



**Liste des éléments d'information à connaître pour évaluer et atténuer les phénomènes de lixiviation de métaux et de drainage rocheux acide**

**Rapport NEDEM 5.10F**

**Le présent travail a été réalisé dans le cadre du NEDEM. Il a été parrainé par l'Association minière du Canada, le NEDEM et Ressources naturelles Canada (Laboratoires des mines et des sciences minérales)**

**Janvier 2005**



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

**CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories**  
**Laboratoires des mines et des sciences minérales de CANMET**  
**DIVISION REPORT / RAPPORT DE DIVISION**

**LISTE DES ÉLÉMENTS D'INFORMATION À CONNAÎTRE POUR  
ÉVALUER ET ATTÉNUER LES PHÉNOMÈNES DE LIXIVIATION DE  
MÉTAUX ET DE DRAINAGE ROCHEUX ACIDE**

**William A. Price**  
**Programme des effluents miniers**

**Janvier 2005**

**Le présent travail a été réalisé dans le cadre du NEDEM. Il a été parrainé par l'Association minière du Canada, le NEDEM, et Ressources naturelles Canada (Laboratoires des mines et des sciences minérales)**

**Projet : LMSM N° 601856**  
**Rapport NEDEM 5.10F**

**RAPPORT DE DIVISION LMSM 04-040(TR)**

*Droits de la Couronne réservés*

## TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION</b> .....	4
<b>Abréviations</b> .....	5
<b>Remerciements</b> .....	5
<b>ÉLÉMENTS D'INFORMATION GÉNÉRAUX</b> .....	7
<b>CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PRÉVISIONS RELATIVES</b> .....	7
<b>AU PHÉNOMÈNE DE LM/DRA</b> .....	7
<b>Géologie et minéralogie</b> .....	8
Propriétés géologiques .....	8
Minéralogie .....	8
<b>Essais statiques : détermination de la composition du matériau</b> .....	9
Prélèvement d'échantillons .....	9
Composition élémentaire.....	9
Bilan acide-base .....	10
<b>Essais cinétiques : mesure des vitesses de réaction et chimie des eaux de drainage</b> ..11	
Cellule d'humidité, essais en colonne et essais in situ.....	11
Suivi du drainage sur place.....	11
<b>Évaluation des divers rejets et éléments du site</b> .....	11
Stériles et haldes à stériles.....	12
Résidus (rejets de concentrateur) .....	12
Chantiers miniers – mines à ciel ouvert et mines souterraines .....	13
<b>Interprétation des résultats des analyses géochimiques</b> .....	13
Aspects généraux.....	13
Identification des matériaux susceptibles de produire un DRA.....	13
Identification des matériaux non susceptibles de produire un DRA .....	14
Chimie des eaux de drainage et charge métallique prévues .....	15
Impacts potentiels sur l'environnement et aspects réglementaires .....	15
Délai d'apparition du DRA .....	16
<b>MESURES D'ATTÉNUATION</b> .....	16
<b>Aspects généraux</b> .....	16
<b>Inondation des rejets et des chantiers de mine</b> .....	17
Bassin de retenue.....	17
Rejets inondés .....	17
Bilan hydrique .....	18
Mobilisation physique .....	18
Retard dans l'inondation.....	18
Inondation incomplète.....	18
Mesures correctives supplémentaires .....	18
Gestion du parc de résidus .....	18
Chimie de la couverture aqueuse et de l'effluent du parc de résidus.....	19
<b>Mesures pour réduire l'infiltration d'eau de drainage et la pénétration d'oxygène</b> ..20	
Objectifs d'atténuation généraux .....	20
Principes de conception.....	20
Conception de la couverture et matériaux de construction.....	20
Méthodes de construction de la couverture .....	20

Ouvrages d'interception en amont .....	20
Gestion de l'eau.....	20
Végétation.....	20
Rendement résultant de la source de contaminants .....	21
Efficacité de la couverture.....	21
Entretien .....	21
<b>Traitement des eaux de drainage.....</b>	<b>21</b>
Sources d'eaux polluées.....	21
Systèmes de collecte et de retenue des eaux de drainage .....	21
Procédé de traitement.....	22
Perturbation du fonctionnement .....	22
Rejet des effluents traités .....	22
Gestion des autres rejets.....	22
Traitement biologique et autres stratégies de traitement moins coûteuses.....	22
<b>Accroissement du PN durant la production et le dépôt des rejets miniers .....</b>	<b>23</b>
<b>Désulfuration des résidus .....</b>	<b>23</b>
<b>GESTION DE L'INCERTITUDE ET INFORMATION SUFFISANTE.....</b>	<b>24</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>25</b>
<b>ANNEXE A : ORGANISATION DE L'INFORMATION CONCERNANT LES REJETS .....</b>	<b>26</b>
<b>ET LES ÉLÉMENTS DU SITE.....</b>	<b>26</b>

## INTRODUCTION

Le phénomène de lixiviation de métaux<sup>1</sup> et de drainage rocheux acide<sup>2</sup> (LM/DRA) engendré par les minéraux sulfureux et leurs sous-produits constitue, pour l'industrie minière, le problème le plus coûteux et potentiellement le plus grave d'un point de vue environnemental. Ce problème pose également un très grand défi pour plusieurs raisons : il exige une détection proactive; les effets du phénomène de LM/DRA se font sentir à long terme; les processus à l'œuvre sont nombreux et en constante évolution; l'expérience dans ce domaine est limitée et la résolution du problème exige une grande quantité d'information à caractère multidisciplinaire. Compte tenu de l'ampleur des connaissances requises, il est possible de se sentir dépassé et de négliger des éléments d'information cruciaux. De surcroît, certaines propriétés des rejets miniers sont difficiles à mesurer et l'on a tendance à se concentrer sur les facteurs les mieux connus ou les plus facilement mesurables. C'est le cas, par exemple, de certaines études réalisées sur les couvertures « sèches » : on se concentre souvent sur leur comportement local à petite échelle, aux dépens d'autres propriétés importantes, mais difficiles à mesurer, telles que le volume des eaux de ruissellement ou les caractéristiques géochimiques des rejets sous-jacents.

Le présent document a pour objectif d'améliorer le travail d'évaluation et d'atténuation du phénomène de LM/DRA en fournissant une liste détaillée des éléments d'information à connaître et des facteurs à examiner. Cette liste devrait permettre au professionnel spécialisé de se faire une idée des problèmes généraux et au praticien généraliste d'être conscient des informations détaillées nécessaires. La liste a été dressée au départ pour aider les auteurs d'études de cas particuliers. Elle a ensuite été modifiée pour servir de guide général à l'industrie minière, aux organismes de réglementation et leurs réviseurs du public, ainsi qu'aux enseignants et aux étudiants.

La liste vise donc à ce que tous les aspects pertinents soient pris en compte. Cependant, elle ne constitue qu'un point de départ. Chaque mine est exploitée dans des conditions environnementales, géologiques et opérationnelles qui lui sont propres. Les meilleures pratiques de gestion en matière de LM/DRA consistent à disposer des outils et des méthodes nécessaires pour obtenir une compréhension précise de l'environnement naturel, du site minier, des matériaux présents, des exigences relatives à la protection de l'environnement et des possibilités et contraintes résultantes. Pour un site donné, il se peut que de nombreux facteurs ou éléments d'information figurant sur la liste ne soient pas pertinents. De même, il y aura des cas où il faudra tenir compte d'autres facteurs et disposer d'autres éléments d'information.

Ce document peut être utilisé dans l'élaboration ou l'examen de plans d'exploitation minière pour déterminer les éléments d'information nécessaires, les facteurs à prendre en considération, les éléments d'information ou les facteurs qui ne s'appliquent pas et les aspects pour lesquels la collecte de données ou la planification sont en cours ou terminées. Lorsqu'on considère qu'il n'est pas nécessaire d'engager ou de poursuivre un travail sur un aspect donné, il est important d'expliquer pourquoi. Les pratiques peuvent dépendre de divers facteurs et il est très utile de justifier les décisions, comme, par exemple, lorsque les décisions relatives aux mesures d'atténuation sont prises en fonction de la caractérisation des matériaux, et *vice versa*. Dans la liste des éléments d'information à connaître, les mesures d'atténuation et la caractérisation des

---

<sup>1</sup> La définition du mot métal est étendue de manière à inclure les métalloïdes, tel l'arsenic, qui sont également produits par l'altération climatique des minéraux sulfureux.

