

**Revue technique des études réalisées par  
NEDEM de 1990 à 1994 sur le drainage  
minier acide de la halde sud de la mine  
Doyon**

**Rapport NEDEM 1.14.3-F**

**Ce programme de recherche a été réalisé  
dans le cadre du NEDEM avec la participation  
du Centre Canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie  
par le biais de l'entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement minéral**

**Novembre 1996**

---

# **Revue technique des études réalisées par NEDEM de 1990 à 1994 sur le drainage minier acide de la halde sud de la mine Doyon**

**Cadillac, Québec**

**Rapport Final**

---

## **Le comité de prédiction du NEDEM**

Contrat TPSGC 234RO-4-1510/01-SQ  
Expert scientifique de CANMET - Monsieur Carl Weatherell  
Notre dossier M-6080 (010571)  
Novembre 1996

Par:

Geocon, Division de SNC-LAVALIN Environnement inc.  
Montréal, Québec

Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale  
Rouyn-Noranda, Québec

Centre de Technologie Noranda  
Pointe-Claire, Québec

Senes Consultants Limited  
Richmond Hill, Ontario



**GEOCON, Division de  
SNC♦LAVALIN Environnement inc.**

Membre du Groupe SNC ♦LAVALIN

---

# Revue technique des études réalisées par NEDEM de 1990 à 1994 sur le drainage minier acide de la halde sud de la mine Doyon Cadillac, Québec

**Rapport Final**

---

## Le comité de prédiction du NEDEM

Contrat TPSGC 234RO-4-1510/01-SQ  
Expert scientifique de CANMET - Monsieur Carl Weatherell  
Notre dossier M-6080 (010571)  
Novembre 1996

**GEOCON**  
**Division de**  
**SNC-LAVALIN**  
**Environnement inc.**  
Place Félix-Martin  
455, boul. René-Lévesque Ouest  
Montréal, Québec  
H2Z 1Z3  
  
Téléphone:  
(514) 393-1000  
Télécopieur:  
(514) 393-9540

**Unité de Recherche et de**  
**Service en Technologie**  
**Minérale**  
42, rue Mgr Rhéaume Est  
C.P. 700  
Rouyn-Noranda, Québec  
J9X 5E4  
  
Téléphone:  
(819) 762-0971  
Télécopieur:  
(819) 797-4727

**Centre de Technologie Noranda**  
240, boul. Hymus  
Pointe-Claire, Québec  
H9R 1G5  
  
Téléphone:  
(514) 630-9300  
Télécopieur:  
(514) 630-9393

**SENES Consultants Limited**  
121 Granton Drive  
Unité 12  
Richmond Hill, Ontario  
L4B 3N4  
  
Téléphone:  
(905) 764-9380  
Télécopieur:  
(905) 764-9386

## SOMMAIRE EXÉCUTIF

La halde de stériles sud de la Mine Doyon, Cadillac, Québec est génératrice de drainage minier acide depuis 1985, soit deux ans après le début de son utilisation. La génération d'acide a progressivement augmentée de 1985 à 1988 et depuis 1988, la halde sud génère un drainage très acide qui est présentement capté et traité à la chaux.

Entre 1991 et 1994, la halde sud a fait l'objet d'études et de sondages intensifs exécutés par l'entremise du comité de prédiction du NEDEM principalement par le Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur (GREGI), Université Laval, Sainte-Foy, Québec. Les résultats de ces études sont présentés dans une série de dix rapports. L'examen du site incluait des travaux, tels le forage et l'échantillonnage du stérile de la halde; l'installation de piézomètres, de lysimètres et de thermocouples; l'échantillonnage du drainage acide, de l'eau souterraine et interstitielle; la récupération d'échantillons de gaz dans la halde; la cueillette de spécimens microbiologiques; la mesure des températures de surfaces et du profil des températures dans la halde; et la cueillette de données climatiques et hydrologiques. Les études de laboratoires et les analyses effectuées comprenaient: la caractérisation physico-chimique et les propriétés mécaniques de différents types de roches stériles; l'analyse chimique de l'eau incluant des techniques chimiques rapides afin de suivre de près l'évolution du drainage minier acide; l'étude de l'hydrologie et du bilan hydrique; des études géotechniques et hydrologiques incluant l'évaluation de barrières sèches; des études approfondies de la minéralogie et de la géochimie; des études de dénombrement et de diversité microbiologique; et la modélisation prédictive du processus de génération d'acide incluant l'analyse du transfert de la chaleur. Un des objectifs principaux des études sur la halde sud était de mesurer les propriétés physiques et chimiques d'une halde de stériles existante et d'identifier les processus clés contribuant à la génération du drainage minier acide.

Le comité de prédiction du NEDEM a mandaté un groupe d'experts-consultants (l'équipe de révision par les pairs) afin de réviser les études réalisées sur la halde sud. La révision par les pairs a été effectuée selon cinq composantes techniques indépendantes, soit: (i) l'hydrologie; (ii) la géotechnique et l'hydrogéologie; (iii) la géochimie et la minéralogie; (iv) la microbiologie; et (v) la modélisation prédictive. L'équipe de révision a passé en revue les aspects techniques et scientifiques des dix rapports fournis par le comité de prédiction du NEDEM en prêtant une attention particulière à l'analyse critique des points forts et faibles, en mettant en évidence l'information et les connaissances nouvelles issues de ces études et en suggérant des avenues pour des travaux futurs. Ce rapport présente les commentaires de l'équipe de révision sur l'étude de la Mine Doyon.

La conclusion générale du comité de révision est que l'étude de la Mine Doyon fournit une nouvelle compréhension de certaines questions techniques spécifiques et elle représente une étude de cas approfondie et exceptionnellement bien documentée. Le comité de révision a aussi identifié, dans les rapports, un nombre d'inconsistance et d'erreurs techniques occasionnelles qui devraient être corrigées. Les inconsistances ont été relevées principalement dans les premiers rapports, soit ceux qui n'ont pu bénéficier des résultats d'études complètes, les contraintes budgétaires et de temps étant des facteurs contributifs.

## EXECUTIVE SUMMARY

The south waste rock dump at Mine Doyon, Cadillac, Québec has been generating acidic drainage since 1985, two years after the dump was started. Acid generation increased steadily from 1985 to 1988 and since 1988 the dump has been generating strong acidic drainage which is presently collected and treated with lime.

Between 1991 and 1994 the south dump has been the subject of extensive investigations and studies carried out through the MEND Prediction Committee primarily by Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur (GREGI), Université Laval, Sainte-Foy, Québec. The results of these studies have been issued in a series of ten reports. The site investigations included tasks such as drilling and sampling of the rock dump materials; piezometer, lysimeter and thermocouple installations; sampling of acidic drainage, groundwater and pore water; collection of gas samples within the dump; collection of microbiological specimens; measurement of surface temperatures and temperature profiles in the dump; and collection of climatic and hydrologic data. The laboratory and analytical studies carried out included characterization of the physico-chemical and mechanical properties of the different types of waste rock; water chemistry analyses including rapid chemical techniques to monitor acid mine drainage; hydrology and water budget studies; geotechnical and hydrological studies including evaluation of dry barriers; extensive studies of mineralogy and geochemical processes; microbiological enumeration and diversity studies; and predictive modeling of acid mine drainage processes including heat transfer analysis. One of the more important objectives of the studies at the south dump was to measure physical and chemical properties of an actual waste dump and to identify key processes contributing to the generation of acid mine drainage.

The MEND Prediction Committee arranged for a peer review of the studies carried out at the south dump by a designated group of expert consultants (Peer Review Team). The peer review was carried out under five separate technical components identified as (i) hydrology, (ii) geotechnology and hydrogeology, (iii) geochemistry and mineralogy, (iv) microbiology and (v) predictive modeling. The Peer Review Team made a technical and scientific review of the ten reports provided by the MEND Prediction Committee with particular reference to providing a critique of strong and weak points, identifying new information and understanding developed from the studies and suggesting areas for future work. This report provides the peer review commentary on the Mine Doyon study.

The overall conclusion of the peer review is that the Mine Doyon study has provided a new understanding of some specific technical issues and represents a thorough and exceptionally well documented case study. The peer review also identified a number of inconsistencies and occasional technical errors in the reports which should be corrected. The inconsistencies occur mainly in the earlier reports which were issued without the benefit of the complete study results, also budget and time constraints were a contributing factor.

