils	49 500
1.26.1 (a)	Méthodologie de modélisation pour la prévision de l'infiltration d'acide dans les roches stériles	90 000
1.31.1	Étude fondamentale des cinétiques de réaction de désagrégation sur SIMS	94 600
1.32.1	Prévision et prévention du DRA- une approche géologique et minéralogique	73 000
<u>Prévention et contrôle</u>		
2.11.1 (c)	Évaluation des sites d'immersion existants	50 000
2.23.2	Analyse hydrogéologique et géochimique du système TTD	60 000
2.23.3 (a)	Enveloppe poreuse entourant les résidus	97 000
2.32.2 (a)	Co-disposition des résidus et des stériles dans des cellules (Mines Selbaie)	96 000
2.35.2	Évaluation au lysimètre de couvertures alternatives	80 500
2.41.1 (a, b)	Oxydation et inertie électrochimique des sulfures	180 000
2.42.1	Développement de polymères synthétiques (Laurentides)	83 000
2.44.1 (a, b)	Obturation microbienne des résidus miniers	100 000
<u>Traitement</u>		
3.11.1 (c)	Traitement par marécage naturel	208 000
3.12.2	Évaluation de marécages à des sites de barrage	45 000
3.21.1 (a)	Récupération des métaux du DMA	25 000
<u>Surveillance</u>		
4.5.1	Guide des méthodes sur le terrain (roches stériles)	100 000
4.6.1	Surveillance de recouvrement (aéroport de Halifax)	280 000
Total		\$ 2 248 600

**Tableau 9**Description des projets de recherche du programme BC AMD (1988-91)<sup>1</sup>Général

Programme de coordination et de maintenance des bases de données	BC 1.0
Ébauche d'un guide des technologies pour l'élimination du DMA	BC 1.1

Prévision et prévention

Études en continu sur le terrain de l'immersion des résidus	BC 2.3
Études de la disposition souterraine des terrils (cas de Westmin)	BC 2.4
Développement d'un modèle de prévision des puits de mines (cas de Equity Silver)	BC 2.5
Broyage et ségrégation des roches stériles (cas de Kutcho Creek)	BC 2.6
Compilation de bases de données de prévision pour les nouvelles mines	nouveau
Ségrégation des roches stériles (cas de Samatosum)	nouveau

Traitement et contrôle

Hydrogéochimie d'un dépôt de stériles (cas de BHP Utah)	BC 3.1
Hydrogéochimie des résidus miniers (modèle de Gibraltar)	BC 3.2
Évaluation sur le terrain de la couverture d'un terril (cas du Mont Washington)	BC 3.3
Évaluation d'une couverture cimentée sur des roches stériles (cas de Westmin)	BC 3.4
Enlèvement des métaux par un marécage naturel (cas de Equity Silver)	BC 3.5.1
Enlèvement des métaux par un marécage artificiel (cas de Noranda Bell)	BC 3.5.2

Surveillance

Optimisation et fréquence d'échantillonnage	BC 4.1
Revue de littérature sur la surveillance biologique	BC 4.2
Développement d'un appareil de surveillance biologique	BC 4.3
Revue de littérature sur les techniques de surveillance des sédiments	BC 4.4
Modélisation de la spéciation des ions (modèle de MINEQL)	BC 4.5

<sup>1</sup> tirés de Filion et al., (1990)

#### 4.2 Analyse de la politique publique

Si les efforts financiers engagés dans ces programmes de recherche témoignent d'une préoccupation réelle de l'industrie et des gouvernements pour régler le problème du DMA, on peut toutefois se demander si cette politique de recherche et de développement constitue la voie la plus prometteuse pour en arriver à des solutions définitives concernant la gestion à long terme des terrils miniers sulfureux. L'examen des programmes MEND et BC AMD montre que les travaux de recherche sont orientés vers la mise au point de techniques d'isolement des terrils et des roches stériles et vers l'amélioration des techniques de traitement des eaux acides. Ainsi, plus de 90% des sommes dépensées jusqu'à maintenant (\$ 2 288 000) dans le programme MEND (tableaux 6 et 7) pour la mise au point de méthodes de prévention et de contrôle du DMA ont été assignées aux essais de barrières humides (52%) et sèches (39%).

Les nouveaux projets retenus (tableau 8) témoignent également de l'intérêt des techniques d'isolement. Plus de 60% du budget (prévention et contrôle) de recherche de \$ 746 500 est consacré aux études de barrières sèches et 7% de ce budget est prévu pour les derniers essais de barrières humides. Environ un tiers du budget est retenu pour des études fondamentales sur la génération du DMA. Les projets de recherche retenus dans le programme BC AMD (tableau 9) montrent également que le développement technologique est orienté vers la mise au point des techniques d'isolement des déchets miniers.

Le développement de technologies biologiques d'extraction des métaux, par oxydation et solubilisation des sulfures métalliques, laisse supposer que cette voie puisse permettre une inactivation pratiquement complète des résidus miniers. Ces technologies de biolixiviation ont d'ailleurs été largement étudiées au Canada et à l'étranger comme méthodes de récupération de certains éléments (or, uranium, cuivre, etc.) à partir de minerais à faible teneur en métaux (Ehrlich et Brierley, 1990; Karavaiko et al., 1977; Lundgren et Silver, 1980; McCready et Gould, 1989;

Murr *et al.*, 1978). Cette technique de valorisation des résidus miniers pourrait tout aussi bien être utilisée au niveau de la chaîne de traitement du minerai que pour la décontamination des terrils miniers sulfureux. Il appert donc que l'utilisation de ces procédés biologiques pour la lutte contre le drainage minier acide pourrait peut être s'avérer un choix technologique environnementalement supérieur aux techniques d'isolement des résidus et de traitement des eaux acides. Or, aucun projet en ce sens n'a été retenu dans les programmes canadiens MEND et BC AMD.

Afin de déterminer si la politique publique canadienne de contrôle du DMA représente la meilleure alternative du point de vue environnemental, une analyse comparative des technologies retenues dans les programmes de recherche et des procédés de traitement par biolixiviation a été réalisée par consultation au près d'un comité d'experts (24 personnes) du milieu minier. Cette évaluation quantitative a été faite à partir du questionnaire présenté à l'annexe 2. Dans une première étape, les répondants devaient déterminer selon leur expérience, l'importance relative des facteurs devant être pris en considération pour l'évaluation environnementale des technologies. La description de chacun des facteurs est présentée en annexe. Les moyennes de points (valeurs de pondération) obtenues pour chacun des facteurs sont indiquées au Tableau 10.

Par la suite, les cinq technologies retenues pour cette étude étaient évaluées selon chacun des facteurs par attribution d'une note entre 1 et 5. Les notes choisies étaient par la suite multipliées par les valeurs de pondération. La somme des points obtenus pour chacun des facteurs constitue les points de classement de la technologie. D'après les résultats présentés au Tableau 11, les cinq technologies seraient d'une performance comparable. Selon les points calculés pour chacun des facteurs, la faisabilité technique et économique représente à l'heure actuelle le majeur obstacle à l'utilisation des procédés de biolixiviation. Toutefois, en ce qui à trait aux autres facteurs, la performance de ces technologies serait tout au moins équivalente et parfois supérieure aux techniques d'isolement des résidus.