<sup>2</sup> Le drainage rocheux acide (DRA) est aussi appelé couramment « drainage minier acide » (DMA) et « drainage acide » (DA).

matériaux ont été considérées séparément, mais, dans la pratique, les deux questions vont habituellement de pair.

Le présent document ne saurait remplacer les personnes qui possèdent une connaissance approfondie du site, la formation technique et l'expérience appropriées et qui sont responsables des aspects du site relatifs au phénomène de LM/DRA. Il ne remplace pas non plus les prescriptions réglementaires. Les utilisateurs sont invités à adapter les suggestions générales à leurs site et exigences, en incorporant les mesures de rendement propres au site. Les travaux exigés et les conclusions au sujet du phénomène de LM/DRA peuvent changer après l'examen du plan d'exploitation, de la gestion des matériaux, des mesures d'atténuation, des risques cumulés, des responsabilités et de l'impact de l'ensemble de l'exploitation sur l'utilisation des sols.

L'information fournie dans le présent document représente les points de vue de l'auteur et ne doit pas être considérée comme ayant été approuvée, en tout ou en partie, par les personnes qui ont examiné le document ou par les partenaires du NEDEM (gouvernement du Canada, gouvernements provinciaux, Association minière du Canada, sociétés minières et organisations non gouvernementales participantes). L'utilisateur du présent guide est entièrement responsable de ses propres travaux d'évaluation et d'atténuation du phénomène de LM/DRA et de toute mesure prise en fonction de l'information contenue dans le guide.

Ressources naturelles Canada veut améliorer les pratiques existantes. Les commentaires au sujet du présent document ou les suggestions pour l'améliorer seraient les bienvenues. Ils doivent être soumis à l'auteur, à l'adresse suivante : [bprice@nrcan.gc.ca](mailto:bprice@nrcan.gc.ca).

## **Abréviations**

ABA	Bilan acide-base ( <i>Acid-Base Accounting</i> )
DRA	Drainage rocheux acide
Essai PNA	Essai de production nette d'acide
PA	Potentiel de génération d'acide
PN	Potentiel de neutralisation
PN/PA	Rapport du potentiel de neutralisation au potentiel de génération d'acide

L'utilisation d'une terminologie exacte est essentielle à une communication efficace. Les lecteurs sont encouragés à consulter le glossaire produit par Price, Morin et Hutt (en anglais seulement), disponible sur les sites Web du NEDEM ([MEND.NRCan.gc.ca](http://MEND.NRCan.gc.ca)) et de l'INAP ([www.inap.com.au/inap/homepage.nsf](http://www.inap.com.au/inap/homepage.nsf)). Le Manuel sur cédérom de Aubertin et al. (2002) donne un aperçu de la terminologie utilisée en français.

## **Remerciements**

La présente liste de contrôle n'aurait pas pu voir le jour sans les informations techniques détaillées et les commentaires fournis par les personnes suivantes : Michel Aubertin, de l'École Polytechnique de Montréal, Suzie Belanger et Grant Feasby, de Cambior; Kim Bellefontaine, du ministère de l'Énergie et des Mines de la Colombie-Britannique; Louis Bienvenu, du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Bill Blakeman, de Mine Environmental Consulting Associates; Henry Brehaut, de Global Sustainability Services Inc.; Stephen Day, de SRK; Kevin Morin, de MDAG; Vincent Martin, de Barrick; Ron Nicholson, d'EcoMetrix

Incorporated, Dave Orava, d'Orava Mine Projects Ltd.; Dawn Spires, du ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario; David Koren et Gilles Tremblay, de Ressources naturelles Canada. Nous tenons à remercier également Walter Kuit, de Teck Cominco, Philippe Poirier, de SNC Lavalin, Elizabeth Gardiner, de L'Association minière du Canada, et les autres membres du Comité directeur du NEDEM pour leur assistance.

## **ÉLÉMENTS D'INFORMATION GÉNÉRAUX**

Le travail sur la lixiviation de métaux et le drainage rocheux acide (LM/DRA) est guidé par un grand nombre d'objectifs. L'objectif général est de réduire au minimum les risques environnementaux et les responsabilités. Pour cela, il faut prévoir la composition chimique des eaux de drainage et le risque que ces eaux soient d'une qualité inacceptable, tout en mettant en œuvre des mesures d'atténuation efficaces et économiques. Les éléments d'information généraux requis en ce qui a trait au phénomène de LM/DRA sont les suivants :

- Information générale concernant le site : emplacement, accès, topographie, climat et écologie
- Historique du site, résumant les aspects suivants : préparation du site, exploitation de la mine et traitement du minerai, gestion des rejets, autres éléments du site
- Géologie et minéralogie : nom et description de tous les matériaux géologiques extraits, mis à nu ou perturbés de quelque autre façon par les activités minières présentes et passées
- Hydrologie et hydrogéologie du site
- Propriétés des sols et autres aspects géotechniques
- Objectifs en matière d'environnement et de restauration : sensibilité des espèces; distribution de l'exposition et mécanismes d'exposition potentiels; historique réglementaire et situation actuelle; objectifs finaux relatifs à l'utilisation des sols; limites applicables aux eaux rejetées; objectifs relatifs au milieu récepteur
- Sources d'information, y compris la documentation examinée
- Figures (plan du site, cartes indiquant l'emplacement, la topographie et le drainage) et tableaux

La description des conditions générales du site devrait inclure des renseignements généraux concernant l'ensemble du site. Il est prévu que la majeure partie de l'information relative au phénomène de LM/DRA sera fournie dans la description subséquente des différents rejets miniers (ex.: stériles) ou des éléments du site (ex.: résidus miniers utilisés comme matériau de remblayage dans les chantiers miniers souterrains).

## **CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PRÉVISIONS RELATIVES AU PHÉNOMÈNE DE LM/DRA**

Il convient de déterminer la composition actuelle de chaque matériau géologique (ex.: type de roche et matériau de surface) et de chaque type de rejet minier, et de prévoir la composition chimique des futures eaux de drainage. Le choix et la préparation des échantillons, les dosages, les méthodes d'essai, les méthodes d'échantillonnage et l'interprétation des données devraient être basés sur la disponibilité des matériaux représentatifs, sur les besoins du projet et sur d'autres critères propres au site tels que les facteurs d'altération climatique et la structure géologique. Il se peut que les facilités et méthodes d'analyse disponibles soient limitées dans certaines régions du monde.

L'évaluation des matériaux devrait permettre d'établir la distribution et la variabilité des paramètres géochimiques clés (ex.: résultats du bilan acide-base; concentrations de métaux dans les solides ou les lixiviats), les écarts potentiels entre les résultats et la réalité (ex.: PA et PN déterminés en laboratoire, en comparaison des PA et PN obtenus sur le terrain) et, le cas échéant, les moments où se produiront des phénomènes géochimiques importants tels que l'apparition du DRA ou d'une lixiviation de métaux en quantité ou d'une concentration significative. Selon la

phase du projet et l'information disponible, l'évaluation fournira des données et des prévisions correspondant aux phases de développement, d'exploitation et de post-exploitation, y compris en ce qui concerne les charges et les impacts environnementaux.

Il est important de se rappeler que l'évaluation géochimique a essentiellement pour but de guider les décisions en matière de gestion. L'importance des déversements de polluants et les inexactitudes dans les prévisions dépendront des charges, des possibilités de dilution et d'atténuation, et de la sensibilité du milieu récepteur. À chaque étape du programme d'essai, il faut tenir compte du but des essais et se demander si les résultats auront une incidence sur la gestion du site, sur les responsabilités ou sur les risques pour l'environnement. Dans certains cas, la mise en œuvre de mesures d'atténuation d'urgence et d'essais opérationnels en cours d'exploitation, sera plus avantageuse que le travail de prévision avant la mise en exploitation. En effet, la prévision des problèmes environnementaux potentiels risque fort d'être peu concluante ou d'avoir un intérêt limité du point de vue du plan d'exploitation global.

Voici une liste des éléments d'information, des besoins et méthodes d'analyse qu'il est généralement recommandé de connaître pour la présentation et l'interprétation des résultats.

## **Géologie et minéralogie**

### Propriétés géologiques

- Types de roches et matériaux de surface (incluant les sols et autres matériaux meubles)
- Minéralisation et effets des processus d'altération hydrothermale et d'altération climatique superficielle
- Description des différentes unités géologiques, y compris les caractéristiques visuelles et leur distribution spatiale
- Résistance de la roche (ex.: altération dans l'eau)

On utilisera des plans et des coupes transversales du site pour montrer la relation spatiale entre les diverses unités rocheuses, les différentes formes d'altération minérale, les emplacements des chantiers souterrains et des puits, et les zones où sont entreposés le minerai et les rejets miniers.