## TABLE DES MATIÈRES

### SOMMAIRE EXÉCUTIF

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Informations générales.....	1
1.2 Objectifs du NEDEM à la halde sud.....	1
1.3 Objectifs de la révision des rapports NEDEM.....	2
1.4 Les membres du Comité de révision et la méthodologie de révision.....	2
1.5 Structure du rapport.....	5
1.6 Références.....	6
<b>2. LOCALISATION ET HISTORIQUE DU SITE.....</b>	<b>7</b>
2.1 Localisation du site.....	7
2.2 Historique du site.....	7
2.3 Références.....	9
<b>3. HYDROLOGIE.....</b>	<b>10</b>
3.1 Généralités.....	10
3.2 Acquisition des données hydrologiques.....	10
3.3 Analyse des données hydrologiques.....	11
3.3.1 Bilan hydrique annuel et mensuel.....	13
3.3.2 Analyse d'averses ponctuelles (Single Rainfall Runoff Events Analysis).....	14
3.3.3 Modélisation hydrogéologique.....	14
3.4 Bilan hydrique de la halde de stériles.....	14
3.5 Nouvelles approches identifiées.....	16
3.6 Application de nouvelles approches.....	16
3.7 Études additionnelles et coûts associés.....	17
3.8 Résumé.....	17
3.9 Références.....	19
<b>4. GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIE.....</b>	<b>20</b>
4.1 Introduction.....	20
4.2 Inventaire des matériaux.....	21

4.3	Caractéristiques géotechniques des différents matériaux .....	21
4.3.1	Argile .....	21
4.3.1.1	Caractéristiques générales des dépôts .....	21
4.3.1.2	Caractéristiques géotechniques du dépôt d'argile A8-1-2.....	22
4.3.2	Tills .....	24
4.3.2.1	Caractéristiques géotechniques des tills.....	24
4.3.3	Sables et graviers .....	24
4.3.4	Résidus miniers.....	25
4.3.4.1	Résidus miniers intacts .....	25
4.3.4.2	Résidus miniers amendés à la bentonite.....	25
4.3.4.3	Résidus miniers amendés aux boues de traitement HDS.....	27
4.3.4.4	Autres amendements des résidus miniers.....	27
4.3.5	Boues HDS .....	27
4.4	Barrières sèches .....	28
4.4.1	Principes physiques des barrières sèches .....	28
4.4.2	Modélisations réalisées à l'aide de HELP.....	29
4.4.3	Solutions applicables identifiées par le GREGL.....	30
4.5	Hydrogéologie du site.....	31
4.5.1	Modélisations hydrogéologiques.....	31
4.5.2	Analyse des résultats.....	33
4.6	Nouvelles approches identifiées par ce projet.....	35
4.7	Applications des nouvelles approches.....	35
4.8	Études futures et coûts associés.....	36
4.9	Sommaire .....	37
4.10	Références.....	39
<b>5.</b>	<b>GÉOCHIMIE ET MINÉRALOGIE.....</b>	<b>41</b>
5.1	Généralités .....	41
5.2	Caractérisation des solides - Travaux de terrain .....	42
5.2.1	Travaux effectués.....	42
5.2.2	Méthodologie.....	43
5.2.3	Qualité des données.....	44
5.2.4	Résumé.....	47

5.3	Caractérisation des solides - Travaux de laboratoire .....	48
5.3.1	Travaux réalisés .....	48
5.3.2	Méthodologie .....	49
5.3.3	Qualité des données .....	55
5.3.4	Résumé .....	56
5.4	Chimie de l'eau-travaux de terrain .....	57
5.4.1	Travaux réalisés .....	57
5.4.2	Méthodologie .....	57
5.4.3	Qualité des données .....	59
5.4.4	Résumé .....	60
5.5	Chimie de l'eau-travaux de laboratoire .....	61
5.5.1	Travaux réalisés .....	61
5.5.2	Méthodologie .....	61
5.5.3	Qualité des données .....	63
5.5.4	Résumé .....	64
5.6	Commentaires de la révision par rapport .....	65
5.6.1	Rapport GREGI 91-19 .....	65
5.6.2	Rapport GREGI 93-03 .....	67
5.6.3	Rapport GREGI 93-05 .....	67
5.6.4	Rapport GREGI 93-04 .....	70
5.6.5	Rapport GREGI 94-04 .....	72
5.6.6	Rapport GREGI 1994-06 .....	74
5.6.7	Rapport GREGI 1994-12 .....	77
5.7	Nouvelles approches identifiées par la révision .....	80
5.7.1	Techniques .....	80
5.7.2	Connaissance .....	81
5.8	Application des nouvelles approches .....	82
5.8.1	Techniques .....	82
5.8.2	Connaissances .....	84
5.9	Études futures et coûts associés .....	85
5.10	Résumé .....	86
5.11	Références .....	89



<b>6. MICROBIOLOGIE.....</b>	<b>91</b>
6.1 Généralités .....	91
6.2 Diversité microbiologique .....	92
6.2.1 Isolement et culture des microorganismes à partir des rognures de forage et propriétés physiologiques de croissance des isolats.....	92
6.2.2 Analyse microbiologique des eaux souterraines.....	93
6.2.3 Influence de substrats énergétiques et de la température sur l'oxydation microbienne de l'ion ferreux .....	96
6.3 Respiration anaérobie par <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i> .....	97
6.4 Technique du NPP modifiée .....	99
6.4.1 Problématique présentée.....	99
6.4.2 Solution proposée .....	100
6.4.3 Résultats et discussion présentés.....	101
6.4.4 Commentaires généraux sur le rapport.....	101
6.5 Nouvelles connaissances fournies par les travaux .....	102
6.6 Application de nouvelles connaissances .....	103
6.7 Études ultérieures et coûts associés.....	103
6.8 Résumé.....	104
6.9 Références.....	106
<b>7. MODÉLISATION PRÉDICTIVE.....</b>	<b>107</b>
7.1 Généralités .....	107
7.2 Modélisation thermique.....	109
7.2.1 Commentaires de la première révision.....	109
7.2.2 Commentaires de la seconde révision .....	110
7.3 Évaluation des données disponibles pour la modélisation du DMA.....	116
7.4 Études supportant la modélisation prédictive.....	122
7.4.1 Bilan de chaleur et bilan de masse .....	122
7.4.2 Modèle minéralogique (conceptuel).....	125
7.4.3 Méthode de prédiction de la qualité de l'eau (empirique).....	125
7.5 Le modèle <i>TOUGH AMD</i> .....	127
7.5.1 Commentaires de la révision .....	127
7.5.2 Commentaires concernant l'application du modèle <i>TOUGH AMD</i> .....	133
7.6 Nouvelles connaissances .....	135

7.7 Études futures et coûts associés.....	137
7.7.1 Études sur le terrain et en laboratoire.....	137
7.7.2 Évaluation technique des données existantes.....	138
7.7.3 Développement additionnel du modèle.....	141
7.8 Résumé.....	142
7.8.1 Synthèse.....	142
7.8.2 Modèle <i>TOUGH AMD</i> .....	144
7.9 Références.....	146
<b>8. CONCLUSIONS.....</b>	<b>148</b>

## ANNEXES

<b>ANNEXE A</b>	<b>Énoncé des travaux</b>
<b>ANNEXE B</b>	<b>Commentaires éditoriaux (Relié séparément)</b>

## LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>
Tableau 1-1 Les membres du comité de révision et les composante techniques assignées.....	5
Tableau 3-1 Bilan hydrique de la halde sud .....	22
Tableau 4-1 Conductivités hydrauliques utilisées dans les simulations .....	38
Tableau 5-1 Calcul de l'effet de la fraction - 200 mesh sur l'aire de la surface spécifique .....	86
Tableau 6-1 Coûts approximatifs des études microbiologiques .....	124
Tableau 7-1 Catégories d'échantillonnage de roches stériles .....	140

## **LISTE DES FIGURES**

		<b><u>Suivant la Page</u></b>
Figure 2-1	Plan de localisation de la Mine Doyon .....	11
Figure 2-2	Localisation régionale de la Mine Doyon .....	11
Figure 2-3	Plan du site de la Mine Doyon .....	11
Figure 2-4	Topographie originale de la halde sud .....	11
Figure 2-5	Plan de la halde sud complétée .....	11
Figure 2-6	Photographie aérienne du site de la Mine Doyon en 1972 avant l'exploitation .....	11
Figure 2-7	Photographie aérienne du site de la Mine Doyon en 1983 au début de la construction de la halde sud .....	11
Figure 2-8	Photographie aérienne du site de la Mine Doyon en 1994 incluant la halde sud complétée .....	11
		<b><u>Page</u></b>
Figure 4-1	Représentation schématique d'une barrière multicouche utilisant le principe de barrière capillaire .....	34

## **1. INTRODUCTION**

### **1.1 Informations générales**

Le programme de Neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier (NEDEM), par l'intermédiaire de ses partenaires fédéral, provincial et industriel, a commandité entre 1990 et 1994 des études sur le processus de Drainage Minier Acide (DMA) à la halde de stériles sud de la Mine Doyon, Québec. Ces études ont été réalisées par le Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur (GREGI) du Département de génie géologique de la Faculté des sciences et de génie de l'Université Laval, Sainte-Foy, Québec et par le Dr. Roger Guay représentant à la fois EnviroMine Inc. de l'Ancienne-Lorette, Québec et le Département de microbiologie de la Faculté de médecine de l'Université Laval, Sainte-Foy, Québec.