**Tableau 10**  
Importance relative des facteurs pour l'évaluation  
environnementale des technologies de contrôle du DMA

Facteurs	Points ( /50)
Faisabilité technique et économique	9.5
Efficacité	9.4
Durabilité	5.3
Inspection et entretien	5.0
Risque de déficience de la technologie (fiabilité)	4.3
Incertitude sur l'efficacité	4.0
Impacts environnementaux en cas de déficience	4.0
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	3.0
Exploitation optimale des ressources	2.4
Ré-exploitation des résidus	1.8
Récupération de l'usage des sites	1.3

**Tableau 11**

Évaluation environnementale comparative des technologies de contrôle du DMA

Facteurs	CSN	CSS	CHU	IBB	IBT
Faisabilité technique et économique	202	195	186	89	135
Efficacité	194	238	225	201	167
Durabilité	66	71	89	64	60
Inspection et entretien	123	96	132	142	125
Risque de déficience de la technologie (fiabilité)	80	66	78	70	76
Incertitude sur l'efficacité	67	56	48	80	83
Impacts environnementaux en cas de déficience	60	53	34	61	73
Contrôle des impacts environ. en cas de déficience	106	94	98	115	103
Exploitation optimale des ressources	13	13	23	48	53
Ré-exploitation des résidus	27	25	17	48	33
Récupération de l'usage des sites	21	13	12	35	29
<b>Total des points ( /1500)</b>	<b>959</b>	<b>920</b>	<b>942</b>	<b>953</b>	<b>937</b>
<b>Moyennes ( n = 6 ) ( /250)</b>	<b>160</b>	<b>153</b>	<b>157</b>	<b>159</b>	<b>156</b>

CSN: Couvertures sèches naturelles

CSS: Couvertures sèches synthétiques

CHU: Couvertures humides

IBB: Inactivation des résidus par biolixiviation en bioréacteur

IBT: Inactivation des résidus par biolixiviation en tas

## 5 CONCLUSIONS

Par suite des limites d'action des différentes techniques de contrôle du DMA, il ressort que la gestion efficace de ce problème, en terme de coûts et de risques de perturbations de l'environnement à long terme, ne peut être exercée que par l'utilisation combinée et optimisée d'un ensemble d'outils de contrôle. Ainsi, pendant l'exploitation de la mine, la production inévitable d'eaux minières fait en sorte que l'industrie doit se pourvoir d'installations de traitement des eaux usées. À cette fin, l'utilisation de traitement passif tel les marécages naturels ou artificiels permet de diminuer concrètement les coûts de traitement de ces eaux. Après la fermeture du site, ces installations peuvent être utilisées comme barrière finale pour les effluents acides émanant de l'imperfection des techniques de prévention de l'acidification ou d'inactivation du potentiel acidogène des déchets miniers. La capacité limitée de rétention de ces systèmes et l'absence de connaissance des effets secondaires (bioaccumulation des métaux et oxydation à long terme des sulfures précipités) font en sorte que pendant l'exploitation toute mesure préventive (détournement des eaux de surface, bactéricides, etc.) permettant d'amoinrir le DMA est souhaitable.

La désulfuration biologique activée (biolixiviation) étant limitée au traitement des résidus, et pouvant laisser un niveau de pollution résiduelle appréciable, il apparaît que la restauration des sites (couverture végétale) devra de toute façon être instaurée afin de pouvoir permettre une réutilisation possible des sites. Cependant, cette technologie devra normalement permettre d'éviter l'usage de couvertures synthétiques peu esthétiques et coûteuses, et ne permettant pas une récupération de l'usage des sites.

L'inondation des déchets bien qu'efficace à court et à moyen terme pour empêcher l'oxydation des sulfures est peu valable dans un cadre de développement durable, puisque le potentiel acidogène des déchets fait en sorte que le risque de contamination demeure, et que les perturbations environnementales qui résulteraient de l'inefficacité de cette technique seraient plus

dommageables, que par la production d'effluents acides suite à une déficience des techniques de revégétation. De plus, il serait pratiquement impossible techniquement, à des coûts raisonnables, de contrôler l'oxydation des sulfures amorcée et par conséquent l'acidification du réservoir. Finalement, l'étendue d'eau ainsi obtenue n'apporterait aucun bénéfice social puisqu'il est improbable que celle-ci puisse être utilisée comme site de récréation (pêche et loisirs), ni comme source d'eau de consommation.

L'évaluation environnementale des technologies employées pour lutter contre le DMA est rendue difficile par le fait que l'efficacité de celles-ci diffère appréciablement d'un site à l'autre. Cependant, l'analyse comparative des technologies de contrôle du DMA réalisée dans cette étude, démontre clairement que l'inactivation des résidus par utilisation des techniques de biolixiviation représente une voie intéressante de traitement des résidus. L'inactivation biochimique des résidus apparaît être en effet, la seule option technologique permettant d'enrayer définitivement les risques environnementaux. Il faut néanmoins noter qu'aucun projet en sens n'a été approuvé dans les programmes MEND et BC AMD. Par contre, près de 50% des argents attribués à la prévention et à l'élimination du DMA sont répartis dans des projets de recherche sur l'inondation des résidus et stériles. Or, comme cela a déjà été mentionné, cette technique ne pourrait être utilisée que pour une fraction des sites miniers et constitue une approche risquée au niveau environnemental tout en ne permettant pas un apport de bénéfice social.

L'utilisation de marécages, d'agents bactéricides et de produits chimiques sont également beaucoup étudiées, même si ces techniques ont déjà été largement testées à l'étranger (Hellier, 1989; Ritcey, 1989). Il appert également que des programmes de recherche devraient être entrepris pour tenter de mettre au point des techniques ou méthodologies intégrées dans la chaîne de traitement du minerai qui permettraient le rejet de résidus non-générateurs d'acides. Ce concept de mine écologique est d'ailleurs considérée par le Centre de Recherches Minérales (Québec), qui en février 1990 proposait un programme de recherche visant la réduction des rejets d'opérations

minières souterraines (André Paquet, ing. M.Sc., communication personnelle). Différents domaines de recherche sont explorés dans ce programme notamment: l'amélioration des techniques de minage, l'exploitation de minerais faiblement réactifs, le remblayage des résidus et stériles, la disposition sélective des résidus et la valorisation des résidus.

## BIBLIOGRAPHIE

- Anon** (1980) Removal of heavy metals from wastewaters: the latest techniques. Can. Min. J., **101**, 64-69.
- Aughenbaugh N.B.** (1990) Environmental suitability of compacted clay liners. Min. Eng. Nov, 1263-1266.
- Barth R.C. et B.K. Martin** (1981) Reclamation of phytotoxic tailings. Minerals Environment, **3**, 55-65.
- Bates M.H., J.N. Veenstra, J. Barber, J. Karleskint, P. Kahn, R. Pakanti et M. Tate** (1984) Treatment of acid mine water discharging into the tar creek watershed. Dans Proc. 39th Ind. Waste Conf., Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, U.S.A., pp. 201-213.
- Bell A.V.** (1988) Acid waste rock management at canadian base metal mines. Dans Mine drainage and surface mine reclamation. Vol. 2. Mine reclamation, abandoned mine lands and policy issues. U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Mines, Inf. Circ. IC9184, Washington, DC, U.S.A., pp. 192-199.
- Bennett P.G., C.R. Ferguson et T.H. Jeffers** (1991) Biological treatment of acid mine waters- case studies. Dans Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides. Vol. 1. Montréal, Québec, pp. 283-300.
- Berthelin J.** (1987) Des bactéries pour extraire les métaux. La Recherche, **188**, 720-725.
- Blenkinsopp S.A., D.C. Herman et J.W. Costerton** (1991) The use of biofilm bacteria to exclude oxygen from acidogenic mine tailings. Dans Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides. Vol. 1. Montréal, Québec, pp. 369-378.
- Blowes D.W., E.J. Reardon, J.L. Jambor et J.A. Cherry** (1991) The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. Geochim. Cosmochim. Acta, **55**, 965-978.
- Bosecker K. et M. Kürsten** (1978) Recovery of metallic raw materials by microbial leaching. Proc. Biochem. Oct, 2-4.
- Brierley C.L.** (1990) Bioremediation of metal-contaminated surface and groundwaters. Geomicrobiol. J. **8**, 201-223.
- Brierley J.A. C.L. Brierley et G.M. Goyak** (1986) AMT-bioclain - a new wastewater treatment and metal recovery technology. Dans Fundamental and Applied Biohydrometallurgy. Lawrence R.W., R.M.G. Branion et H.G. Ebner (Éditeurs), Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, pp. 291-304.
- Carlson-Gunnoe N.E., C.B. Law et G.K. Bissonnette** (1983) *In situ* persistence of indicator bacteria in streams polluted with acid mine drainage. Wat. Res. **17**, 1119-1124.