### Minéralogie

- Méthodes pétrographiques (ex.: essai de coloration) et résultats : proportions, taille des grains et distribution spatiale (ex.: dans la masse rocheuse ou concentrés le long des fractures ou des veines) des différents minéraux; portions des échantillons pour lesquelles l'analyse pétrographique n'a pas permis de déterminer la présence de minéraux (ex.: grains trop petits)
- Analyse diffractométrique aux rayons X, limites de détection et résultats : proportions des différents minéraux, en particulier les carbonates, les silicates, les sulfures et les minéraux solubles dans l'eau
- Analyse à la microsonde et résultats
- Autres méthodes inframicroscopiques, telle la microscopie électronique à balayage, et résultats

On utilise l'analyse à la microsonde pour déterminer la composition de minéraux qui ne se prêtent pas facilement aux méthodes optiques ou à l'analyse diffractométrique aux rayons X, tels que les carbonates et les minéraux en solution monocristalline. On s'en sert également pour établir la

source minérale de polluants potentiels et pour déterminer si la composition élémentaire peut être utilisée pour estimer le pourcentage d'un minéral (ex.: utiliser le Ba pour estimer le pourcentage de baryte).

## **Essais statiques : détermination de la composition du matériau**

### Prélèvement d'échantillons

- Matériaux échantillonnés (ex.: carottes, débris de forage et fraction < 2cm de matériaux prélevés après le dynamitage), méthode d'échantillonnage (ex.: composite d'échantillons ponctuels prélevés tous les mètres sur une distance de 5 m ou coupe transversale de débris de forage), nombre d'échantillons, lieux d'échantillonnage, volumes ou masses des échantillons, et quantité de matériau prétendument caractérisée par chaque échantillon
- Description de l'échantillon, y compris des mesures de la représentativité statistique de la population
- Exposition du matériau d'essai aux intempéries avant le prélèvement de l'échantillon
- Préparation de l'échantillon : séchage, tamisage, concassage, broyage ou entreposage dans un milieu sans oxygène
- Nombre d'échantillons recueillis dans chaque unité géologique

Des plans et des coupes transversales du site sont généralement nécessaires pour montrer la distribution spatiale des échantillons dans les unités rocheuses, les différentes formes d'altération minérale et la variabilité des principales propriétés associées au phénomène de LM/DRA. Les diagrammes doivent indiquer les emplacements de la mine souterraine ou de la mine à ciel ouvert, ainsi que les lignes de séparation entre minerai et rejets miniers (i.e. roche stérile).

### Composition élémentaire

#### a) Concentration totale

- Digestion et analyse(s)
- Comparaison avec la variabilité crustale habituelle ou avec les conditions régionales

La comparaison avec la variabilité crustale ou les conditions régionales est utilisée pour déterminer les éléments présents en concentrations relativement élevées. Selon les conditions d'altération climatique et de lixiviation, il est possible que ces éléments ne posent pas de problèmes pour l'environnement.

#### b) Concentration des éléments hydrosolubles

- Méthode d'analyse : traitement préalable de l'échantillon; rapport entre matière solide et agent d'extraction; type d'agent d'extraction; durée de la lixiviation et nombre de répétitions; degré d'agitation
- Interprétation des résultats : charges prévues; modélisation géochimique des facteurs qui limitent la solubilité; détermination des conditions potentiellement problématiques d'altération climatique ou de lixiviation

Les préoccupations potentielles au sujet de la solubilité comprennent les changements dans la chimie des eaux de drainage (ex.: changements dans le potentiel d'oxydoréduction), une minéralogie inhabituelle ou une oxydation et/ou une lixiviation antérieures dues à l'altération naturelle (ex.: processus supergènes) ou à des retards dans les mesures d'atténuation.

## Bilan acide-base

- a) Analyses des sulfures (S total, S-sulfate, S organique et S-sulfure) et potentiel de génération d'acide (PA)
- Information minéralogique correspondante
  - Méthodes d'analyse et calculs, notamment méthode de mesure du S-sulfure et méthode de calcul du PA
  - Concentration de S-sulfure dans les minéraux susceptibles de produire, par unité de soufre, une quantité d'acide différente de la quantité produite par la pyrite
  - Présence de charbon, de limon, de tourbe ou de matière végétale, indiquant la présence de soufre organique
  - Concentration de S-sulfate lixiviable en milieu acide et de S-sulfate non soluble en milieu acide, et évaluation pour déterminer si ces concentrations sont suffisamment faibles pour permettre d'utiliser le S total ou le S total moins le S-sulfate soluble en milieu acide pour calculer le PA; les sulfates non solubles en milieu acide comprennent la baryte (Ba), la célestine (Sr) et l'anglésite (Pb)
  - Concentration de sulfates acides (ex.: jarosite et alunite)
  - Possibilité d'occlusion isolant les sulfures de l'oxygène ou des eaux de drainage
  - Possibilité de limitation de l'oxydation des sulfures par action galvanique
- b) Potentiel de neutralisation apparent ou titrable (PN apparent)
- Information minéralogique à l'appui (composition en carbonates et types de silicates)
  - Méthodes d'analyse
  - Si certaines variantes de la méthode Sobek ont été utilisées, indication du degré d'effervescence et comparaison de l'acide ajouté avec le PN résultant et la teneur estimée en carbonates de Ca et de Mg
  - Contribution potentielle aux mesures du PN des carbonates de Ca et de Mg, des carbonates de Fe et de Mn non neutralisants et des silicates qui réagissent différemment
  - PN mesuré sur des échantillons à pH acide
- c) Potentiel de neutralisation par les carbonates (PN-carbonates)
- Information minéralogique pertinente
  - Méthodes d'analyse
  - Concentrations des carbonates de Ca et de Mg par opposition aux concentrations nettes des carbonates de Fe et de Mn non neutralisants
- d) pH
- Préparation de l'échantillon et incidence sur la mesure du pH
  - Méthodes d'analyse, y compris le traitement préalable de l'échantillon qui peut mélanger les surfaces altérées avec un matériau non altéré, et le rapport entre la matière solide et l'agent d'extraction
  - Comparaison du pH du matériau rincé avec le pH du matériau broyé
  - Indication que les matériaux sont déjà acides, le cas échéant
- e) Résultats des essais de production nette d'acide (peroxyde)
- Méthodes d'analyse
  - Corrélation avec les résultats des analyses minéralogiques et les résultats concernant les différentes formes de sulfures, les carbonates et le bilan acide-base

## **Essais cinétiques : mesure des vitesses de réaction et chimie des eaux de drainage**

- Composition des matériaux d'essai avant et après l'essai
- Chimie des eaux de drainage (pH, alcalinité, dureté, SO<sub>4</sub>, Fe, Al, Mn, Ca, Mg, K, Na, autres cations basiques, (Ca+Mg)/SO<sub>4</sub> et éléments traces dans le lixiviat), débits, charges, facteurs limitant la solubilité (résultats de la modélisation géochimique) et sources potentielles d'éléments dans les eaux de drainage, changements importants et laps de temps prévu avant les changements importants
- Possibilité d'occlusion isolant les sulfures de l'oxygène et des eaux de drainage
- Limitation de l'oxydation des sulfures et de la lixiviation de métaux par action galvanique

### Cellule d'humidité, essais en colonne et essais in situ

- Comparaison entre les matériaux d'essai et les matériaux qu'ils représentent
- Méthode d'essai, y compris la préparation des matériaux et le taux de lixiviation
- Données climatiques pour les essais sur le terrain
- Durée de l'essai et changements observés
- Taux estimé d'oxydation des sulfures, sources du PN, taux de libération de métaux à la suite de l'oxydation et de la dissolution de minéraux primaires, facteurs de solubilité limitant la concentration de polluants et temps nécessaire à l'épuisement du PN
- Méthode de démontage de la cellule, de la colonne ou du remblai d'essai et analyses effectuées sur le matériau, y compris les matériaux secondaires formés
- Impact potentiel des différences entre les conditions de laboratoire et les conditions sur le terrain

### Suivi du drainage sur place

- Emplacements des postes de surveillance (ex.: suintements, captage du drainage minier et lacs de fosses à ciel ouvert) et éléments de la mine contribuant au drainage
- Paramètres mesurés, fréquence et durée du suivi
- Corrélation avec les données climatiques

## **Évaluation des divers rejets et éléments du site**

Dans la mesure du possible, il faut indiquer les volumes et le déroulement approximatif des activités minières pour les différents matériaux, en précisant comment ces derniers ont été, sont ou seront manutentionnés et éliminés. Les facteurs à examiner varieront selon le type de rejets et l'élément du site ou le milieu dans lequel les déchets sont déposés. Par exemple, le concassage de grosses particules et le mélange avec le matériau sous-jacent peuvent poser des problèmes lorsque les stériles sont utilisés comme matériau de revêtement routier. Les rejets potentiels comprennent les stériles, les rejets de concentrateur, divers sous-produits tels que le sable produit par le passage en cyclone des résidus, le minerai à faible teneur, les déchets de traitement, les matériaux de construction, etc. Les éléments du site associés aux activités minières passées et présentes comprennent les haldes à stériles, les bassins de sédimentation, les chantiers de mine (mines à ciel ouvert et chantiers souterrains), les empilements temporaires et les chemins de mine.