Les principaux résultats de ces études ont été présentés dans une série de dix rapports dont les références sont décrites à la fin de ce chapitre. Huit rapports ont été préparés par différents membres du GREGI et deux rapports ont été préparés par le Dr. Roger Guay. À l'exception de deux rapports GREGI (GREGI, 1991-19 et GREGI, 1994-04), les autres rapports ont été publiés à titre de documents du NEDEM. Les dix rapports (ultérieurement référés comme les rapports NEDEM) représentent la base d'information du comité de révision du processus de drainage minier acide à la halde sud de la Mine Doyon. Une collecte de données et des études additionnelles ont été réalisées. Toutefois après la publication des rapports ces informations additionnelles n'ont pas été ajoutées à la révision par les pairs.

### **1.2 Objectifs du NEDEM à la halde sud**

Les objectifs généraux du programme NEDEM à la halde sud sont présentés dans le plan des travaux du Comité de révision et sont inclus à l'annexe A. Ces objectifs se résument de la façon suivante:

1. Documenter les conditions du DMA et évaluer la barrière sèche pour le contrôle du DMA;
2. Évaluer les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de quatre principaux types de roches afin d'établir leur résistance à la dégradation et leur production de DMA;
3. Utiliser les puits de forage existants dans la halde pour:
  - échantillonner l'eau souterraine à la base de la halde;
  - recueillir des microorganismes potentiellement responsables du DMA;
  - évaluer la cinétique de la production de DMA en conditions expérimentales en simulant une halde de stériles;

- corréler les conditions physico-chimiques avec des processus microbiologiques le plus probable de génération d'acide en condition aérobie.
4. Établir le bilan hydrique de la halde sud;
  5. Développer un index minéralogique ayant comme référence la Mine Doyon afin de décrire et de caractériser les transformations minéralogiques dans les haldes de stériles productrices d'acide.
  6. Les différents rapports NEDEM présentent les objectifs spécifiques des différentes composantes techniques du programme d'étude de la halde sud.

### **1.3 Objectifs de la révision des rapports NEDEM**

Les objectifs de la révision des rapports NEDEM, tels que spécifiés par l'énoncé des travaux du projet sont:

1. Réaliser une révision technique et scientifique (incluant un jugement global et une critique des points forts et faibles des travaux) de tous les aspects des travaux inclus dans les dix rapports NEDEM;
2. Identifier les nouvelles informations et connaissances développées par le projet;
3. Indiquer comment les nouvelles informations et connaissances peuvent être utilisées afin de prédire, réduire ou contrôler la génération de DMA dans les haldes de stériles;
4. Suggérer des avenues pour des travaux futurs (et les besoins d'information complémentaire) dans le but:
  - d'accroître la compréhension de la génération de DMA dans les haldes à stériles;
  - de développer des technologies viables permettant de prédire les effets des technologies de réhabilitation.
5. Fournir une estimation du coût des travaux futurs.

### **1.4 Les membres du Comité de révision et la méthodologie de révision**

L'énoncé des travaux du projet mentionnait que les organisations suivantes et leur responsable fourniraient les experts-consultants afin de former l'équipe du Comité de révision:

- Geocon, Division de SNC-LAVALIN Environnement Inc. (Geocon)  
(M. Les MacPhie);
- Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM)

(M. Denis Bois);

- Centre Technologie Noranda (CTN)

(M. Michael Li);

- Senes Consultants Limited (Senes)

(Mme Carol Pettit).

De plus, il était indiqué dans l'énoncé des travaux que Geocon agirait à titre d'entrepreneur principal dans la réalisation du projet. Basées sur les lignes directrices fournies pour le projet, les composantes techniques suivantes ont été utilisées pour la révision :

- Hydrologie;
- Géotechnique and Hydrogéologie;
- Géochimie;
- Microbiologie;
- Modélisation prédictive.

L'approche utilisée pour la révision scientifique et technique incluait l'assignation de la responsabilité d'une première révision de chaque composante technique spécifique à l'organisation qui possédait l'expérience et le personnel le plus adéquat pour la tâche à effectuer. Cette approche a par la suite été rehaussée en assignant la responsabilité d'une seconde révision de chaque composante technique à une autre organisation. La responsabilité de la première révision comprenait un examen en profondeur des rapports NEDEM pertinents à la composante technique assignée et la préparation des commentaires du Comité de révision.

La responsabilité de la seconde révision comprenait un examen général des rapports NEDEM pertinents à la composante technique assignée ainsi que des commentaires sur la première révision. Le tableau 1-1 présente les membres du Comité de révision, la nature du mandat qui leur était assigné dans l'application de l'approche présentée précédemment ainsi qu'une référence aux rapports NEDEM pertinents à chaque composante technique. La coordination du Comité de révision a été assumée par Geocon qui a agi à titre d'entrepreneur principal.

Une version préliminaire du rapport du Comité de révision a été soumise au NEDEM (qui a sollicité les commentaires d'une sélection de cinq réviseurs) et aux chercheurs afin de recueillir leurs commentaires. Les commentaires reçus ont été soumis au Comité de révision et les modifications pertinentes ont été incorporées à la présente version finale du rapport.

Tableau 1-1

Les membres du comité de révision et les composantes techniques assignées

Comité de révision		Composantes techniques assignées	Rapports NEDEM pertinents
Première révision	Seconde révision		
<u>Geocon</u> • M. Les MacPhie • M. Bertrand Massé	<u>CTN</u> • M. Luc St-Arnaud	Hydrologie (Chapitre 3)	GREGI, 1994-06 GREGI, 1994-12
<u>URSTM</u> • M. Denis Bois • Dr. Jacques Ouellet • M. Bruno Bussière	<u>Geocon</u> • M. Les MacPhie • Dr. Narendra Verma	Géotechnique et Hydrogéologie (Chapitre 4)	GREGI, 1991-19 GREGI, 1994-6 GREGI, 1994-12
<u>CTN</u> • M. Michael Li	<u>Senes</u> • Mme Carol Pettit • Dr. Jenö Scharer	Géochimie (Chapitre 5)	GREGI, 1991-19; GREGI, 1993-03; GREGI, 1993-04; GREGI, 1993-05; GREGI, 1994-04; GREGI, 1994-06; GREGI, 1994-12
<u>URSTM</u> • M. Denis Bois • Dr. Lucie St-Amand • Dr. François Godard	<u>Senes</u> • Mme. Carol Pettit • Dr. Jenö Scharer  <u>CTN</u> • Mme Pascale St-Germain	Microbiologie (Chapitre 6)	Guay, 1993; Guay, 1994; GREGI, 1994-12
<u>Senes</u> • Mme Carol Pettit • Dr. Jenö Scharer	<u>CTN</u> • M. Michael Li  <u>Geocon</u> • Dr. Kevin Morin* (Conseiller spécialiste)	Modélisation prédictive (Chapitre 7)	GREGI, 1991-19; GREGI, 1993-03; GREGI, 1993-04; GREGI, 1993-05; GREGI, 1994-06; GREGI, 1994-12

\* Le Dr. Kevin Morin de Morwijk Enterprises Ltd., Vancouver, B.C., a agi à titre de conseiller spécialiste de Geocon pour la modélisation prédictive.

## **1.5 Structure du rapport**

Le chapitre 2.0 de ce rapport présente une brève description de la localisation et de l'histoire du site. Les chapitres 3.0 à 7.0 présentent respectivement les commentaires du comité de révision sur l'hydrologie, la géotechnique et l'hydrogéologie, la géochimie et la minéralogie, la microbiologie et la modélisation prédictive.

Un format similaire de présentation a été utilisé pour les chapitres 3.0 à 7.0 et le contenu de chaque chapitre suit les objectifs de la révision, tels que définis à la section 1.3. Suite à la révision technique et scientifique, chaque chapitre inclut des commentaires sur les nouvelles connaissances développées à partir des études à la Mine Doyon et les applications possibles de ces nouvelles connaissances. De plus, conformément aux objectifs de la révision, des avenues pour des travaux futurs ont été identifiées. Un sommaire de la révision est présenté à la fin des chapitres 3.0 à 7.0. Le lecteur est référé à ces résumés pour les conclusions spécifiques de chacune des composantes techniques de la révision.