- Caruccio F.T. et G. Geidel** (1987) The in-situ mitigation fo acidic drainages - management of hydro-geochemical factors. *Dans Comptes rendus, Drainage minier acide*, Séminaire, Nouvelle-Écosse, pp. 479-497.
- Chiado E.D., J.J. Bowders et J.C. Sencindiver** (1988) Phosphatic clay slurries for reducing acid mine drainage from reclaimed sites. *Dans Mine drainage and surface mine reclamation*. Vol. 1. Mine water and mine waste. U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Mines, Inf. Circ. IC9183, Washington, DC, U.S.A., pp. 44-51.
- Christison J., N.S. Lakshamanan, N.S. Belson et J. Cairns** (1985) Biological Control of *Thiobacillus ferrooxidans* by Predatory Organisms. CANMET Energy, Mines and Resources Canada, rapport OSQ83-00197, Ottawa.
- Côté D. et J.M. Robert** (1988) Projets de recherches visant la restauration des parcs miniers sulfureux au Québec. Service de la technologie minière, Québec.
- Debus K.H.** (1989) Identifying the biohydrometallurgical processes with the greatest probability of commercial adoption. *Dans Biohydrometallurgy*. Int. Symp. Proc., Salley J., R.G.L. McCready et P.L. Wichlacz (Éditeurs), Jackson Hole, Wyoming, U.S.A., pp. 487-498.
- Down C.G. et J. Stocks** (1977) Environmental Impact of Mining. Applied Science Publishers, Londres, Angleterre, 371 pages.
- Doyle P.J., J.N. Lester et R. Perry** (1978) Survey of litterature and experience on the disposal of sewage sludge on land. Final report, Department of the Environment, Royaume-Uni.
- Dugan P.R.** (1987) Prevention of formation of acid drainage from high-sulfur coal refuse by inhibition of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms. II. Inhibition in "Run of Mine" refuse under simulated field conditions. Biotechnol. Bioeng. **29**, 49-54.
- Dvorak, D.H., R.S. Hedin, S.P. McIntire et H.M. Edenborn** (1991) Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulphate reduction- results from pilot-scale reactors. *Dans Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides*. Vol. 1. Montréal, Québec, pp. 301-314.
- Ehrlich H.L. et C.L. Brierley** (1990) Microbial Mineral Recovery. McGraw-Hill Publishing Company, New York, U.S.A, 445 pages.
- Environnement Canada** (1987) Le traitement des eaux usées provenant de l'exploitation des mines et de la préparation du minerai. Service de la Protection de l'Environnement, rapport SPE 2/MM/3, Environnement Canada, Ottawa.
- Errington J.** (1991) The regulation of acid mine drainage. *Dans Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides*. Vol. 2. Montréal, Québec, pp. 89-100.
- Feasby G., G. Tremblay et M. Blanchette** (1991) The mine environment neutral drainage (MEND) program. *Dans Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides*. Vol. 1. Montréal, Québec, pp. 1-26.
- Fennessy M.S. et W.J. Mitsch** (1989) Treating coal mine drainage with an artificial wetland. Res. J. Wat. Pollut. Control Fed. **61**, 1691-1701.

- Filion M. et K. Ferguson** (1989) Acid mine drainage research in Canada. *Dans Proc. Int. Symp. on Tailings and Effluent Management*. Pergamon Press, Halifax, Nouvelle-Écosse, pp. 61-72.
- Filion M., K. Ferguson et L. Sirois** (1990) Acid mine drainage research in Canada. *Dans Comptes Rendus, Colloque sur la réduction et le drainage des effluents acides générés par les activités minières*. NEDEM, Val-d'Or, Québec, pp. 7-34.
- Gibbs H.E., M. Errington et F.D. Pooley** (1985) Economics of bacterial leaching. *Can. Metallurg. Quart.* **24**, 121-125.
- Gignac C. et F. Perron** (1991) Le contrôle législatif inhérent à l'exploration minière. *Dans Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides*. Vol. 2. Montréal, Québec, pp. 101-118.
- Gilbert R.** (1975) Synthèse bibliographique des répercussions de l'exploitation minière sur l'environnement. Thèse de Maîtrise, Univ. Laval, Québec.
- Groudev S.N.** (1986) Continuous bacterial leaching of copper sulphide concentrates. *Dans Fundamental and Applied Biohydrometallurgy*. Lawrence R.W., R.M.R. Branion et H.G. Ebner (Éditeurs), Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, pp. 43-50.
- Guay R. et M. Silver** (1980) Uranium biohydrometallurgy. *Proc. Biochem. Déc.* **8-11**.
- Guay R., M. Silver et A.E. Torma** (1976) Microbiological leaching of a low-grade uranium ore by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Eur. J. Appl. Microbiol.* **3**, 157-167.
- Hackl R.P., F.R. Wright et L.S. Gormely** (1989) *Dans Biohydrometallurgy*. Int. Symp. Proc., Salley J., R.G.L. McCready et P.L. Wichlacz (Éditeurs), Jackson Hole, Wyoming, U.S.A., pp. 533-550.
- Halbert B.E., J.M. Scharer et R.A. Knapp** (1984) Assessment of the Mechanism of Bacterially Assisted Oxidation of Pyritic Uranium Tailings. CANMET, National Uranium Tailings Program, Energy, Mines and Ressources Canada, rapport 14SQ.23241-3-1666, Ottawa.
- Hasset J.M., J.C. Jennet et J.E. Smith** (1980) Heavy metal accumulation by algae. *Dans Contaminants and Sediments*. Baker R.A. (Éditeur), Ann Arbor Science, Michigan, U.S.A., pp. 409-424.
- Hedin R.S., D.M. Hyman et R.W. Hammack** (1988) Implications of sulfate-reduction and pyrite formation processes for water quality in a constructed wetland: Preliminary observations. *Dans Mine drainage and surface mine reclamation*. Vol. 1. Mine water and mine waste. U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Mines, Inf. Circ. IC9183. Washington, DC, U.S.A., pp. 382-389.
- Helle U. et U. Onken** (1987) Continuous bacterial leaching of a pyritic flotation concentrate by mixed cultures. *Dans Biohydrometallurgy*. Int. Symp. Proc., Norris P.R. et D.P. Kelly (Éditeurs), Warwick, Angleterre, pp. 61-76.
- Hellier W.M.** (1989) Constructed wetlands in Pennsylvania: an overview. *Dans Biohydrometallurgy*. Int. Symp. Proc., Salley J., R.G.L. McCready et P.L. Wichlacz (Éditeurs), Jackson Hole, Wyoming, U.S.A., pp. 599-612.