## Stériles et haldes à stériles

- Prévisions avant l'exploitation
  - Les prévisions avant l'exploitation sont habituellement basées sur une analyse de carottes de sondage d'exploration.
  - Dans quelle mesure l'analyse d'une carotte de sondage ou de débris de forage (roche totale) est-elle représentative de la composition des différentes zones des chantiers de la mine ou des fractions granulométriques des stériles et résidus qui résulteront de l'exploitation?
  - L'exploration est généralement concentrée sur le minerai et il est possible que l'on ne dispose d'aucune carotte de sondage pour prévoir la composition des stériles à la limite des chantiers de mine, où il pourrait y avoir, par exemple, des éléments tels que des auréoles de pyrite distales
  - La composition des particules servant à déterminer la chimie des eaux de drainage (ex.: portion réactive des stériles, particules plus fines) peut être différente de la composition de la roche totale
- Résultats obtenus pendant l'exploitation à partir d'échantillons de débris de forage prélevés avant le dynamitage
- Résultats obtenus pendant l'exploitation à partir d'échantillons prélevés après le dynamitage et avant l'extraction des stériles du puits ou après leur mise en place sur les haldes à stériles, y compris les masses relatives et les concentrations de PA et PN dans les particules fines par opposition aux particules grossières
- Altération climatique après l'élimination, y compris les changements dans le pH, la teneur en carbonates, les produits d'altération solubles et la concentration en oxygène
- Propriétés thermiques et composition des gaz interstitiels des haldes de stériles, comme la température et la concentration en oxygène

## Résidus (rejets de concentrateur)

- Avant l'exploitation, résultats d'une analyse de carottes de sondage entrecoupant le minerai, et essais métallurgiques en laboratoire et à l'usine pilote
- Pendant l'exploitation, résultats d'analyses du minerai, de résidus complets et de différentes fractions des résidus potentiels dont les résidus de nettoyage et de dégrossissage, le sable de cyclone utilisé comme matériau de remblayage souterrain ou pour la construction de digues, et les résidus désulfurés
- Amendements ajoutés pendant le traitement
- Ségrégation potentielle pendant le dépôt et composition de la plage de résidus et des boues
- Altération climatique après élimination : changements du pH, de la teneur en carbonates, des produits d'altération solubles et de la consommation d'oxygène
- Profondeur de la nappe phréatique et la diminution en concentration d'oxygène, et obstacles à l'oxydation des sulfures qui découlent de ces facteurs
- Production de thiosels

La production de thiosels pendant le broyage et la production subséquente de DRA dans les effluents des résidus peut constituer un problème avec certains minerais à haute teneur en sulfures; on le retrouve notamment dans les mines de l'Est du Canada et dans au moins une mine de la Colombie-Britannique. Il est donc prudent de vérifier si ces deux phénomènes sont présents pendant les essais métallurgiques.

## Chantiers miniers – mines à ciel ouvert et mines souterraines

- Composition des parois de la mine et degré de fracturation
- Composition, masse et emplacement des remblais, du substratum rocheux fracturé (ex.: minerai fracturé par le dynamitage, mais qui n'a pas été extrait de la mine) et des talus
- Hydrologie : emplacements et débits des écoulements, niveau de la nappe phréatique, répartition dans le temps et emplacement des déversements
- Altération climatique, chimie des eaux de drainage et charges à différents endroits

En général, les remblais et les talus offrent des surfaces sensiblement plus réactives et ils ont donc une incidence plus importante sur la chimie des eaux de drainage que les parois des mines et les fractures.

## **Interprétation des résultats des analyses géochimiques**

### Aspects généraux

La quantité d'information à fournir constitue une source de préoccupation courante. Malheureusement, la complexité se cache souvent dans les détails et, par conséquent, il faut généralement apporter des explications très détaillées (ex.: méthode de prélèvement des échantillons et représentativité des échantillons). Il se peut qu'une petite portion du matériau suffise pour produire du DRA ou une lixiviation significative de métaux. C'est pourquoi il est habituellement plus important de connaître la variabilité et la distribution de paramètres tels que le rapport PN/PA et les concentrations de métaux, plutôt que la tendance ou la composition moyennes. Selon la situation, des données statistiques descriptives telles que le 10<sup>e</sup> et le 90<sup>e</sup> percentiles et la médiane sont utiles pour décrire la variabilité, mais elles ne sauraient remplacer les graphiques représentant la distribution des données. On peut recourir à une analyse de sensibilité pour déterminer si des informations supplémentaires sont nécessaires. Il est important de connaître la variabilité spatiale pour déterminer si des matériaux différents du point de vue géochimique sont exploités et si une ségrégation de ces derniers est possible.

On utilise habituellement des plans et des coupes transversales du site pour montrer la variabilité spatiale des propriétés liées au phénomène de LM/DRA et la corrélation avec les unités rocheuses et les différentes formes d'altération des minéraux. Les schémas doivent indiquer les lieux de prélèvement des échantillons, les limites des chantiers de mine souterrains et du puits, ainsi que les emplacements où sont entreposés le minerai et les rejets miniers.

### Identification des matériaux susceptibles de produire un DRA

Il est important de se rappeler que les métaux constituent la principale source de toxicité et que des eaux de drainage ayant un pH neutre peuvent produire la lixiviation de quantités inacceptables de métaux. Sur d'autres sites miniers, la qualité de l'eau ne devient préoccupante que si les rejets engendrent du DRA. Toutefois, même aux endroits où les eaux de drainage neutres posent un problème, l'apparition du DRA entraîne habituellement la dissolution d'une plus grande quantité d'espèces métalliques et accélère l'altération; il est donc important d'identifier les matériaux susceptibles de produire un DRA.

Dans tous les essais portant sur le phénomène de LM/DRA, on cherche à évaluer si les minéraux neutralisants contenus dans l'échantillon sont suffisamment abondants et réactifs pour neutraliser la quantité d'acide produite par l'oxydation des minéraux sulfureux. La première étape consiste à calculer le potentiel de génération d'acide (PA) et le potentiel de neutralisation d'acide (PN). On peut ensuite établir la probabilité de production de DRA à partir du rapport PN/PA. En supposant que les valeurs de PA et PN sont exactes et que les minéraux sont exposés à l'oxygène et au lessivage, le DRA est considéré probable si  $PN/PA < 1$ , incertain si  $PN/PA$  est entre 1 et 2, et peu probable si  $PN/PA > 2$ .

La procédure est donc la suivante :

- Déterminer les paramètres et la méthode à utiliser, évaluer s'il est nécessaire d'apporter des corrections aux résultats des analyses du soufre en laboratoire, et calculer le potentiel de génération d'acide (PA)
- Déterminer les paramètres et la méthode à utiliser, évaluer s'il est nécessaire d'apporter des corrections aux valeurs de PN déterminées en laboratoire, et calculer le potentiel de neutralisation d'acide sur le terrain (PN)
- Calculer le rapport PN/PA

La méthode de calcul du PA et du PN est d'une importance cruciale dans l'évaluation des matériaux susceptibles de produire un DRA. Il est essentiel que les écarts avec les valeurs réelles, c'est-à-dire les conditions rencontrées sur le site de la mine, soient les plus faibles possible. Pour que les méthodes de calcul soient rapides et reproductibles, les procédures utilisées pour calculer le PA et le PN nécessitent l'approximation d'une série de facteurs et de processus qui contribuent à l'acidification et à la neutralisation sur le terrain. Les calculs subséquents sont basés sur un certain nombre d'hypothèses qui peuvent être incorrectes. Par conséquent, il est parfois nécessaire d'apporter des corrections pour tenir compte des conditions particulières du site et des écarts avec les hypothèses concernant la minéralogie. On peut également avoir recours à des corrections ou à des facteurs de sécurité pour tenir compte des limitations dans l'échantillonnage, de l'hétérogénéité des propriétés essentielles et de la composition de l'échantillon (ex.: débris de forage obtenus à partir de la roche complète) par rapport à la portion véritablement réactive du matériau (ex.: fines de la halde de stériles).