Le chapitre 8 présente succinctement les conclusions générales relativement à l'approche technique utilisée lors de l'investigation et de l'analyse de la halde de stériles de la Mine Doyon et relativement à la présentation et aux détails techniques dans les dix rapports NEDEM passés en revue.

Les références sont incluses à la fin de chaque chapitre.

L'annexe A comprend l'énoncé des travaux de la révision par les pairs.

À la demande du comité de prédiction NEDEM, l'annexe B (relié séparément) contient des commentaires éditoriaux spécifiques sur les dix rapports NEDEM afin d'aider à les finaliser. Plusieurs des commentaires de l'annexe B ont déjà été discutés, ceux-ci faisant partie intégrante du rapport de révision.



## **1.6 Références**

GREGI, 1991-19 (Gélinas, P., Choquette, M.P., Lefebvre, R., Isabel, D., Leroueil, S., Locat, J., Bérubé, M., Thériault, D. et Masson, A.). Évaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stériles: Étude du site de la Mine Doyon. Rapport GREGI 91-19, juillet.

GREGI, 1993-03 (Lefebvre, R., Gélinas, P. and Isabel, D.). Heat transfer during acid mine drainage production in a waste rock dump, la Mine Doyon (Québec). Rapport GREGI 93-03, Mars. Rapport NEDEM report 1.14.2, mars, 1994.

GREGI, 1993-04 (Choquette, M., Gélinas, P. and Isabel, D.). Two rapid methods to evaluate acid mine drainage composition: Total dissolved solids and energy dispersive X-Ray fluorescence spectroscopy. Rapport GREGI 93-04, mars, révisé décembre 1993. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.

GREGI, 1993-05 (Choquette, M., Gélinas, P. and Isabel, D.). Monitoring of acid mine drainage: Chemical data from la Mine Doyon - south waste rock dump. Rapport GREGI 93-05, mars, révisé décembre 1993. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.

GREGI, 1994-04 (Locat, J., Bérubé, M.A., Gélinas, P., et Choquette, M.). Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des principales unités lithologiques à la Mine Doyon. Rapport GREGI 94-04, janvier.

GREGI, 1994-05 (Isabel, D., Gélinas, P.J., Bourque, E., Nastev, M. and Précourt, S.). Water budget for the waste rock dump at la Mine Doyon, Québec. Rapport GREGI 1994-05, mars. Rapport NEDEM 1.14.2e, mars, 1994.

GREGI, 1994-06 (Choquette, M. and Gélinas, P.). Mineralogical transformations associated with AMD production in a waste rock dump, la Mine Doyon - south waste rock dump. Rapport GREGI 1994-06, mars. Rapport NEDEM 1.14.2f, mars, 1994.

GREGI, 1994-12 (Gélinas, P., Lefebvre, R., Choquette, M., Isabel, D., Locat, J. and Guay, R.). Monitoring and modelling of acid mine drainage from waste rock dumps, la Mine Doyon case study. Rapport GREGI 1994-12, août, révisé septembre 1994. Rapport NEDEM 1.14.2g, juin, 1994.

Guay, R., 1993. Development of a modified MPN procedure to enumerate iron oxide bacteria. Rapport final par EnviroMine Inc., février. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.

Guay, R., 1994. Diversité microbiologique dans la production de drainage minier acide à la halde sud de la Mine Doyon. Rapport final par Département de Microbiologie, Faculté de Médecine, Université Laval, Mars. Rapport NEDEM 1.14.2, Mars, 1994.

## **2. LOCALISATION ET HISTORIQUE DU SITE**

### **2.1 Localisation du site**

La Mine Doyon est située entre Rouyn-Noranda et Val d'Or, Québec comme il est illustré à la figure 2-1. De façon plus spécifique, le site est situé à 3 km au nord de la route 117 et directement au nord-ouest de la rivière Bousquet, comme il est présenté à la figure 2-2. Le site est situé dans les limites du bassin versant de la rivière Bousquet qui coule sur 5 km en direction nord-est vers le Lac Chassignolle. L'écoulement du lac Chassignolle rejoint éventuellement le réseau de la rivière des Outaouais en passant par le lac Preissac et la rivière Kinojevis.

### **2.2 Historique du site**

Le présent sommaire historique de la Mine Doyon est extrait de deux rapports GREGI (GREGI, 1991-19 et GREGI, 1994-12). Les opérations minières ont débuté en 1978 et l'exploitation à ciel ouvert a été utilisée entre 1978 et 1989. L'exploitation souterraine a débuté en 1989 au moment de l'arrêt de l'exploitation à ciel ouvert. Durant la phase d'opération à ciel ouvert, deux fosses ont été développées (la fosse principale et la fosse ouest) et deux haldes de stériles ont été construites (la halde nord et la halde sud). La halde nord a d'abord été construite et elle a reçu le mort-terrain extrait et de la roche stérile. La halde sud a été construite de 1983 à 1988 et elle a reçu la roche stérile de la fosse principale, des quantités mineures de mort-terrain et la roche stérile moins réactive de la fosse ouest. La figure 2-3 représente le site de la Mine Doyon incluant les fosses et les haldes.

Le terrain à l'intérieur des limites de la halde sud était à l'origine drainé par deux petits ruisseaux, comme il est illustré par les contours du terrain et le réseau de drainage initial à la figure 2-4. La majorité du terrain initial dans les limites de la halde sud se draine vers le nord-ouest avec une petite partie vers l'est. De plus, une petite partie du coin nord-est se draine vers le nord-est. Comme il est montré à la figure 2-6, les arbres de la halde sud ont été abattus préalablement à la mise en place actuelle de la roche stérile. La halde sud actuelle couvre une superficie de 53 ha et contient environ 21 millions de tonnes de roche stérile pour un volume de 11,5 million de mètres cubes et une épaisseur moyenne de 30 m.

La figure 2-6 est une photographie aérienne du site prise en 1972, soit préalablement au développement de la Mine Doyon. Cette figure présente les contours de la halde sud par rapport à la rivière Bousquet. La figure 2-7 est une photographie aérienne du site prise en 1983 montrant les premiers dépôts au sud de la halde ainsi que les limites de la zone dégagée pour la halde. La figure 2-8 est une photographie aérienne du site prise en 1994, illustrant les conditions actuelles de la halde sud.

Le problème de drainage acide à la halde sud est devenu évident en 1985, deux ans après le début de l'utilisation de la halde. La génération d'acide a augmenté régulièrement de 1985 à 1988 et elle continue à un

taux raisonnablement constant depuis 1988. Le drainage acide de la halde sud est recueilli et traité par un procédé de boues à haute densité (Firlotte *et al.*, 1991).

### **2.3 Références**

Firlotte, F.W., Gélinas, P., Knapp, R. and McMullen, J., 1991. Acid drainage treatment at the Mine Doyon: Evolution and future direction. Proceedings of Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Montréal, septembre 16-18, vol. 4, pp. 119-139.

GREGI, 1991-19 (Gélinas, P., Choquette, M.P., Lefebvre, R., Isabel, D., Leroueil, S., Locat, J., Bérubé, M., Theriault, D. et Masson, A.). Évaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stériles: Étude du site de la Mine Doyon. Rapport GREGI 91-19, Juillet.

GREGI, 1994-12 (Gélinas, P., Lefebvre, R., Choquette, M., Isabel, D., Locat, J. and Guay, R.). Monitoring and modelling of acid mine drainage from waste rock dumps, la Mine Doyon case study. Rapport GREGI 1994-12, août, révisé septembre 1994. Rapport NEDEM 1.14.2g, juin 1994.

### **3. HYDROLOGIE**

#### **3.1 Généralités**

Une étude hydrologique a été effectuée dans le but d'établir le bilan hydrique de la halde de stériles sud de la Mine Doyon. Cette étude, dont les résultats sont présentés dans un rapport (GREGI, 1994-05) qui est désigné ici le rapport du bilan hydrique, a été réalisée par l'équipe du GREGI de l'Université Laval. Les objectifs visés par cette étude étaient décrits dans le rapport du bilan hydrique (p.3) et sont résumés comme suit:

- présenter les données hydrologiques disponibles à partir des différents programmes de caractérisation en cours à la Mine Doyon;
- présenter à la fois les méthodes classiques et innovatrices utilisées pour suivre l'évolution des phénomènes hydrologiques sur le site;
- présenter un bilan hydrique détaillé de la halde sud.

Des méthodes classiques ont été utilisées pour l'analyse des données météorologiques et climatiques recueillies à la fois aux stations météorologiques avoisinantes et aux stations météorologiques situées sur le site. Des méthodes innovatrices telle la modélisation par ordinateur ont été utilisées afin d'estimer les variables hydrologiques ne pouvant être mesurées.