- Henrot J. et R.K. Wieder** (1990) Processes of iron and manganese retention in laboratory peat microcosms subjected to acid mine drainage. J. Envir. Qual. **19**, 213-320.
- Hoffman M.R., B.C. Faust, F.A. Panda, H.H. Kuo et H.M. Hsuchiga** (1981) Kinetics of the Removal of Iron Pyrite from Coal by Microbial Catalysis. Appl. Envir. Microbiol. **42**, 259-271.
- Jeffers T.H., C.R. Ferguson et D.C. Seidel** (1989) Biosorption of metal contaminants using immobilized biomass. *Dans* Biohydrometallurgy. Int. Symp. Proc., Salley J., R.G.L. McCready et P.L. Wichlacz (Éditeurs), Jackson Hole, Wyoming, U.S.A., pp. 317-328.
- Jongejan A.** (1984) Observations on the Microbial Cellulose-Degradation Process that Decreases Water Acidity. CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, rapport MRP/MSL 84-33(J), Ottawa.
- Karavaiko G.I., S.I. Kuznetsov et A.I. Golonizik** (1977) The bacterial leaching of metals from ores. Karavaiko G.I., S.I. Kuznetsov et A.I. Golonizik (Éditeurs), Technicopy Limited, Stonehouse, Angleterre, 205 pages.
- Kelly M.** (1988) Mining and the freshwater environment. Elsevier Science Publishers and British Petroleum Company, Londres, Angleterre, 231 pages.
- Kleinmann, R.L.P., D.A. Crerar et R.R. Pacelli** (1981) Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. Min. Eng. **33**, 300-305.
- Lakshmanan V.I., J. Christison, K.R. Knapp, J. Scharer et V. Sanmugaseunderam** (1985) A review of bioadsorption techniques to recover heavy metals from mineral processing streams. *Dans* BIOMINET Proc. McCready R.G.L. (Éditeur), CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, rapport SP85-6, pp. 75-98.
- Larsen H.P. et L.M. Ross** (1976) Two-stage process chemically treats mine drainage to remove dissolved metals. Eng. Min. J. **177**, 94-96.
- Lawrence R.W.** (1990) Biotreatment of gold ores. *Dans* Microbial Mineral Recovery. Ehrlich H.L. et C.L. Brierley (Éditeurs), McGraw-Hill Publishing Company, New York, U.S.A., 127-148.
- Lundgren D.G. et E.E. Malouf** (1983) Microbial extraction and concentration of metals. *Dans* Advances in Biotechnological Processes. Alan R. Liss Inc., New York, U.S.A., pp. 223-249.
- Lundgren D.G. et M. Silver** (1980) Ore leaching by bacteria. Ann. Rev. Microbiol. **34**, 263-283.
- Lovell H.L.** (1983) Coal mine drainage in the United States- an overview. Wat. Sci. Tech. **15**, 1-25.
- McCready R.G.L.** (1987a) A review of the physical, chemical and biological measures to prevent acid mine drainage: an application to the pyritic Halifax shales. *Dans* Comptes rendus, Drainage minier acide, Séminaire, Nouvelle-Écosse, pp. 333-356.

- McCready R.G.L.** (1987b) Progress in the bacterial leaching of metals in Canada. *Dans Biohydrometallurgy*. Int. Symp. Proc., Norris P.R. et D.P. Kelly (Éditeurs), Warwick, Angleterre, pp. 177-196.
- McCready R.G.L. et W.D. Gould** (1989) Bioleaching of uranium at Denison mines. *Dans Biohydrometallurgy*. Int. Symp. Proc., Salley J., R.G.L. McCready et P.L. Wichlacz (Éditeurs), Jackson Hole, Wyoming, U.S.A., pp. 477-486.
- McCready R.G.L. et W.D. Gould** (1990) Bioleaching of uranium. *Dans Microbial Mineral Recovery*. Ehrlich H.L. et C.L. Brierley (Éditeurs), McGraw-Hill Publishing Company, New York, U.S.A., pp. 107-125.
- McNulty T.P. et D.L. Thompson** (1990) Economics of bioleaching. *Dans Microbial Mineral Recovery*. Ehrlich H.L. et C.L. Brierley (Éditeurs), McGraw-Hill Publishing Company, New York, U.S.A., pp. 171-182.
- McSweeney K. et F.W. Madison** (1988) Formation of a cemented subsurface horizon in sulfidic minewaste. *J. Envir. Qual.* **17**(2), 256-262.
- Miller S, P. Irvine, P. Redann et P. Bell** (1983) Acid Mine Drainage Control and Treatment - Investigation Strategy, Case Studies and New Technology. *Dans Proc. Int. Conf. on Water Regime In Relation to Milling, Mining and Waste Treatment Including Rehabilitation with Emphasis on Uranium Mining*. Darwin, Australie.
- Ministère des finances** (1986) Les programmes gouvernementaux canadiens, les établissements financiers internationaux et le Fonds monétaires international: leurs répercussions sur les marchés mondiaux des minéraux. *Dans Pour faire face à la concurrence*. Séminaire, Association minière du Canada, Québec.
- Moffet D, G. Sahary, M.C. Campbell et J.C. Ingles** (1977) CANMET's Environmental and Process Research on Uranium. CANMET, rapport 77-53, Ottawa.
- Monenco Limited** (1984) Sulphide Tailings Management Study. Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie, Ottawa.
- Montreal Engineering Ltd** (1975) Waste management investigation of the Aldermac and Bevcon abandoned mine sites. Environnement Canada, Service de Protection de l'Environnement, New Brunswick, pp 2-10.
- Mount D.I.** (1973) Chronic effects of low pH on fathead minnow survival, growth and reproduction. *Wat. Res.* **7**, 987-993.
- Murr L.E., A.E. Torma et J.A. Brierley** (1978) Metallurgical applications of bacterial leaching and related microbiological phenomena. Academic Press, New York, U.S.A., 526 pages.
- Nakamura D., T. Noike et J. Matsumoto** (1986) Effect of Operation Conditions on Biological Fe<sup>2+</sup> Oxidation with Rotating Biological Contactors. *Water Res.* **20**, 73-77.
- Nakamura K.** (1988) Biological metal removal from mine drainage. *Dans Mine drainage and surface mine reclamation*. Vol. 1. Mine water and mine waste. U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Mines, Inf. Circ. IC9183, Washington, DC, U.S.A., pp. 274-278.