Bien que le calcul de la différence entre le PN et le PA fasse notoirement partie de la détermination du bilan acide-base, il est habituellement inutile.

### Identification des matériaux non susceptibles de produire un DRA

La décision quant à la façon de traiter les matériaux non acidogènes dépendra des problèmes pouvant être causés par la lixiviation neutre ou alcaline<sup>3</sup>. Si la lixiviation de métaux par des eaux de pH neutre ne constitue pas un problème, on cherchera à identifier les matériaux non susceptibles de produire un DRA (matériaux non acidogènes) dans le but, par exemple, de limiter les coûts et les risques associés aux mesures d'atténuation à mettre en œuvre (ex.: utiliser ces matériaux pour construire des digues de retenues pour des rejets miniers). Les tâches consistent à

---

<sup>3</sup> Il est important de noter que, selon les espèces métalliques présentes, les vitesses d'altération, les charges et le milieu récepteur, la lixiviation neutre peut constituer un grave problème environnemental.

établir des critères définissant ce qu'est un matériau acidogène et un matériau non acidogène pour chaque matériau géologique, et à déterminer si le matériau non acidogène peut être séparé de la fraction acidogène. Les critères en question sont habituellement basés sur le rapport PN/PA. Il faut donc évaluer les sources d'acidification et de neutralisation, les facteurs potentiellement confusionnels (ex.: composition des fines des stériles par rapport aux résultats obtenus avec les carottes de sondage dans la roche complète), et la procédure à suivre pour mesurer les paramètres utilisés dans les critères d'analyse (procédure et fréquence de l'échantillonnage, méthodes d'analyse et nécessité d'apporter des correctifs aux valeurs calculées de PN, PA et PN/PA).

La qualité des eaux de drainage ne constitue pas le seul aspect à considérer; l'utilisation d'un matériau non acidogène dépend également de la possibilité de séparer le matériau non acidogène du matériau acidogène. Pour cela, il faut évaluer la distribution spatiale du matériau non acidogène et établir la procédure pour distinguer et séparer ce matériau du matériau acidogène (ex.: établir comment estimer, de manière opérationnelle, le rapport PN/PA).

### Chimie des eaux de drainage et charge métallique prévues

La chimie des eaux de drainage et la charge métallique prévues dépendent des facteurs suivants :

- Facteurs d'altération dans l'environnement (voir stériles et résidus)
- Effets de la surface spécifique (ex.: proportion et composition des particules fines et des particules plus grossières)
- Vitesse de lixiviation et débit des eaux de drainage provenant des rejets miniers et des chantiers de mine, y compris l'effet de la remontée de la nappe phréatique après l'exploitation
- Potentiel de LM/DRA prévu; proportion et distribution spatiale des matériaux considérés susceptibles de produire un DRA ou une lixiviation de métaux importante; si les matériaux sont potentiellement acidogènes, délai prévu avant l'apparition du DRA
- Rejets de métaux prévus et facteurs limitant la solubilité, y compris les résultats des essais cinétiques et des modélisations géochimiques effectués pour vérifier les hypothèses
- Alcalinité, dilution et atténuation de la charge métallique en aval

### Impacts potentiels sur l'environnement et aspects réglementaires

Les impacts sur l'environnement dépendent de la sensibilité des espèces, de la distribution, de la durée et de la forme de l'exposition. Les éléments d'information pertinents incluent : chimie des eaux de drainage et charge prévues; résultats des essais de toxicité aiguë et chronique; observations sur le terrain de l'activité des espèces animales et végétales et de la santé des populations; objectifs de remise en état; limites applicables aux rejets et objectifs relatifs au milieu récepteur.

Il peut être important de connaître la charge métallique avant l'exploitation pour établir les objectifs en matière d'environnement et de remise en état. Il faut nécessairement connaître les charges métalliques associées aux zones moins minéralisées adjacentes pour déterminer les contraintes cumulatives sur le système, car elles constituent un autre facteur potentiellement important dans l'établissement de ces objectifs.

## Délai d'apparition du DRA

On cherche à établir le délai avant l'apparition du DRA dans le but de définir des critères relatifs au laps de temps minimum dont on dispose avant d'inonder ou de mettre en œuvre d'autres mesures de restauration (telles que le traitement du minerai à faible teneur ou l'installation d'un système de recouvrement) pour empêcher une altération supplémentaire importante et pour évaluer l'impact des retards. Ceci requiert une estimation de la vitesse d'oxydation des sulfures ( $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{unité de temps}$ , relativement au Sulfate), la quantité d'acide produite, la diminution subséquente du PN et le temps dont on dispose avant l'épuisement du PN. Lorsque la lixiviation par des eaux de pH neutre ne constitue pas un problème, le délai d'apparition du DRA peut aussi être important pour déterminer le temps avant que l'impact des matériaux acidogènes non inondés risque de commencer à se faire sentir.

## MESURES D'ATTÉNUATION

### Aspects généraux

- Objectifs de conception : ampleur de la réduction des charges en polluants; méthodes utilisées pour atteindre les objectifs environnementaux; compatibilité avec le plan d'exploitation; mesures d'atténuation complémentaires; plan de remise en état et caractéristiques biogéoclimatiques pertinentes au site
- Détails de construction et historique de l'exploitation : manutention des rejets; modifications; améliorations; entretien; résultats des activités de surveillance
- Gestion de l'eau : emplacement(s) des points d'entrée et de décharge des eaux de drainage; débits; chimie des eaux de drainage
- Aspects pour lesquels l'incertitude est importante : changements potentiels; répercussions de ces changements sur la gestion; plans d'urgence; études visant à réduire les incertitudes et à guider ou à améliorer la gestion future
- Comportement à long terme
- Exigences réglementaires

Les objectifs relatifs à l'environnement joueront un rôle capital dans le choix des mesures d'atténuation et dans leur conception.

La plupart des mesures d'atténuations pour le phénomène du LM/DRA doivent être conçues, construites, exploitées et financées d'une façon pour un fonctionnement adéquat pendant une période indéterminée. Le succès des mesures d'atténuations à long terme demande une détection et une résolution précoce des problèmes pour prévenir des impacts environnementaux significatifs. Pour se faire, les méthodes doivent inclure :

- un design conservateur
- résolution des problèmes associés aux changements futurs d'hydrologie et d'écologie du site et aux caractéristiques géochimiques, etc.
- suivi, entretien, réparations, remplacements et plans d'urgence
- la mise à jour des guides de fonctionnement et des bases de données de suivi

- des ressources financières adéquates pour la mise en place de la méthode d'atténuation choisie

La résolution des problèmes associés aux changements futurs dans l'hydrologie du site et les caractéristiques géochimiques des rejets constitue un aspect important de la mise en œuvre des mesures préventives d'atténuation. Lorsqu'il y a des possibilités que les rejets sulfureux s'oxydent de plus en plus ou que des changements dans l'hydrologie du site entraînent une intensification du phénomène de lixiviation, il faut évaluer les accroissements potentiels de la charge métallique et de l'acidité ainsi que le besoin éventuel de mesures additionnelles de protection de l'environnement.

Il est important de disposer de ressources adéquates car les coûts reliés à la mise en place des mesures d'atténuation peuvent être élevés. Dans toute la mesure du possible, il faut établir les coûts actuels en capital et estimer les coûts d'exploitation à long terme pour chaque aspect du système d'atténuation (ex.: chaux, énergie électrique, personnel, pompes, entretien, surveillance, élimination des rejets secondaires et mesures d'urgence).