#### **3.2 Acquisition des données hydrologiques**

##### **Données météorologiques régionales**

Trois stations météorologiques sont en opération dans la région. Celles-ci sont la station de la rivière Kinojevis (#7086630), la station d'Amos (#7090120) et la station de l'aéroport de Val d'Or (#7098600). Ces stations sont respectivement situées à des distances variant de 25 à 60 km de la Mine Doyon, la station Kinojevis étant la plus rapprochée. Au moment de l'étude, une série complète de données journalières sur les précipitations et les températures était disponible pour les années 1991 et 1992.

### **Instrumentation météorologique *in situ***

Depuis mars 1992, une station météorologique est en opération sur le site. Cette station enregistre les précipitations, la température et l'humidité relative et depuis juin 1992, la pression atmosphérique par intervalles de 15 minutes. Cependant, l'enregistrement n'est pas complet dû à la réalisation d'essais et de réglages du système ainsi qu'à une grève des techniciens au printemps et à l'été de 1992.

### **Instrumentation hydrologique *in situ***

L'instrumentation hydrologique locale est composée de déversoirs, de piézomètres et de lysimètres. Les trois déversoirs ou stations de mesure du ruissellement, sont situés à l'extrémité des fossés encerclant la halde sud. Les débitmètres affichent les volumes cumulatifs de ruissellement lesquels sont enregistrés de façon hebdomadaire par l'opérateur. Les stations ne sont pas en opération l'hiver à cause de la formation de glace. Une série de piézomètres, utilisés afin de mesurer les niveaux d'eau, sont opérationnels depuis 1991 à la halde sud. L'infiltration est mesurée depuis l'été de 1992 par une série de lysimètres enfouis à différentes profondeurs dans la halde sud.

## **3.3 Analyse des données hydrologiques**

L'ensemble des données recueillies a été utilisé afin d'évaluer les différentes composantes du bilan hydrique de la halde sud. Trois différentes analyses ont été réalisées:

- l'estimation des bilans hydriques annuel et mensuels sur la base des données météorologiques et de l'écoulement souterrain provenant de la séparation des hydrogrammes enregistrés aux déversoirs;
- l'analyse de certaines averses ponctuelles (*single rainfall-runoff*) par la technique de l'hydrogramme unitaire;
- l'évaluation de l'écoulement de l'eau souterraine (*groundwater flow component*) au site à l'aide d'un modèle hydrogéologie numérique.

L'application de ces techniques requière d'abord une analyse des différents types de données acquises sur le site et aux stations météorologiques.

### **Données de précipitation**

Les distributions mensuelles des précipitations pour 1991 et 1992 ont été obtenues en pondérant les précipitations mensuelles enregistrées aux trois stations météorologiques régionales. Le poids relatif de chaque station a été posé comme étant proportionnel à l'inverse de la distance entre la station et le site de la Mine Doyon:

$$I_w = \sum_{i=1}^3 \frac{\frac{1}{r_i} I_i}{R}$$

où  $I_w$  représente les précipitations mensuelles à la Mine Doyon;  $I_i$  représente les précipitations mensuelles enregistrées à la station  $i$ ;  $r_i$  représente la distance entre la station et la Mine Doyon; et  $R$  est obtenu par:

$$R = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{r_i}$$

C'est une méthode classique pour déterminer les précipitations à un site donné.

### **Ruissellement**

Les données recueillies aux déversoirs n'étaient disponibles que sous forme graphique. Les données numériques ne pouvaient être obtenues qu'en digitalisant manuellement le graphique ce qui était difficile en raison de l'absence d'une référence temporelle adéquate. Cependant, les ruissellements totaux hebdomadaires, enregistrés manuellement par les opérateurs, étaient disponibles. Les enregistrements hebdomadaires ont été convertis en taux d'écoulement journalier en utilisant des écoulements constants pour chaque jour d'une semaine donnée. Les données manquantes pour les périodes hivernales ont été interpolées en assumant un écoulement souterrain constant entre des mesures sporadiques obtenues en brisant la couverture de glace. Une méthode plus standard d'interpoler l'écoulement hivernal consiste à assumer une courbe de récession, celle-ci représentant mieux la variation attendue de l'écoulement souterrain durant l'hiver. La courbe de récession peut être juxtaposée aux données d'écoulement disponibles enregistrées pendant les mois d'hiver.

La figure 5 du rapport de bilan hydrique montre deux pics reliés à la fonte printanière de la neige à la station W-511, alors qu'un seul pic est apparent pour les deux autres stations. Les auteurs expliquent cette contradiction par la morphologie et l'orientation de chaque bassin. Le bassin 511 est face au sud et plus abrupte que les autres. L'accumulation de neige au pied de la halde est très sensible aux changements de température sur une base journalière et une faible quantité d'eau provient de la halde elle-même. Le bassin 510 fait face au nord-ouest et au nord et il contient environ 80 % de la halde de stériles. Son écoulement est plus important et toujours distribué plus également que les autres bassins.

### **Infiltration**

Les graphiques de hauteurs d'infiltrations cumulées ont été produits sur la base des mesures effectuées aux stations dotées d'un lysimètre. Les figures 8 et 9 du rapport de bilan hydrique montrent une nette augmentation de l'infiltration pendant la période de fonte de la neige. La hauteur annuelle d'infiltration est d'environ 450 mm à la station T92-1 et 300 mm à la station T92-2. La plus petite hauteur d'infiltration observée à la seconde

station peut s'expliquer par sa localisation dans une zone très réactive où de fortes pertes de chaleur sont observées à la surface de la halde. Les variations dans la dimension, la distribution et la compaction du matériel de la halde à ces deux stations pourraient être un facteur contributif. Les auteurs considèrent que les estimés d'infiltration au printemps 1993 ne sont pas fiables parce que l'humidité de la couche supérieure du sol n'était pas stabilisée en raison de l'installation tardive des lysimètres par gravité à l'été 1992.

### **3.3.1 Bilan hydrique annuel et mensuel**

#### **Séparation de l'écoulement souterrain pour l'ensemble du bassin versant**

Pour l'ensemble du bassin versant, la composante de l'écoulement souterrain des hydrogrammes de ruissellement a été obtenue par la méthode de séparation graphique des hydrogrammes. Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau 5 du rapport du bilan hydrique et il est mentionné dans le texte (p.23) que:

*"...Les hydrogrammes sont tracés sur du papier semi-logarithmique et les courbes de récession sont des droites tangentes à la partie inférieure de l'hydrogramme. Ce type de représentation graphique est inclus à l'annexe C".*

Alors que la méthode de séparation de l'écoulement est standard, il apparaît difficile, voir impossible, de tracer des droites tangentes à la partie inférieure de l'hydrogramme sur les courbes de l'annexe C. Ceci est dû à la méthode d'interpolation linéaire utilisée afin d'obtenir les débits journaliers à partir des enregistrements hebdomadaires. Par conséquent, les résultats de la séparation de l'écoulement souterrain présentés au tableau 5 sont discutables. Il est probable que de meilleurs résultats auraient été obtenus si les hydrogrammes avaient été préalablement lissés.

Depuis 1994, un nouveau système d'enregistrement digital a été installé ce qui a permis d'obtenir des résultats plus fiables.

#### **Écoulement souterrain (*baseflow*) à la halde de stériles**

La composante d'écoulement souterrain applicable à la halde de stériles a été estimée en subdivisant l'ensemble du bassin versant en sous-bassins représentatifs du type de sol de surface. Quatre types de sols ont été identifiés: végétation, remblai de terre, affleurement rocheux et roche stérile. Le tableau 7 du rapport de bilan hydrique montre les superficies pour chacun des types de sol de surface. Une erreur a été dénotée dans le tableau au niveau de la zone de remblai de terre couverte par le déversoir 510: la superficie du sous-bassin #18 est manquante. Cette erreur affecte aussi les résultats du tableau 8: la composante de l'écoulement souterrain de la halde de stériles devrait être augmentée d'environ 7 à 8 %. De toute façon, on peut conclure que la majorité de l'écoulement souterrain (*base flow*) provient de la halde de stériles.

#### **Bilan hydrique**



La section 3.1 du rapport du bilan hydrique (p.21) est supposée résulter en bilan hydrique annuel et mensuel. En fait, aucun de ces résultats n'apparaît: il y a une distribution mensuelle des précipitations mais aucune distribution mensuelle du ruissellement, de l'écoulement souterrain, de l'infiltration ou de l'évaporation.