- Nebgen J.W., W.H. Engelmann et D.F. Weatherman** (1981) Inhibition of Acid Mine Drainage Formation, The Role of Insoluble Iron Compounds J. Envir. Sci., 23-27.
- Nicholas G.D. et E.G. Foree** (1982) The Application of Surface Sealant Technology for the Prevention of Acid Mine Drainage. Commonwealth Technology Inc., Lexington, KY, U.S.A.
- Nolan, Davis et Associates** (1987) Study of acid waste rock management at canadian base metal mines. The National Uranium Tailings Program. CANMET, rapport. 23317-6-1738, Ottawa.
- Norris P.R.** (1990) Acidophilic bacteria and their activity in mineral sulfide oxidation. *Dans* Microbial Mineral Recovery. Ehrlich H.L. et C.L. Brierley (Éditeurs), McGraw-Hill Publishing Company, New York, U.S.A., pp. 3-27.
- Olem H. et R.F. Unz** (1977) Acid Mine Drainage Treatment with Rotating Biological Contactors. Biotechnol. Bioeng. 19, 1475-1491.
- Onysko S.J., R.L.P. Kleinmann et P.M. Erickson** (1984) Ferrous iron oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* : Inhibition with benzoic acid, sorbic acid and sodium lauryl sulfate. Appl. Envir. Microbiol. 48, 229-231.
- Opitz B.E., D.R. Sherwood, M.E. Dodson et R.J. Serne** (1985) Tailings neutralization and other alternatives for immobilizing toxic materials in tailings. Div. of radiation programs and Earth Sc., Office of Nuclear Regulatory Research, NUREG|CR-4259, PNL-5467, RU.
- Perrier R. et J.E. Maclatchy** (1991) Le contexte réglementaire du gouvernement canadien sur le drainage minier acide. *Dans* Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides. Montréal, Québec.
- Renton J.J., A.H. Stiller et T.E. Rymer** (1988) The use fo phosphate materials as ameliorants for acid mine drainage. *Dans* Mine drainage and surface mine reclamation. Vol. 1. Mine water and mine waste. U.S. Dep. of the Interior, Bureau of Mines, Inf. Circ. IC9183. Washington, DC, U.S.A., pp. 67-75.
- Ripley E.A., R.E. Redman et J. Maxwell** (1982) Environmental impact of Mining. Centre for Resource Studies Queen's University, Kingston, Ontario.
- Ritcey G.M.** (1989) Tailings management. Problems and solutions in the mining industry. CANMET, Energy, Mines and Ressources Canada, Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas.
- Ritcey G.M.** (1991) Deep water disposal of pyritic tailings. *Dans* Comptes rendus, Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides. Vol. 1. Montréal, Québec., pp. 421-442.
- Robertson S. et Kirsten (B.C.) Inc.** (1989) *Dans* Draft acid rock drainage technical guide. British Colombia acid mine drainage task force report. Vol. 1. BITech publishers Ltd, Vancouver, B.C., Canada.
- Roche Ltée** (1987) Assainissement des eaux et revitalisation des terrils Parcs à résidus des mines Solbec et Cupra. Québec, 243 pages.

- Rorison I.H.** (1972) The effect of extreme soil acidity on the nutrient uptake and physiology of plants. *Dans* Int. Institute for Land Reclamation and Improvement, Symp. on Acid Sulphate Soils. Vol. 1, Wageningen, pp. 223-251.
- Sasseville J.L. et Y. Thomassin** (1990) L'application des normes environnementales à l'industrie minière. *Dans* Les mines du Québec dans leur monde... et dans le monde. Panuel annuel de l'Association minière du Québec, Montebello, Québec.
- Scott J.S et K. Bragg** (1975) Mine and Mill Wastewater Treatment. Water Pollution Control Directorate. Service de Protection de l'Environnement, rapport EPS3-WP-75-5, Environnement Canada, Ottawa.
- Seed L.J.** (1971) The Control of *Ferrobacillus-Thiobacillus* Bacteria by Means of Predatory Organisms - A Literature Review. CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, rapport EMI 71-21, Ottawa.
- Shearer R.E. et W.A. Everson** (1969) Effect of Antibacterial Agents on Mine Drainage. U. S. NTIS, rapport PB 191215.
- Sloan F.T., A.R. Abernathy, J.C. Jennett et G.V. Goodman** (1984) Removal of metal ions from wastewater by algae. *Dans* Proc. 38th Industrial Waste Conf., Purdue University. Bell J.M. (Éditeur), Ann Arbor Science, Michigan, U.S.A., pp. 423-429.
- Tessier A., P.G.C. Campbell, J.C. Auclair, M. Bisson et H. Boucher** (1982) Évaluation de l'impact de rejets miniers sur des organismes biologiques. INRS-Eau, rapport scientifique No. 146.
- Townsley C.C., I.S. Roos et A.S. Atkins** (1986) Biorecovery of metallic residue from various industrial filamentous fungi. *Dans* Fundamental and Applied Biohydrometallurgy. Lawrence R.W., R.M.G. Branion et H.G. Ebner (Éditeurs), Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, pp. 279-289.
- Tuttle J.H., P.R. Dugan et C.I. Randles** (1969) Microbial sulphate reduction and its potential utility as an acid mine water pollution abatement procedure. Appl. Microbiol. 17, 297-302.
- Tyler G., A.M. Balsberg Pahlsson, G. Bengtsson, E. Baath et L. Tranvik** (1989) Heavy-metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates. Wat. Air Soil Pollut. 47, 189-215.
- Wagner P., E.J. Peterson et E.F. Thode** (1985) Control of trace element releases from high-sulfur preparation wastes: technology and costs. *Dans* Chemistry for Protection of the Environment, 5th Int. Conf. Leuven, Belgique, 29 pages.
- Wakao N., T. Takahashi, Y. Sakurai et H. Shiota** (1979) A treatment of acid mine water using sulphate reducing bacteria. J. Ferment. Technol. 57, 445-452.
- Warner R.W.** (1971) Distribution of biota in a stream polluted by acid mine-drainage. Ohio J. Sci. 71, 202-215.
- Watkin E.M. et J. Watkin** (1983) Inhibiting pyrite oxidation lowers reclamation costs. Can. Min. J. 104, 29-31.

- Wilmoth R.C. et R.B. Scott** (1976) Water recovery from acid mine drainage. *Dans Proc. 3rd National Conf. on Complete Water Re-use.* Cecil L.K. et P.C. Welsh (Éditeurs), Cincinnati, Ohio, U.S.A., pp. 441-446.
- Wing R.E.** (1983) Dissolved heavy-metal removal by insoluble starch xanthate (ISX). *Envir. Prog.* **2**, 269-272.
- Wortman A.T., H. Voelz, R.C. Lantz et G.K. Bissonnette** (1986) Effect of acid mine water on *Escherichia coli* : structural damage. *Curr. Microbiol.* **14**, 1-5.

## ANNEXE 1

## Liste des personnes ressources ayant participé à cette étude

---

**R.D. Tyagi, ing., Ph. D.**  
 Professeur, INRS-Eau,  
 Université du Québec  
 2800, Rue Einstein, C.P. 7500  
 Sainte-Foy, Québec, Canada,  
 G1X 4N8, tél: (418) 654-2617

**Pierre J. Gélinas, ing., Ph. D.**  
 Professeur, Département de Géologie,  
 Faculté des Sciences, Université Laval  
 Sainte-Foy, Québec, Canada,  
 G1K 7P4, tél: (418) 656-2411

**Yves Thomassin, M. Sc.**  
 Biologiste  
 Association Minière du Québec Inc.  
 Place de la cité, 942-2635 Boul. Hochelaga  
 Sainte-Foy, Québec, Canada,  
 G1V 4W2, tél: (418) 657-2016

**Claude St-Arneault**  
 Biologiste  
 Coordonnateur à l'environnement  
 Minnova Inc., Division Lac Dufault  
 C.P. 2000, Rouyn-Noranda,  
 Québec, Canada,  
 J9X 5B4, tél: (819) 797-2501