## **Inondation des rejets et des chantiers de mine**

### Bassin de retenue

- Type de bassin de retenue (ex.: parc de résidus, fosses, ouvertures souterraines et plans d'eau naturels)
- Conception du parc de résidus, construction et fonctionnement des éléments du parc tels que les digues, les déversoirs, les cloisons, et l'injection de coulis dans les trous de forage, les fractures et les ouvrages de décantation
- Mesures de surveillance et d'entretien pour assurer la stabilité géotechnique à long terme pour une série de conditions possibles sur le site, y compris la préservation de la capacité des principaux ouvrages de dérivation, la prévention des dommages causés par les castors (ex.: inondation des fondations de la digue ou obstruction des déversoirs) et la surveillance pour déterminer les besoins d'entretien

### Rejets inondés

- Types de rejets (ex.: stériles, résidus et produits de traitement), quantités, gestion et lieux d'élimination
- Caractérisation des rejets, notamment le potentiel de formation de DRA ou de LM si les rejets miniers sont exposés
- Concentration des polluants potentiellement solubles compte tenu de la chimie actuelle des eaux de drainage et des changements prévus dans les facteurs tels que le pH, le potentiel d'oxydoréduction ou la lixiviation<sup>4</sup>

Ces éléments d'information peuvent être utilisés pour déterminer quels matériaux exigent une inondation, la capacité d'entreposage requise, l'exposition maximale avant l'inondation et la nécessité d'instaurer d'autres mesures de remise en état. Les polluants potentiellement solubles comprennent les produits d'altération avant et après l'excavation ainsi que les précipités formés lorsque des rejets miniers ou des eaux de drainage sont ajoutés dans le parc de résidus.

---

<sup>4</sup> Il est important de quantifier la charge « à court terme » (ponctuelle) de substances chimiques solubles, par opposition à la lixiviation qui peut se produire dans les rejets submergés – les deux phénomènes ont des répercussions très différentes sur l'évaluation et l'atténuation.

### Bilan hydrique

- Débits d'entrée et de sortie prévus et résultants
- Taille et épaisseur de la couverture aqueuse
- Sources d'eau d'appoint

### Mobilisation physique

- Mise en suspension pendant la déposition (facteur important seulement dans le cas d'un système ouvert)
- Remise en suspension par l'action des vagues, le mouvement de la glace et l'écoulement dans le parc de résidus
- Mesures d'atténuation, y compris l'augmentation de l'épaisseur de la couverture aqueuse, l'utilisation de couvertures non minéralisées et le recours à des talus ou à des chicanes pour réduire la portée de la houle

### Retard dans l'inondation

- Degré d'exposition à l'air avant l'inondation
- Délai prévu avant l'apparition du DRA et l'accumulation d'une charge en métaux et en acidité importante
- Impact sur la chimie de la couverture aqueuse et sur la possibilité d'émission future de polluants

Ces éléments d'information peuvent être utilisés pour déterminer le lessivage rapide des rejets oxydés, l'exposition maximale admissible avant l'inondation, la nécessité de prendre des mesures supplémentaires avant l'inondation et les facteurs qui déclencheront la mise en œuvre de ces mesures. Mesures supplémentaires possibles : réduire la hauteur des rejets miniers au minimum; éliminer séparément les matériaux problématiques; surveiller les matériaux exposés; ajouter de la chaux; prévoir de déplacer les rejets miniers ou d'accélérer l'inondation.

### Inondation incomplète

- Endroits où l'inondation sera incomplète (ex.: parois exposées de la mine ou plage adjacente aux digues)
- Impact de l'altération sur la chimie du drainage dans le parc de résidus

### Mesures correctives supplémentaires

- Traitement préalable des eaux de drainage ou des composantes des rejets avant l'élimination
- Amendement chimique des rejets miniers ou de la colonne d'eau (ex.: chaux pour neutraliser les rejets acides)
- Ajout de barrières consommatrices d'oxygène ou de barrières contre la diffusion (ex.: couvrir les stériles inondés avec des résidus) afin de réduire au minimum la pénétration d'oxygène et la production de polluants délétères

### Gestion du parc de résidus

- Où, quand et comment se produira l'effluent
- Exigences réglementaires concernant l'effluent
- Mesures visant à réduire au minimum les charges pour l'environnement et à maximiser la dilution
- Mesures visant à diriger les eaux de drainage vers le parc de résidus ou autour de celui-ci

- Examen de la succession écologique, de la sédimentation, des autres utilisations possibles de la zone d'entreposage, des changements dans le bilan hydrique et des changements dans l'utilisation des sols

#### Chimie de la couverture aqueuse et de l'effluent du parc de résidus

- Composition des résidus et vitesse d'accumulation
- Composition et débits des apports d'eau, tels que l'eau de procédé, l'eau interstitielle (ex.: lorsqu'il y a consolidation des résidus), ruissellement venant d'autres rejets miniers, eaux souterraines, précipitations et effluents provenant d'autres sources d'eau (ex.: eaux d'égout)
- Changements passés ou futurs des propriétés des résidus ou de la couverture aqueuse (ex.: apparition de conditions réductrices dans des résidus oxydés ou diminution du pH à la suite d'apports acides résultant des précipitations, de la nitrification de l'ammonium ou de matériaux non inondés)
- Atténuation passée ou prévue de la charge de polluants dans les rejets miniers (ex.: précipitation d'espèces métalliques présentes à l'état de traces comme les sulfures par des bactéries réductrices des sulfates ou coprécipitation avec des hydroxydes de fer) et dans la couverture aqueuse (ex.: absorption ou adsorption par le biote)

La libération de substances dissoutes dans la couverture aqueuse et dans l'eau rejetée du parc de résidus dépendra de la composition des résidus et des eaux de drainage. La libération de substances dissoutes est déterminée par la composition de la surface des particules et de l'eau interstitielle. Dans les matériaux non altérés, la composition superficielle est semblable à la composition interne des particules. Les stériles et les rejets de concentrateur non altérés présentent souvent une alcalinité relativement élevée (due au dynamitage et à la manutention dans le cas des stériles, et au concassage et au broyage dans le cas des résidus). Le pH des stériles non altérés sera similaire au pH des minéraux exposés après abrasion. Le pH des rejets de concentrateur est habituellement le même que le pH de l'eau de procédé. Les additifs dans le procédé peuvent avoir des répercussions importantes sur la chimie de l'eau.

L'altération climatique avant le dépôt peut modifier la composition de la surface des particules et de l'eau interstitielle et, conséquemment, la chimie de la couverture aqueuse. Lorsqu'on cesse de déposer des rejets de concentrateur dans le parc de résidus, on observe souvent une diminution de l'alcalinité de la couverture aqueuse due à la réduction du lessivage rapide des rejets miniers, au pH plus bas des précipitations et des eaux de ruissellement, et à des réactions entre les matériaux contenus dans le parc (ex.: l'oxydation de l'ammonium en nitrate produit un acide). La lixiviation à long terme de métaux dans des résidus miniers inondés dépendra d'un grand nombre de facteurs propres au site. De nombreux produits primaires sont plus stables dans des milieux anoxiques ou à faible potentiel d'oxydoréduction, et certains produits secondaires de l'oxydation sont plus stables dans des milieux oxiques ou plus oxydants.

L'entreposage des rejets miniers sous une couverture aqueuse ainsi que les exigences et défis en matière de conception sont examinés dans Price 2001. L'information sur l'efficacité à long terme, surtout en ce qui concerne les stériles, est limitée. Les expériences menées à Elliot Lake, Red Lake et Equity Silver illustrent quelques-uns des problèmes. Plusieurs solutions se présentent pour la restauration : installer une barrière à l'oxygène à la fin de l'exploitation pour limiter la diffusion; réduire au minimum les pertes par suintement depuis l'intérieur du parc submergé; ajouter continuellement de la chaux en petites quantités pour maintenir un pH supérieur au pH neutre et une alcalinité relativement élevée.

## **Mesures pour réduire l'infiltration d'eau de drainage et la pénétration d'oxygène**

Ces mesures comprennent l'installation de systèmes de recouvrement ainsi que la mise en œuvre d'autres mesures, comme la construction de fossés, pour détourner les apports d'eau de ruissellement ou de drainage.