### **3.3.2 Analyse d'averses ponctuelles (Single Rainfall Runoff Events Analysis)**

Le but de cette partie du rapport du bilan hydrique (section 3.2) vise à évaluer la relation temporelle entre les précipitations et le ruissellement à partir d'averses sur la halde de stériles. Il est noté que la méthode classique de l'hydrogramme unitaire a été utilisée pour réaliser cette évaluation. Actuellement, la méthode utilisée est dénommée "Hydrogramme unitaire instantané (HUI) " laquelle diffère de la précédente par le fait que la méthode HUI correspond au ruissellement résultant d'une averse de durée approchant 0. L'équation du débit (*discharge*) présentée à la page 31 du rapport du bilan hydrique contient une erreur; l'équation devrait se lire:

$$Q_t = \frac{1}{k(n-1)!} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

L'application de la méthode semble correcte. Cependant, l'objectif visé n'est pas satisfait puisqu'il est impossible d'en tirer une quelconque information applicable en particulier à la halde de stériles. L'analyse est basée sur des enregistrements d'hydrogrammes mesurés à la sortie du bassin versant et non près de la halde de stériles. Il est, par conséquent, impossible d'extrapoler les résultats à la halde de stériles. La section 3.2.2 du rapport du bilan hydrique pourrait être mise de côté sans affecter aucune des conclusions ou elle pourrait être annexée au rapport.

### **3.3.3 Modélisation hydrogéologique**

Le seul commentaire est à l'effet que lors de la modélisation, le taux de recharge a été assumé à 260 mm/an, comme pour la valeur du tableau 8 du rapport. Cependant, il a été mentionné à la précédente section 3.3.1 qu'une erreur au tableau 7 avait pour conséquence de sous-estimer de 7 à 8 % les valeurs au tableau 8. Ceci devrait être pris en considération lors de la modélisation hydrogéologique.

## **3.4 Bilan hydrique de la halde de stériles**

Les résultats de l'analyse du bilan hydrique pour la halde de stériles sont présentés à la section 3.4 du rapport du bilan hydrique.

## **Précipitation**

Sur la base des trois stations météorologiques régionales, la précipitation annuelle moyenne pour la période 1991-1992 est de 855 mm dont environ 25 à 30 % est de la neige. Ceci est très près de la précipitation moyenne provenant de l'Atlas hydrologique du Canada (Environnement Canada, 1978) pour la période 1941-1970. L'atlas mentionne aussi que la moyenne annuelle d'accumulation de neige pour cette région est de 240 mm, ce qui représente 28% des précipitations totales.

## **Ruissellement**

Pour les trois années pour lesquelles des débits ont été mesurés, le ruissellement moyen sur l'ensemble du bassin versant était de 240 mm. Pour les années 1991 et 1992, le ruissellement moyen est de 250 mm. Lors de l'établissement du bilan hydrique, le deuxième chiffre devrait être retenu puisqu'il correspond au ruissellement des années pour lesquelles des données de précipitations sont disponibles.

L'écoulement à la base de la halde de stériles a été estimé par modélisation hydrogéologique numérique et le résultat est de 200 mm par année. Le rapport de bilan hydrique mentionne que l'écoulement à la base a aussi été estimé par séparation d'hydrogrammes et que la valeur obtenue est de 213 mm annuellement. Cependant, le rapport du bilan hydrique ne donne aucun détail sur la procédure utilisée lors de cette dernière estimation. De plus, la séparation d'hydrogrammes ne peut être utilisée qu'avec des hydrogrammes de l'ensemble du bassin versant et le résultat de 213 mm est, par conséquent, uniquement représentatif de l'ensemble du bassin et ne devrait pas être directement appliqué à la halde de stériles.

Le ruissellement de surface est la différence entre le ruissellement total et l'écoulement à la base. Pour la halde de stériles, le ruissellement de surface annuel est par conséquent estimé à  $250 - 200 = 50$  mm.

## **Pertes en eau souterraine (Groundwater losses)**

Les pertes en eau souterraine ont été estimées de façon préliminaire par modélisation hydrogéologique à 70 mm par année, toutefois, cette valeur n'est pas définitive.

## **Évaporation**

Les mesures directes de l'évaporation sont rarement faites et sa valeur est communément établie par la méthode du bilan hydrique:

$$E = P - Q_B - Q_R - G - \Delta S$$

où E représente l'évaporation; P les précipitations;  $Q_B$  l'écoulement souterrain (*base flow*);  $Q_R$  le ruissellement de surface; G les pertes d'eau souterraine (*groundwater loss*); et  $\Delta S$ , la variation de l'emmagasinement (*change in storage*).

De l'équation précédente, la sommation de l'évaporation et de la variation de l'emmagasinement est  $855 - 200 - 50 - 70 = 535$  mm/année.

Selon l'Atlas hydrologique du Canada, l'évapotranspiration annuelle moyenne pour la région de la Mine Doyon est d'environ 400 mm. Considérant qu'il n'y a aucune végétation sur la halde de stériles, l'évapotranspiration consistera essentiellement en évaporation. Dans des conditions normales, c'est la valeur anticipée pour cette région. Cependant, une halde de stériles produisant un drainage minier acide (DMA) est affectée par des températures internes pouvant dépasser largement la température de l'air à la surface du sol. Profondément dans la halde de stériles, la température peut être aussi élevée que 65°C (GREGI, 1993-03, p.9). Ce qui résultera en un taux d'évaporation élevé. Naturellement, une portion substantielle de la vapeur d'eau va condenser à la surface de la halde, mais particulièrement les journées venteuses, une partie de la vapeur d'eau sera emportée à l'extérieur de la halde de stériles. Par conséquent, il est attendu que le total de l'évaporation dans la halde va excéder la moyenne annuelle régionale et devrait se situer entre 400 et 500 mm par année.

Dans le rapport du bilan hydrique, la variation de l'emmagasinement a été estimée de 213 à 237 mm/an, ce qui réduit l'évaporation de 308 à 332 mm/année. Ceci semble beaucoup trop faible et les auteurs l'ont probablement réalisé puisque dans un rapport subséquent (GREGI, 1994-12, p.4.32), la variation de l'emmagasinement a été diminuée à 40-45 mm et l'évaporation a été estimée à environ 500 mm/année. Les auteurs justifient ce changement par le fait que la rétention ou la variation de l'emmagasinement a dû être initialement assez élevée en raison probablement d'une faible teneur en eau de la halde de stériles durant les premières années. Depuis ce temps, la capacité de rétention d'eau maximale (*field capacity*) a dû être atteinte et le faible estimé de l'emmagasinement reflète la continuelle désagrégation des fragments de roches en plus petites particules, ce qui mène vers une rétention capillaire plus élevée.

### **3.5 Nouvelles approches identifiées**

Aucune nouvelle technique hydrologique n'a été employée pour établir le bilan hydrique. Toutes les méthodes utilisées sont standards. Cependant, le travail effectué représente une application soignée des méthodes standards d'établissement du bilan hydrique d'une halde de stériles.

### **3.6 Application de nouvelles approches**

L'application de nouvelles approches ne sera pas discutée puisqu'aucune nouvelle technique hydrologique n'a été utilisée pour établir le bilan hydrique de la halde sud.

### **3.7 Études additionnelles et coûts associés**

Il apparaît que la station météorologique présente sur le site est située sur le toit de l'usine de traitement. Cette situation est inhabituelle considérant que l'exposition au vent affectera l'exactitude des mesures. Il est fortement recommandé de déplacer la station au niveau du sol à un endroit plus approprié. Pour l'instant, nous nous entendons pour dire que les données recueillies à cette station ne sont pas fiables.

De meilleures estimations du ruissellement de surface et de l'écoulement souterrain dans la partie est de la halde (stations 511 et 512) pourraient être obtenues en installant de nouveaux déversoirs dans les fossés plus près de la halde. Le coût total de ces installations ne peut être estimé d'emblée car elles pourraient requérir de nouvelles sections de fossés de drainage. Toutefois, un budget de 20 000 \$ à 30 000 \$ devrait convenir pour cette tâche. Les mesures journalières de l'écoulement devraient être effectuées à ces stations.

Les principales faiblesses de l'étude (GREGI, 1995-05) sont au niveau de l'évaluation de la variation de l'emmagasinement et de l'estimation de l'évaporation. La somme de ces deux composantes du bilan hydrique est estimée à 535 mm, ce qui semble raisonnable. Toutefois, la démarcation entre l'évaporation et la variation de l'emmagasinement a été établie de façon plutôt arbitraire. Comme le suggèrent les auteurs, des efforts devraient être consentis afin d'obtenir une meilleure évaluation de l'évaporation. Les techniques de bilan énergétique (*energy budget*) et de transfert de masse (*mass transfert*) pourraient être employées à cette fin. Le coût des analyses pour ces études serait équivalent à environ 4 à 6 semaines du temps d'un technicien.