**Roger Guay, Ph. D.**  
 Président, Recbiomine Inc.  
 Vice-président, Enviromine Inc.  
 1352, Rue Delaunay, L'Ancienne-Lorette,  
 Québec, Canada,  
 G2E 3V4, tél: (418) 877-3997

**Jean-Louis Sasseville, Ph. D.**  
 Professeur, INRS-Eau,  
 Université du Québec  
 2800, Rue Einstein, C.P. 7500  
 Sainte-Foy, Québec, Canada,  
 G1X 4N8, tél: (418) 654-2551

**Robert L. Tremblay**  
 Ingénieur-géologue  
 Gouvernement du Québec,  
 Ministère de l'Énergie et des Ressources,  
 Service du développement minier  
 5700, 4<sup>e</sup> Avenue Ouest, Bureau A-213,  
 Charlesbourg, Québec, Canada,  
 G1H 6R1, tél: (418) 643-4896

**Randy A. Knapp**  
 Ingénieur principal  
 SENES Consultants Limited  
 52, West Beaver Creek Road,  
 Richmond Hill, Ontario, Canada,  
 L4B 1L9, tél: (416) 764-9380

**Richard Painchaud**  
 Microbiologiste  
 Président de Biolix Inc.  
 2755, Rue Dalton, suite 110,  
 Sainte-Foy, Québec, Canada,  
 G1P 3T1, tél: (418) 657-2666

**André Paquet, M. Sc.**  
 Ingénieur, Groupe NEDEM  
 Gouvernement du Québec,  
 Ministère de l'Énergie et des Ressources,  
 Centre de Recherches Minérales  
 2700, Rue Einstein,  
 Sainte-Foy, Québec, Canada,  
 G1P 3W8, tél: (418) 643-4540

---

**ANNEXE 2A**

Questionnaire sur l'évaluation environnementale des technologies  
de contrôle du DMA (version française)

---

Sainte-Foy, le 12 mars 1992

Madame/Monsieur

Vous trouverez ci-joint un questionnaire portant sur l'analyse comparative de diverses technologies étant envisagées pour la fermeture définitive des parcs à résidus miniers générateurs d'acides. L'analyse comparative des technologies est basée sur une évaluation effectuée par un comité d'experts du milieu minier. La présente étude est réalisée dans le cadre d'un contrat de recherche pour étudiants diplômés du Conseil canadien de la recherche sur l'évaluation environnementale (CCREE). L'objectif de ce questionnaire consiste à déterminer quelles sont, à l'heure actuelle, les méthodologies les plus performantes en termes de réduction des impacts et des risques d'impacts environnementaux pouvant résulter de la fermeture des terrils miniers sulfureux.

Nous vous demandons donc courtoisement s'il vous serait possible de bien vouloir participer à cette étude. Il faut noter que les renseignements qui seront fournis dans le présent questionnaire ne seront utilisés qu'à des fins statistiques. De plus, une copie du document final issue de cette recherche sera acheminée à chacun des répondants pour leur usage personnel. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec moi. Merci d'avance pour votre précieuse collaboration.

---

Jean-François Blais

tél: (418) 654-2699

## **Évaluation environnementale comparative des technologies de contrôle du DMA**

La présente méthode d'évaluation est principalement orientée vers l'évaluation des impacts et risques d'impacts environnementaux pouvant résulter de l'application des technologies employées pour la restauration définitive des sites miniers. Les cinq groupes de technologies suivants sont évalués:

- 1) Couvertures sèches naturelles
- 2) Couvertures sèches synthétiques
- 3) Couvertures humides
- 4) Inactivation des résidus par biolixiviation en bioréacteur
- 5) Inactivation des résidus par biolixiviation en tas

La première étape de cette méthode d'analyse consiste à déterminer, selon l'expérience du répondant, l'**importance relative** des facteurs devant être pris en considération pour l'évaluation environnementale des technologies (Tableau I). Pour des fins statistiques, la somme des points (valeurs de pondération) attribués aux facteurs doit être égale à 50. Nous vous prions de porter une attention particulière aux valeurs de pondération attribuées à chacun des facteurs.

Les valeurs de pondération de chacun des facteurs doivent par la suite être utilisées dans le système de classification (Tableaux II à VI). Les cinq technologies sont par la suite évaluées selon chacun des facteurs par attribution d'une note entre 1 et 5 (encercler le choix). Par exemple, au Tableau II, *quelle est la faisabilité technique et économique de l'utilisation de couvertures sèches naturelles pour le contrôle du DMA?* Les notes choisies sont par la suite multipliées par les valeurs de pondération. La somme de la colonne (Total des points) constitue les points de classement de la technologie.

Il faut prendre note que les cinq groupes de technologies comprennent différentes variantes. On suggère donc au répondant de ne tenir compte que de la variante la plus performante à sa connaissance en termes du rapport coût/efficacité. Il serait également utile de décrire les variantes utilisées pour l'analyse. Par exemple: couvertures sèches synthétiques (recouvrement avec une toile de PVC).

L'auteur de cette méthode d'analyse est également conscient de la variabilité importante en ce qui concerne l'efficacité des techniques de restauration selon les sites testés. Les répondants sont donc priés d'effectuer l'analyse dans le cadre d'une utilisation de la technologie pour la restauration d'un ensemble de sites miniers avec des caractéristiques différentes (i.e. essayer de déterminer une efficacité moyenne de la technologie).

À la page "Commentaires", les répondants sont invités à répondre de façon brève aux points suivants:

- A) Quelle est le niveau de connaissance ou d'expertise du répondant vis à vis les cinq différents groupes de technologies analysés?
- B) À votre avis, quels sont les points forts et les lacunes de cette méthode d'analyse?
- C) Quels seraient les autres facteurs à considérer pour l'amélioration de cette méthode d'analyse?
- D) Existe-il selon vous des méthodologies, économiquement viables, plus performantes pour la restauration des parcs à résidus miniers sulfureux? Si oui, laquelle ou lesquelles?

E) À votre connaissance, existe-il des techniques plus adéquates pour l'évaluation environnementale comparée des technologies de restauration des parcs à résidus miniers? Si oui, laquelle ou lesquelles?

F) Autres commentaires.

N.B. Si vous êtes intéressés à obtenir l'analyse des résultats de cette étude réalisée auprès de plusieurs personnes qualifiées du domaine minier, veuillez S.V.P. inclure votre adresse postale avec le présent questionnaire.

**COMMENTAIRES**

**Tableau I**

Détermination de l'importance relative des facteurs pris en compte dans l'évaluation environnementale des technologies de contrôle du DMA

<u>Facteurs</u>	<u>Description</u>	<u>Points</u>
Faisabilité technique et économique	Possibilités de mise en place et d'opération de la technologie sous diverses conditions physiques, biogéochimiques, climatiques, etc. Coût raisonnable.	
Efficacité	Décontamination prévisible des effluents miniers suite à l'application de la méthode. i.e. niveau de pollution résiduelle prévisible à long terme après la fermeture du site.	
Incertitude sur l'efficacité	Absence de connaissance en ce qui concerne la performance de la technologie pour la restauration définitive du site minier.	
Durabilité	Durée où le contrôle sera efficace après installation de la technologie. Période de temps pendant laquelle le niveau de pollution (DMA) est gardé faible après la fermeture du site.	
Risque de déficience de la technologie (fiabilité)	Niveau de risques de perturbations environnementales suite aux bris ou à la dégradation des installations, et suite à des causes naturelles (mouvements géologiques, conditions climatiques, etc.) après la fermeture du site.	
Impacts environnementaux en cas de déficience	Importance des impacts environnementaux pouvant résulter de la déficience de la technologie après la fermeture du site.	
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	Capacité de contrôler les impacts environnementaux à un niveau très faible en cas de déficience de la technologie après la fermeture du site.	
Inspection et entretien	Niveau de surveillance et d'entretien requis des installations après la fermeture du site.	