### Objectifs d'atténuation généraux

- Résultat visé (ex.: limiter la lixiviation)
- Réduction requise de la charge de polluants (ex.: réduction par un facteur de 100 des charges de Zn)

### Principes de conception

- Caractéristiques physiques (ex.: couverture de géomatériaux)
- Mécanismes par lesquels la stratégie permettra d'atteindre les objectifs d'atténuation (ex.: réduction de la conductivité hydraulique)
- Hypothèses concernant les fuites et la détérioration

### Conception de la couverture et matériaux de construction

- Éléments de la couverture et caractéristiques de ces éléments
- Sources des matériaux
- Contraintes relatives à la conception et à la construction, telles que les normes visant les matériaux grossiers et la teneur en eau du sol

### Méthodes de construction de la couverture

- Description de la construction de la couverture : épaisseur des couches; nombre de passages du compacteur; équipement utilisé pour la construction; assurance/contrôle de la qualité des matériaux, épaisseur et niveau de compaction
- Durée de la construction de la couverture et coût (\$/ha)

### Ouvrages d'interception en amont

- Emplacements
- Conditions géotechniques, hydrogéologiques et géomorphologiques pertinentes
- Conception et méthodes de construction

### Gestion de l'eau

- Eaux de drainage contaminées provenant des rejets miniers
- Eau propre détournée par la couverture ou par les ouvrages d'interception en amont
- Activités de surveillance et d'entretien connexes

### Végétation

- Impact de la végétation sur l'efficacité de la couverture (ex.: lutte contre l'évapotranspiration et l'érosion)
- Choix des espèces végétales et comptabilité avec l'efficacité de la couverture à long terme
- Activités de surveillance et d'entretien requises
- Mesures pour limiter les dommages causés par la coupe des arbres, les racines et les animaux sauvages
- Longévité des espèces végétales
- Gestion de la revégétation naturelle

### Rendement résultant de la source de contaminants

- Chimie totale des eaux de drainage contaminées et chimie des eaux de suintement; débits, charges et emplacement par rapport aux rejets miniers sous-jacents
- Changements dans la composition des rejets miniers et de l'eau interstitielle (par altération)
- Variation dans le niveau de la nappe phréatique, dans les propriétés thermiques et dans la composition des gaz

Dans l'évaluation, il faut tenir compte du moment et des décalages de temps associés aux processus d'altération et à la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

### Efficacité de la couverture

- Apports des eaux de drainage potentielles (neige et pluie) et volume des eaux de ruissellement détournées; évapotranspiration
- Surveillance des résultats des mesures concernant la couverture : conductivité hydraulique; teneur en eau; succion; infiltration à petite échelle mesurée à l'aide de lysimètres; couvert végétal; croissance des racines

### Entretien

- Entretien du couvert végétal (ex.: fertilisation) et gestion de l'invasion naturelle d'autres espèces végétales
- Mesures visant à détecter, prévenir et réparer la détérioration causée par divers facteurs : tassement des rejets; précipitation chimique; altération chimique; dessèchement; gel-dégel; érosion; pénétration des racines; coupe d'arbres; animaux fouisseurs; activités humaines (ex.: VTT)
- Équipement utilisé pour nettoyer et réparer les fossés de dérivation et les sections de la couverture.
- Mesures d'urgence proposées

## **Traitement des eaux de drainage**

Toutes les formes de traitement (ex.: traitement à la chaux, drains anoxiques calcaire, fertilisation des fosses minières, etc.) et leur durée doivent être prises en compte.

### Sources d'eaux polluées

- Sources potentielles d'eaux de drainage polluées
- Emplacements des points de rejet
- Variabilité annuelle et à long terme prévue et mesurée des débits, de la chimie et des charges en acidité et en métaux

### Systèmes de collecte et de retenue des eaux de drainage

- Plan et conception (infrastructure), notamment l'emplacement par rapport aux éléments de la mine
- Données climatiques/géotechniques/hydrologiques qui indiquent la capacité du système
- Entreposage des eaux pour des débits qui excèdent la capacité de traitement
- Surveillance et entretien requis pour assurer le bon fonctionnement du système
- Plans d'urgence en cas de panne mécanique, de panne d'électricité, de problèmes d'accès ou de débits supérieurs aux débits nominaux
- Vigilance de l'exploitant

### Procédé de traitement

- Description des méthodes de traitement, et des conditions requises, telles que le pH et le potentiel d'oxydoréduction
- Installations
- Composition et taux d'addition des amendements
- Contrôle du procédé
- Qualité des effluents
- Entretien et surveillance, y compris la vigilance de l'exploitant
- Coûts d'exploitation (réactif, chaux, électricité, main-d'œuvre)

### Perturbation du fonctionnement

- Conditions nominales lorsque le système de collecte ou de traitement n'est pas capable d'absorber les apports (ex.: apports plus grands que les apports nominaux)
- Détérioration prévue (ex.: colmatage du système de réduction des sulfures ou du drain alcalin, ou dépôt d'un précipité)
- Résultats potentiels : qualité, durée et volume des effluents, dilution et atténuation dans le milieu récepteur, impact
- Plans d'urgence en cas de perturbation des conditions

Les plans d'urgence comprennent habituellement les éléments suivants : source alternative d'électricité et pompes de secours; pièces de rechange; quantités suffisantes de réactifs advenant une interruption dans l'approvisionnement (ex.: accès coupé); bassin d'entreposage d'appoint pour les périodes où les volumes d'eaux de drainage polluées excèdent la capacité des installations de traitement.

### Rejet des effluents traités

- Limites applicables aux débits et objectifs concernant le milieu récepteur
- Qualité et volume des effluents et emplacements des points de rejet
- Infrastructure, notamment pour l'entreposage après traitement pendant les périodes où le volume des eaux de drainage traitées excède le débit maximal permis

### Gestion des autres rejets

- Qualité et quantité prévues et futures des autres rejets produits (telles les boues de traitement), le cas échéant
- Plan de gestion, notamment la stabilité physique et géochimique du site d'entreposage et la surveillance du drainage à partir de ce site
- Coûts d'exploitation (passés, présents et futurs) pour la manutention et l'entreposage des autres rejets

### Traitement biologique et autres stratégies de traitement moins coûteuses

Les exigences en matière d'information et de conception pour le traitement biologique et les autres stratégies de traitement moins coûteuses sont semblables aux exigences relatives aux mesures usuelles applicable au traitement à la chaux. Les questions qu'il faut se poser sont les suivantes :

1. Jusqu'à quelle charge en métaux ou jusqu'à quel débit le système peut-il maintenir de façon fiable des concentrations admissibles pour l'effluent? Pendant combien de temps et à quel coût?

2. Quelles sont les exigences en ce qui concerne les aspects suivants : contrôle de procédé, élimination des autres rejets produits, équipement, personnel, surveillance et entretien, et débits? Une surveillance approfondie est nécessaire pour établir l'efficacité et la durabilité de la stratégie et pour guider les futures décisions en matière de gestion. Cette surveillance devrait inclure des mesures qui mettent en évidence le mécanisme d'atténuation de la pollution, le caractère durable de la stratégie et des plans pour l'entreposage de la matrice lorsque les systèmes à écoulement continu se colmatent ou doivent être remplacés pour d'autres raisons.

### **Accroissement du PN durant la production et le dépôt des rejets miniers**

Dans certains cas, on peut mélanger des rejets miniers acidogènes et non acidogènes, ou incorporer des matériaux acidivores (tel du calcaire) à des rejets acidogènes. Ces mesures sont souvent combinées à d'autres mesures visant à réduire la lixiviation.

- Caractérisation des matériaux : résultats des essais physiques, chimiques et minéralogiques sur les matériaux proposés; composition et importance de la fraction réactive des rejets miniers; caractère acceptable de la chimie des eaux de drainage neutres
- Conception, notamment les critères établis pour prévenir le DRA et une lixiviation de métaux importante, accroissement du PN, manutention des matériaux et méthode de mélange physique, contraintes dans la manutention des matériaux, entreposage et site d'entreposage, facteurs de sécurité, contrôle de procédé (ex.: détermination des différents matériaux sur le terrain) et toute autre mesure d'atténuation supplémentaire, comme le détournement des eaux de drainage
- Caractérisation des matériaux avant et après le dépôt : prélèvement d'échantillons, préparation des échantillons, analyses, communication des résultats et temps nécessaire pour effectuer la caractérisation
- Compatibilité de la mesure proposée avec la géologie de la mine, le calendrier de production des rejets miniers (ex.: proportions de roches acidogènes et non acidogènes excavées pendant les différentes phases de l'exploitation de la mine), la manutention des matériaux et la disponibilité des sites d'entreposage