### **3.8 Résumé**

Toutes les méthodes utilisées dans cette étude sont standards et aucune technologie réellement innovatrice n'a été employée. En considérant l'instrumentation actuellement sur le site, il est difficile d'obtenir de meilleurs résultats de bilan hydrique que ceux présentés. Le tableau 3-1 présente le bilan hydrique de la halde sud.

L'étude présente certaines faiblesses concernant l'évaluation des variations d'emmagasinement et d'évaporation. De meilleurs estimés (ou la confirmation d'estimés existants) peuvent être fait pour certaines composantes du bilan hydrique. Une meilleure évaluation de l'écoulement souterrain et du ruissellement de surface pourrait être obtenue en utilisant des déversoirs plus près de la halde sud. Finalement, il est possible de mieux estimer les pertes par évaporation en utilisant les techniques de bilan énergétique (*energy budget*) et de transfert de masse (*mass transfert*).

**Tableau 3-1**  
**Bilan hydrique de la halde sud**

<b>Composante</b>	<b>Symbole</b>	<b>Total (mm/an)</b>
Précipitation	P	855
Écoulement souterrain	$Q_b$	200
Ruissellement de surface	$Q_s$	50
Ruissellement total	$R = Q_b + Q_s$	250
Pertes en eau souterraine ( <i>Groundwater losses</i> )	G	70
Variation d'emmagasinement	S	45
Infiltration	$I = Q_b + G + \Delta S$	315
Évaporation	E	490

### **3.9 Références**

Environnement Canada, 1978. Hydrological Atlas of Canada. Ministry of Supply and Services Canada.

GREGI, 1993-03 (Lefebvre, R., Gélinas, P. and Isabel, D.). Heat transfer during acid mine drainage production in a waste rock dump, la Mine Doyon (Québec). Rapport GREGI 93-03, mars. Rapport NEDEM 1.14.2, mars 1994.

GREGI, 1994-05 (Isabel, D., Gélinas, P.J., Bourque, E., Nastev, M. and Précourt, S.). Water budget for the waste rock dump at la Mine Doyon, Québec. Rapport GREGI 1994-05, mars. Rapport NEDEM 1.14.2e, mars 1994.

GREGI, 1994-12 (Gélinas, P., Lefebvre, R., Choquette, M., Isabel, D., Locat, J. and Guay, R.). Monitoring and modelling of acid mine drainage from waste rock dumps, la Mine Doyon case study. Rapport GREGI 1994-12, août, révisé septembre 1994. Rapport NEDEM 1.14.2g, juin, 1994.

## **4. GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIE**

### **4.1 Introduction**

La halde de stériles de la Mine Doyon génère une quantité importante de drainage minier acide DMA. Afin d'empêcher la génération de DMA de haldes à stériles, une des techniques les plus efficaces est la construction de barrières sèches visant à limiter le flux d'oxygène et d'eau dans les stériles (e.g. Yanful *et al.*, 1993; O'kane *et al.*, 1995). Un des objectifs du projet NEDEM à la halde sud de Doyon était donc d'évaluer la possibilité d'utiliser une barrière sèche pour limiter la production de DMA. La halde sud constitue un amas de stérile de 20,7 millions de tonnes couvrant une superficie d'environ 54 hectares. On présente, dans cette section du document, tous les aspects reliés à la conception d'une barrière sèche. Les rapports traitant de ces aspects sont les rapports GREGI 91-19 (avec les annexes A, B, C et D) et GREGI 94-05 (GREGI, 1991-19 et GREGI, 1994-05).

Pour évaluer la possibilité de construire une barrière sèche, un inventaire et une caractérisation des matériaux naturels disponibles dans les environs de la Mine Doyon ont été réalisés. Des matériaux d'origines miniers (résidus miniers et boues HDS) ont également été étudiés. Les principes physiques reliés aux barrières sèches sont par la suite expliqués par les chercheurs du GREGI. Comme on le verra plus loin, ces principes, tels qu'expliqués par le GREGI, ne correspondent pas à ce que l'on considère aujourd'hui comme étant le fonctionnement d'une barrière sèche. Des modélisations avec le logiciel HELP ont également été réalisées. Ce logiciel est habituellement utilisé pour les sites d'enfouissement.

On traite également dans cette section les aspects concernant l'hydrogéologie du site. Les documents traitant de l'hydrogéologie de la halde sont les rapports GREGI 91-19 et 94-05. Afin d'évaluer l'infiltration dans le socle rocheux, certaines modélisations ont été réalisées à l'aide du logiciel MODFLOW. Comme on le verra dans la section 5, plusieurs interrogations demeurent en ce qui concerne l'écoulement à travers le socle rocheux.

## **4.2 Inventaire des matériaux**

Afin d'évaluer la possibilité de placer une barrière de recouvrement sur la halde sud, qui a comme but d'empêcher la génération de drainage minier acide, un inventaire détaillé des matériaux meubles a été réalisé dans la région immédiate de la mine Doyon, soit dans un rayon de 10 km. Une cartographie d'une partie de la région a été réalisée par Tremblay (1974) pour le secteur est. Lors de l'été 1990, un relevé détaillé sur photographies aériennes, la description de 48 points de visite, 8 trous à la tarière, 1 tranchée et 48 points de vérification ont permis d'identifier les sites d'intérêt contenant des matériaux meubles qui pourraient être utilisés pour la construction de barrières sèches. Des sites d'intérêt ont été identifiés pour le till, le sable et le gravier, et l'argile. On retrouve du till sur des surfaces intéressantes mais l'épaisseur est plutôt mince. En ce qui concerne l'argile, la croûte est d'une épaisseur d'au plus 1,5 m ce qui fait que son extraction, pour des volumes importants, nécessiterait son exploitation sur des grandes surfaces. Pour les sables et graviers, on les retrouve principalement dans les eskers situés dans les secteurs ouest et sud-ouest.

En plus des matériaux naturels, le GREGI a étudié des matériaux provenant de l'exploitation minière, soit des résidus miniers (rejets du concentrateur) et des boues provenant de l'usine de traitement des eaux (boues HDS). Les résidus miniers étudiés proviennent du parc inactif de la Mine Doyon. L'aire d'accumulation a une superficie d'environ 80 hectares et contient plus de 5 millions de tonnes métriques de résidus miniers.

## **4.3 Caractéristiques géotechniques des différents matériaux**

Les différents matériaux étudiés ont été caractérisés du point de vue géotechnique. On présente dans ce qui suit un résumé des propriétés géotechniques pour chacun des matériaux.

### **4.3.1 Argile**

Les argiles de quatre dépôts se situant à proximité du site de la mine Doyon ont été étudiées soit les dépôts A8-1, A8-2, A8-6 et A10. La localisation des sites étudiés est présentée à la figure 3.4 du rapport GREGI 91-19 à l'exception du site A10 qui n'est pas localisé nulle part.

#### **4.3.1.1 Caractéristiques générales des dépôts**

Le dépôt A8-1 est une argile silteuse de plasticité élevée ( $w_L$  de 60 à 73 %) avec un indice de liquidité de l'ordre de 0,2 jusqu'à une profondeur de 1,3 m qui augmente pour se situer entre 0,7 et 0,8 pour des profondeurs de 1,5 à 3 m. La conductivité hydraulique d'un échantillon du puits A8-1-1 a été mesurée à  $2,8 \times 10^{-10}$  m/s. À noter que tous les essais de perméabilité réalisés dans le cadre de ces travaux ont été mesurés à l'aide du perméamètre à paroi flexible et ont été compactés à l'énergie du Proctor standard.



Les caractéristiques géotechniques du dépôt A8-2 ont été évaluées à l'aide des sondages Pu-A8-2-1 et Pu-A8-2-2. Le sondage Pu-A8-2-1, qui a été effectué au nord du dépôt, montre que l'on est en présence d'un silt avec un faible pourcentage d'argile (3 à 17 %). Le sondage Pu-A8-2-2 prélevé à l'extrémité sud du dépôt montre un matériau avec une plasticité plus élevée que dans la partie nord ( $w_L$  de 39 % et 28 % respectivement) ainsi qu'un pourcentage d'argile de 45 %. La conductivité hydraulique mesurée sur un échantillon du sondage Pu-A8-2-2 a montré une valeur de  $k$  de  $2,2 \times 10^{-10}$  m/s.

Quant au dépôt A-10, deux échantillons ont montré qu'il s'agissait de silt ou sable silteux avec peu ou pas d'argile (0 à 12 %).