Exploitation optimale des ressources	Contribution de la technologie à l'exploitation optimale des ressources naturelles (récupération maximale des métaux).	
Ré-exploitation des résidus	Possibilités d'exploiter les résidus suite à la raréfaction des gisements à hautes teneurs en métaux.	
Récupération de l'usage des sites	Possibilités d'aménager le site à différentes fins après la fermeture du site (récréatives, sportives, etc.).	
		Total 50 points

**Tableau II**

Système de classification utilisé pour l'évaluation environnementale des options technologiques de contrôle du DMA

(cas: Couvertures sèches naturelles)

<u>Facteurs</u>	<u>Échelle</u>					<u>Points (selon le tableau I)</u>	<u>Total des points</u>
Faisabilité technique et économique	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Efficacité	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Incertitude sur l'efficacité	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Durabilité	1 an 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Risque de déficience de la technologie	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Inspection et entretien	Aucun 5	4	Moyen 3	2	Fréquent 1		
Exploitation optimale des ressources	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Ré-exploitation des résidus	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Récupération de l'usage des sites	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Total des points de classement							

**Tableau III**

Système de classification utilisé pour l'évaluation environnementale des options technologiques de contrôle du DMA

(cas: Couvertures sèches synthétiques)

<u>Facteurs</u>	<u>Échelle</u>					<u>Points (selon le tableau I)</u>	<u>Total des points</u>
Faisabilité technique et économique	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Efficacité	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Incertitude sur l'efficacité	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Durabilité	1 an 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Risque de déficience de la technologie	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Inspection et entretien	Aucun 5	4	Moyen 3	2	Fréquent 1		
Exploitation optimale des ressources	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Ré-exploitation des résidus	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Récupération de l'usage des sites	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Total des points de classement							

**Tableau IV**

Système de classification utilisé pour l'évaluation environnementale des options technologiques de contrôle du DMA

(cas: Couvertures humides)

<u>Facteurs</u>	<u>Échelle</u>					<u>Points (selon le tableau I)</u>	<u>Total des points</u>
Faisabilité technique et économique	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Efficacité	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Incertitude sur l'efficacité	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Durabilité	1 an 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Risque de déficience de la technologie	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Inspection et entretien	Aucun 5	4	Moyen 3	2	Fréquent 1		
Exploitation optimale des ressources	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Ré-exploitation des résidus	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Récupération de l'usage des sites	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Total des points de classement							

**Tableau V**

Système de classification utilisé pour l'évaluation environnementale des options technologiques de contrôle du DMA

(cas: **Inactivation des résidus par biolixiviation en bioréacteur**)

<u>Facteurs</u>	<u>Échelle</u>					<u>Points (selon le tableau I)</u>	<u>Total des points</u>
Faisabilité technique et économique	Faible <b>1</b>	<b>2</b>	Moyen <b>3</b>	<b>4</b>	Élevé <b>5</b>		
Efficacité	Faible <b>1</b>	<b>2</b>	Moyen <b>3</b>	<b>4</b>	Élevé <b>5</b>		
Incertitude sur l'efficacité	Faible <b>5</b>	<b>4</b>	Moyen <b>3</b>	<b>2</b>	Élevé <b>1</b>		
Durabilité	1 an <b>1</b>	10 <b>2</b>	50 <b>3</b>	100 <b>4</b>	>100 <b>5</b>		
Risque de déficience de la technologie	Faible <b>5</b>	<b>4</b>	Moyen <b>3</b>	<b>2</b>	Élevé <b>1</b>		
Impacts environnementaux en cas de déficience	Faible <b>5</b>	<b>4</b>	Moyen <b>3</b>	<b>2</b>	Élevé <b>1</b>		
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	Faible <b>1</b>	<b>2</b>	Moyen <b>3</b>	<b>4</b>	Élevé <b>5</b>		
Inspection et entretien	Aucun <b>5</b>	<b>4</b>	Moyen <b>3</b>	<b>2</b>	Fréquent <b>1</b>		
Exploitation optimale des ressources	Faible <b>1</b>	<b>2</b>	Moyen <b>3</b>	<b>4</b>	Élevé <b>5</b>		
Ré-exploitation des résidus	Faible <b>1</b>	<b>2</b>	Moyen <b>3</b>	<b>4</b>	Élevé <b>5</b>		
Récupération de l'usage des sites	Faible <b>1</b>	<b>2</b>	Moyen <b>3</b>	<b>4</b>	Élevé <b>5</b>		
Total des points de classement							

Tableau VI

Système de classification utilisé pour l'évaluation environnementale des options technologiques de contrôle du DMA

(cas: Inactivation des résidus par biolixiviation en tas)

<u>Facteurs</u>	<u>Échelle</u>					<u>Points (selon le tableau I)</u>	<u>Total des points</u>
Faisabilité technique et économique	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Efficacité	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Incertitude sur l'efficacité	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Durabilité	1 an 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Risque de déficience de la technologie	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 5	4	Moyen 3	2	Élevé 1		
Contrôle des impacts environnementaux en cas de déficience	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Inspection et entretien	Aucun 5	4	Moyen 3	2	Fréquent 1		
Exploitation optimale des ressources	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Ré-exploitation des résidus	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Récupération de l'usage des sites	Faible 1	2	Moyen 3	4	Élevé 5		
Total des points de classement							

**ANNEXE 2B**

Questionnaire sur l'évaluation environnementale des technologies  
de contrôle du DMA (version anglaise)

---

Sainte-Foy, march 12 1992

Sir/Madam,

Please find enclosed a questionnaire on a comparative analysis of diverse technologies envisaged for the definitive closure of acid generating mine residue sites. The comparative analysis of these technologies is based on an evaluation conducted by a committee of mining industry experts. The present study is being conducted under the auspices of the Canadian Environmental Assessment Research Council (CEARC) as a research contract for graduate students. The objective of this questionnaire consists of determining the most efficient state of the art technologies to correct the problems resulting from the sulfurous mine heaps, in terms of their environmental impact risks and the impact reduction.

Hence we request you to please participate in this study. Please note that the information you would furnish in this questionnaire would be used only for statistics. Also, a copy of the final document of this research will be sent to each respondent for their use. I would be glad to furnish any more information. I thank you for your precious collaboration.

---

Jean-François Blais

tél: (418) 654-2699

**Acid Mine Drainage (AMD) Treatment Technologies:  
A Comparative Evaluation**

The present evaluation method is principally oriented towards the evaluation of environmental impacts and their risks resulting from the restoration techniques. The following five technology groups have been evaluated:

- 1) Natural dry covering
- 2) Synthetic dry covering
- 3) Wet covering
- 4) Residue inactivation by bioleaching in a reactor
- 5) Residue inactivation by bioleaching in a heap/pile

The first step in this analysis consists of determining, according to the respondent's experience, **the relative importance** of the factors taken into consideration for the environmental evaluation of these technologies (Table I). Due to their future role, it is necessary to pay particular attention to such values attributed to each factor. For the purposes of statistics, the total of all the points (values of relative importance) attributed to these different factors must be equal to 50.