### **Désulfuration des résidus**

- Caractérisation du minerai et des résidus miniers : résultats des essais physiques, chimiques et minéralogiques
- Exigences relatives au matériau désulfuré : objectifs relatifs à l'élimination; critères pour prévenir le DRA et une lixiviation de métaux importante; données utilisées pour établir les critères
- Exigences relatives à l'élimination des sulfures extraits : critères pour prévenir le DRA et une lixiviation de métaux importante (ex.: exposition permise avant l'inondation)
- Processus de désulfuration : modifications au procédé de concentration (ex.: méthodes utilisées pour la flottation des sulfures); ajouts de réactifs; vitesse de traitement; contrôle de procédé (ex.: surveillance in situ en cours de traitement et analyses en laboratoire)
- Essais : méthodologie et résultats des essais en laboratoire, à l'usine pilote et sur le terrain; effets des variations du minerai sur la composition du matériau désulfuré

- Exigences opérationnelles : limites associées aux types de minerais; contraintes dans le processus de désulfuration; manipulation des matériaux et dépôt des produits (ex.: exigences relatives à la mise en tas des produits); type et fréquence de la surveillance; temps nécessaire pour détecter les perturbations; mesures à prendre (ex.: accroissement supplémentaire du PN ou utilisation de couvertures artificielles pour limiter la lixiviation de métaux ou le DRA); ressources nécessaires et personnes responsables

## **GESTION DE L'INCERTITUDE ET INFORMATION SUFFISANTE**

Les décisions en matière de gestion sont basées sur l'information disponible concernant les conditions pertinentes, les objectifs, les coûts et les besoins de la société. La compréhension ne peut jamais être totale et la détermination et la gestion de l'incertitude font nécessairement partie de tout programme relatif au phénomène de LM/DRA. C'est pourquoi il est important de fournir tous les résultats ou interprétations possibles des activités de surveillance et de caractérisation des matériaux; on ne doit pas se contenter de l'hypothèse la plus probable ou la plus facilement gérable dans les conditions en vigueur. Par ailleurs, lorsqu'on élabore les plans d'atténuation, il est important de mettre en évidence les incertitudes et de montrer comment celles-ci seront surveillées et traitées.

Il est essentiel de réaliser des analyses de sensibilité et une évaluation des risques à chaque étape du programme relatif au phénomène de LM/DRA afin de déterminer si l'information disponible est suffisante ainsi que les répercussions des inexactitudes possibles sur le risque environnemental global et sur la responsabilité. Il faut notamment examiner les répercussions éventuelles sur les volumes de rejets prévus, la capacité de ségrégation et d'entreposage des rejets miniers, la disponibilité des matériaux de construction, la chimie prédite des eaux de drainage et la capacité de respecter les limites applicables aux effluents et d'atteindre les objectifs relatifs au milieu récepteur. On peut utiliser les résultats des analyses de sensibilité et de l'évaluation des risques pour définir les exigences en matière de surveillance et pour établir où il pourra être nécessaire d'ajouter des facteurs de sécurité ou des mesures de protection en cas d'urgence.

Le programme relatif au phénomène de LM/DRA doit inclure une évaluation des conséquences des événements qui pourraient se produire pendant la durée de vie de l'installation, c'est-à-dire pendant les périodes de construction et d'exploitation ainsi que pendant la période qui suit la fermeture de l'installation. Souvent, l'incertitude est grande au sujet de la chimie future des eaux de drainage et de l'efficacité des mesures d'atténuation. Les mesures d'urgence constituent souvent le moyen le plus économique de remédier à cette incertitude. On peut aussi établir des plans d'urgence pour faire face à des perturbations possibles des conditions ou à une fermeture prématurée qui empêcherait de mettre en œuvre les mesures d'atténuation prévues. La planification d'urgence exige habituellement la participation de divers services : sécurité, environnement, opérations, entretien et personnel. Les plans d'urgence doivent inclure des programmes de surveillance pour vérifier l'efficacité des mesures d'urgence et faire en sorte qu'elles soient mises en œuvre en temps opportun. Enfin, un autre élément important de la planification d'urgence est de s'assurer que l'on dispose des ressources adéquates pour faire face à ces situations.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aubertin, M., Bussière, B., et Bernier, L. 2002. Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur cédérom. Presses Internationales Polytechnique, Montréal.

Morin, KA. et N. Hutt. 1997. Environmental Geochemistry of Minesite Drainage: Practical Theory and Case Studies, Minesite Drainage Assessment Group Publishing, p. 333.

Price, W.A. 2003. Metal Leaching and Acid Rock Drainage Challenges at Closed Mine Sites. In: Proceedings of British Columbia Mine Reclamation Symposium - Remediation Work at Closed Mines and at Mines Where Molybdenum is an Issue, Kamloops, Colombie-Britannique, 15-19 septembre.

Price, W.A. 2003. Metal Leaching and Acid Rock Drainage Challenges at Closed Mine Sites. In: Proceedings of British Columbia Mine Reclamation Symposium - Remediation Work at Closed Mines and at Mines Where Molybdenum is an Issue, Kamloops, Colombie-Britannique, 15-19 septembre.

Price, W.A. 2002. Information and Design Requirements for Drainage Treatment in British Columbia. In: Price W.A. et K. Bellefontaine. (éditeurs) Presentations at the 9th Annual BC MEM - MEND Metal Leaching and ARD Workshop, Vancouver, Colombie-Britannique, 4-5 décembre.

Price, W.A. 2001. Use of Fresh Water Covers as a Mitigation Strategy at Mine Sites in British Columbia. In: Price W.A. (éditeur) Summary Notes, 8th Annual BC MEM - MEND Metal Leaching and ARD Workshop, Vancouver, Colombie-Britannique, 28-29 novembre.

Price, W.A. (éditeur) 2000. Research, Dry Covers, Use of Solubility Constraints in ML/ARD Prediction and New Developments/Program Updates, Presentations at the 7th Annual BC MEM - MEND Metal Leaching and ARD Workshop, Vancouver, Colombie-Britannique, 29-30 novembre.

Price, W.A. et J. Errington. 1998. Guidelines for Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Minesites in British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines. p. 86.

Tremblay, G.A. et C.M. Hogan (éditeurs). 2001. MEND Manual. MEND Report 5.4.2.

## **ANNEXE A : ORGANISATION DE L'INFORMATION CONCERNANT LES REJETS ET LES ÉLÉMENTS DU SITE**

L'un des défis dans la présentation des travaux sur le phénomène de LM/DRA consiste à éviter la confusion que peuvent entraîner les nombreux facteurs à prendre en compte et les fréquents chevauchements et liens entre les matériaux et entre les éléments du site (ex.: les haldes à stériles qui sont déplacées vers le parc de résidus, ou les résultats des essais en colonne qui sont appliqués à plusieurs éléments du site). Il est parfois difficile d'organiser l'information et de choisir les rubriques car nombre d'éléments peuvent être placés sous plusieurs rubriques et un certain chevauchement est généralement inévitable. Dans certains cas, l'information sur le travail d'évaluation concernera plus d'un rejet ou plus d'un élément du site et il faudra alors fournir cette information dans une section à part, au début. D'autres éléments d'information sur les essais concerneront des aspects particuliers et il serait également préférable de les présenter dans cette section particulière.

À titre d'exemple, voici comment l'information a été organisée pour certains matériaux et éléments de site choisis aux mines Johnny Mountain et Snip :

### Stériles (Johnny Mountain)

Sites d'élimination (haldes, pistes d'atterrissage, routes)

Potentiel de LM/DRA

- Évaluations avant et pendant l'exploitation
- Altération climatique et chimie des eaux de drainage résultantes
- Évaluation de la situation actuelle

Éléments du plan d'atténuation

- Élimination sous une couverture aqueuse dans un bassin de retenue
- Mesures d'atténuation in situ
- Actions futures proposées

### Bassin de retenue des résidus (Snip)

Conception et aspects géotechniques

Composition des résidus (potentiel acidogène variable)

Composition des stériles (potentiel acidogène variable)

- Dans la digue
- Dans le parc de résidus

Éléments du plan d'atténuation

- Bilan hydrique
- Système de recouvrement (couverture) en sol et inondation
- Actions futures proposées

### Mine souterraine (Snip)

Conception et historique de l'exploitation

Potentiel de ML/ARD

- Parois de la mine
- Stériles utilisés comme matériau de remblayage
- Résidus hydrocyclonés utilisés comme matériau de remblayage
- Évaluation globale

Éléments du plan d'atténuation

- Inondation des chantiers inférieurs
- Chantier supérieurs
- Plans d'urgence pour la gestion et l'atténuation du drainage (parc de résidus)

Surveillance et entretien