The value of relative importance of each of these factors must be used in the subsequent classification system (Tables II to VI). There, the five technology groups are evaluated for each factor by attributing a point between 1 and 5 (please circle your choice). For example, in Table II, *what are the technical and economical feasibilities of using natural dry covers for AMD control ?* The points thus chosen are later multiplied by the values of relative importance (from Table I). The sum of the Total Points column thus constitute the ranking of each technology.

It is evident that the five technology groups include different variants. It is therefore suggested to the respondents to consider only such variants which are most important, according to their knowledge, in terms of the cost/efficiency. It would also be useful to describe the variants used for the analysis. For example: "synthetic dry cover (using PVC sheets)".

The author is equally aware of the important variations concerning the restoration techniques' efficiency according to the sites tested. The respondents are hence requested to analyse the techniques keeping in mind a group of mining sites with different characteristics (i. e. to try and determine an average efficiency of the technology).

In the page "Comments", the respondents are invited to briefly answer the following questions:

- A) What is the respondent's expertise or knowledge vis a vis the five different technology groups analysed?
- B) In the respondent's opinion, what are the strong points and lacunae of this method of analysis?
- C) What would be the other factors to be considered to improve this method of analysis?
- D) Are there any other economically viable and more efficient technologies for the restoration of sulfurous mining residues? If so, please specify?

E) According to the respondent, are there any existing techniques more adequate for this type of environmental evaluation comparing the restoration technologies for the mining residue dumps? If so, please specify?

F) Any other comments.

N.B. If you are interested to obtain the analysis results of this study, which will be based on the opinions of several qualified persons in the mining field, please include your postal address with your response to the present questionnaire.

**COMMENTS**

**Table I**

Determination of relative importance of the factors considered for the environmental evaluation of AMD control technologies

<u>Factors</u>	<u>Description</u>	<u>Points</u>
Technical and economical feasibility	Operational capabilities of the technology under diverse conditions such as physical, biogeochemical, climatic etc. Reasonable cost.	
Efficiency	Expected mine effluent decontamination following the treatment technology application. i.e. the expected long term residual pollution after the site closure.	
Uncertainty of the efficiency	Lack of knowledge as regards the technology performance for the definitive closure of acid generating mine residue sites.	
Durability	Expected operational and efficient control duration of the technology or installations. The time period during which the pollution level (AMD) is low after the site closure.	
Technology deficiency risk (weaknesses)	The level of environmental perturbation risks following the installation disfunction or deterioration and after natural accidents (tectonic movements, climatic conditions, etc.) after the site closure.	
Environmental impacts in case of deficiency	Importance of resulting environmental impact in case of technological deficiency, after the site closure.	
Environmental impact control in case of deficiency	Control capacity to achieve low environmental impact, in case of technological deficiency after the site closure.	
Inspection and Service	The installation and service level required after the site closure.	

Optimal exploitation of resources	Contribution of the technology to optimally exploit the natural resources (maximal metal recovery)	
Residue re-exploitation	Possibility of re-exploiting the residue following a scarcity of deposits with high metal content.	
Site reuse	Possibility of reusing the closed site for various other purposes (recreative, sportive, etc.)	
		Total 50 points

Table II

Classification system used for the environmental evaluation of AMD control technologies  
(case: Natural dry covering)

<u>Factors</u>	<u>Scale</u>					<u>Points according to table I</u>	<u>Total points</u>
Technical and economical feasibility	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Efficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Uncertainty of the efficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Durability	1 year 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Technology deficiency risk (weaknesses)	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impacts in case of deficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impact control in case of deficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Inspection and service	None 5	4	Medium 3	2	Frequent 1		
Optimal exploitation of resources	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Residue re-exploitation	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Site reuse	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Total points of classification							

Table III

Classification system used for the environmental evaluation of AMD control technologies

(case: Synthetic dry covering)

<u>Factors</u>	<u>Scale</u>					<u>Points according to table I</u>	<u>Total points</u>
Technical and economical feasibility	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Efficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Uncertainty of the efficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Durability	1 year 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Technology deficiency risk (weaknesses)	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impacts in case of deficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impact control in case of deficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Inspection and service	None 5	4	Medium 3	2	Frequent 1		
Optimal exploitation of resources	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Residue re-exploitation	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Site reuse	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Total points of classification							

Table IV

Classification system used for the environmental evaluation of AMD control technologies

(case: Wet covering)

<u>Factors</u>	<u>Scale</u>					<u>Points according to table I</u>	<u>Total points</u>
Technical and economical feasibility	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Efficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Uncertainty of the efficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Durability	1 year 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Technology deficiency risk (weaknesses)	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impacts in case of deficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impact control in case of deficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Inspection and service	None 5	4	Medium 3	2	Frequent 1		
Optimal exploitation of resources	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Residue re-exploitation	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Site reuse	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Total points of classification							

**Table V**

Classification system used for the environmental evaluation of AMD control technologies

(case: **Residue inactivation by bioleaching in a reactor**)

<u>Factors</u>	<u>Scale</u>					<u>Points according to table I</u>	<u>Total points</u>
Technical and economical feasibility	Weak <b>1</b>	<b>2</b>	Medium <b>3</b>	<b>4</b>	High <b>5</b>		
Efficiency	Weak <b>1</b>	<b>2</b>	Medium <b>3</b>	<b>4</b>	High <b>5</b>		
Uncertainty of the efficiency	Weak <b>5</b>	<b>4</b>	Medium <b>3</b>	<b>2</b>	High <b>1</b>		
Durability	1 year <b>1</b>	10 <b>2</b>	50 <b>3</b>	100 <b>4</b>	>100 <b>5</b>		
Technology deficiency risk (weaknesses)	Weak <b>5</b>	<b>4</b>	Medium <b>3</b>	<b>2</b>	High <b>1</b>		
Environmental impacts in case of deficiency	Weak <b>5</b>	<b>4</b>	Medium <b>3</b>	<b>2</b>	High <b>1</b>		
Environmental impact control in case of deficiency	Weak <b>1</b>	<b>2</b>	Medium <b>3</b>	<b>4</b>	High <b>5</b>		
Inspection and service	None <b>5</b>	<b>4</b>	Medium <b>3</b>	<b>2</b>	Frequent <b>1</b>		
Optimal exploitation of resources	Weak <b>1</b>	<b>2</b>	Medium <b>3</b>	<b>4</b>	High <b>5</b>		
Residue re-exploitation	Weak <b>1</b>	<b>2</b>	Medium <b>3</b>	<b>4</b>	High <b>5</b>		
Site reuse	Weak <b>1</b>	<b>2</b>	Medium <b>3</b>	<b>4</b>	High <b>5</b>		
Total points of classification							

Table VI

Classification system used for the environmental evaluation of AMD control technologies

(case: Residue inactivation by bioleaching in a heap/pile)

<u>Factors</u>	<u>Scale</u>					<u>Points according to table I</u>	<u>Total points</u>
Technical and economical feasibility	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Efficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Uncertainty of the efficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Durability	1 year 1	10 2	50 3	100 4	>100 5		
Technology deficiency risk (weaknesses)	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impacts in case of deficiency	Weak 5	4	Medium 3	2	High 1		
Environmental impact control in case of deficiency	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Inspection and service	None 5	4	Medium 3	2	Frequent 1		
Optimal exploitation of resources	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Residue re-exploitation	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Site reuse	Weak 1	2	Medium 3	4	High 5		
Total points of classification							