#### 4.3.1.2 Caractéristiques géotechniques du dépôt d'argile A8-1-2

Afin d'évaluer la possibilité d'utiliser l'argile comme composante d'une couche imperméable, un mélange d'échantillons du puits A8-1-2 prélevé entre 0,25 et 1,5 m a fait l'objet d'une étude particulière. Une analyse minéralogique, à l'aide de la diffraction au rayon X, a permis de connaître la composition minéralogique de ce mélange. Le quartz, les plagioclases et la calcite sont les phases minérales abondantes. On retrouve également, en moindre quantité, de l'illite, de la chlorite et des traces de dolomie.

Les caractéristiques générales de l'échantillon sont les suivantes : la densité relative des grains solides est de 2,71, la teneur en eau naturelle est de 34-36 %, les limites de liquidité et de plasticité sont respectivement de 66 et 34,5 %, le pourcentage de particules argileuses est de 75 % et l'activité de l'ordre de 0,42.

En terme de caractéristiques de compactage, l'essai de compactage à l'aide du Proctor standard montre une teneur en eau optimale  $w_{opt}$  de 33,5 % et une masse volumique sèche  $\rho_d$  de  $1394 \text{ kg/m}^3$ . Du côté humide de la courbe, le degré de saturation est d'environ 97 %.

Plusieurs essais de perméabilité ont été réalisés sur l'argile. Les principales constatations sont les suivantes:

- La conductivité hydraulique du sol saturé est de l'ordre de  $2 \times 10^{-10}$  m/s du côté humide de l'optimum Proctor et environ cinquante fois plus élevée du côté sec. Ceci est typique du comportement de l'argile, tel que reporté par plusieurs auteurs, dans la littérature (e.g. Mitchell *et al.*, 1965; Leroueil *et al.*, 1992).
- La conductivité hydraulique  $k$  de l'argile non saturée est plus faible que celle saturée. Du côté humide de la courbe Proctor,  $k$  non saturée est plus faible par un facteur de 3 tandis que  $k$  non saturée est plus faible par un facteur de 20 pour le côté sec. Encore une fois, ce comportement est typique des argiles.
- La conductivité hydraulique est accrue par les cycles de gel-dégel. Après un premier cycle, la conductivité hydraulique augmente par un facteur de 5 et ce, tant dans les conditions saturées que non saturées. On constate, à partir des essais réalisés dans cette étude, qu'il y a une modification de la

conductivité hydraulique après plusieurs cycles de gel-dégel. En effet, la conductivité hydraulique après cinq cycles de gel-dégel n'est que le double de ce qu'elle était initialement. Une mise en garde, quant à ce phénomène de retour à la conductivité hydraulique initiale, doit cependant être faite. À partir de la littérature, il est difficile d'appuyer cette observation. Par exemple, les travaux réalisés par Mohamed et *al.* (1993) sur l'argile utilisée comme matériau de construction des cellules expérimentales du site Waite-Amulet près de Rouyn-Noranda ne montrent pas ce phénomène.

Des essais visant à analyser le retrait de l'argile étudiée ont été réalisés. Les résultats obtenus montrent un retrait élevé de l'argile. Ce retrait conduit inévitablement à une fissuration de l'argile et, par ce fait, à une augmentation de la perméabilité à l'eau et à l'air.

### **4.3.2 Tills**

Les sites potentiels possédant du till ont été répertoriés et sont présentés à la figure 3.2 du rapport GREGI 91-19. Ces sites sont identifiés comme étant T13-1, T12-1, T14-1, T7-4, T3-5 et T3-1.

#### **4.3.2.1 Caractéristiques géotechniques des tills**

Les analyses granulométriques réalisées sur dix échantillons provenant de ces sites ont montré que les tills contiennent de 10 à 30 % de graviers, de 45 à 60 % de sable et de 15 à 30 % de silt. Du till prélevé près du parc à résidus par la compagnie Golder contient, quant à lui, de 9 à 16 % de gravier, de 55 à 72 % de sable et de 18 à 33 % de silt. D'autres essais géotechniques ont été réalisés sur ces tills, soit des essais de compactage (Proctor standard) et des essais de cisaillement direct.

Les essais de compactage à l'aide du Proctor standard ont donné une masse volumique sèche de 2050 et 2090 kg/m<sup>3</sup> et une teneur en eau optimale de 6,6 et 8,7 % pour les échantillons de Golder et l'Université Laval respectivement.

Quant aux essais de cisaillement direct, ils ont été effectués sur le till du dépôt T-14 compacté à des conditions semblables à celles de l'optimum Proctor. Les résultats obtenus montrent une grande déformation, l'angle de frottement est de 37° tandis qu'au pic on obtient des valeurs d'angles de frottement supérieurs à 43°.

Aucun essai de perméabilité n'a été réalisé sur le till étudié. Cependant, on écrit dans le rapport GREGI 91-19 qu'on peut estimer la conductivité hydraulique du till à 10<sup>-5</sup> m/s. La méthode utilisée ou encore les travaux de références permettant de statuer cette affirmation ne sont mentionnés nulle part.

### **4.3.3 Sables et graviers**

La seule caractéristique géotechnique étudiée en ce qui concerne les sables et graviers est la granulométrie. Dix échantillons ont été prélevés dans les dépôts S1 et S2 localisés à la figure 3.3 du rapport GREGI 91-19. C'est à partir de ces échantillons qu'ont été réalisées les analyses granulométriques. Le dépôt S2 contient surtout du sable grossier avec gravier et du gravier sableux. Cependant, un des échantillons semble beaucoup plus fin et s'apparente à un silt sableux. Pour le site S1, il semble avoir une grande hétérogénéité puisque la quantité de silt pour les différents échantillons varie de 10 à 75 %. On considère qu'on est en présence de sables moyens à fins. En ce qui concerne le dépôt S4, aucun échantillon n'a été prélevé. Cependant, des points de vérification indiquent qu'il s'agit de sables moyens à grossiers avec graviers et cailloux.

#### 4.3.4 Résidus miniers

On appelle résidus miniers dans ce texte les rejets provenant du concentrateur. Dans cette étude, des essais géotechniques ont été réalisés sur des résidus miniers intacts et sur des résidus miniers amendés (avec de la bentonite, des boues de traitement HDS, du ciment Portland et de la chaux).

##### 4.3.4.1 Résidus miniers intacts

Afin de caractériser les résidus miniers de la mine Doyon, certains essais géotechniques ont été réalisés, soit des essais visant à déterminer la densité relative des grains solides, la granulométrie, les caractéristiques de compactage et de cisaillement.

La densité relative des grains solides a été mesurée à 2,88. La granulométrie des résidus miniers correspond à un silt avec un diamètre 10 % passant ( $D_{10}$ ) de 0,0035 et un coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) de 6. L'analyse minéralogique déterminée à l'aide de la diffraction des rayons X a permis de déterminer qualitativement la présence des principaux minéraux. Les phases minéralogiques principales identifiées sont le quartz (40 %), la scéricite (30 %), la chlorite (11 %), la pyrite (7 %) et le feldspath plagioclase (4 %). Tous ces résultats correspondent avec d'autres travaux de recherche utilisant les résidus de la mine Doyon (Aubertin et Bussière, 1991; Bussière *et al.*, 1995).

En ce qui concerne les caractéristiques de compactage, les valeurs obtenues à l'aide de l'essai Proctor standard sont une teneur en eau optimale de 17 % et une masse volumique sèche de 1730 kg/m<sup>3</sup>. La conductivité hydraulique  $k$  à l'optimum Proctor (à l'état non saturé) est d'environ  $2 \times 10^{10}$  m/s tandis que  $k$  compactée à  $\rho_d$  de l'optimum Proctor en condition saturée est d'environ  $2 \times 10^7$  m/s. Les essais de perméabilité ont été réalisés à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible sous un gradient hydraulique  $i$  de 10. La valeur de  $k$  saturée correspond aux valeurs mesurées sur d'autres types de résidus miniers de roches dures (Aubertin *et al.*, 1993b).

Les résultats obtenus pour les essais de cisaillement direct montrent un angle de frottement à grande déformation de 37°. Un tel angle de frottement élevé s'explique par l'aspect anguleux des particules.

##### 4.3.4.2 Résidus miniers amendés à la bentonite

Dans le but de diminuer la conductivité hydraulique des résidus miniers, un amendement des résidus miniers à la bentonite a été réalisé. Les essais de perméabilité ont été réalisés à une teneur en eau de 2 % supérieure à la teneur en eau optimale du Proctor standard afin de favoriser l'hydratation de la bentonite. Des essais de perméabilité ont été réalisés en condition saturée et non saturée à l'aide d'un perméamètre à paroi flexible sous un gradient hydraulique  $i$  de 10. Pour réduire la conductivité hydraulique d'un ordre de grandeur, un ajout de 8 % de bentonite a été nécessaire. On explique cette faible réduction par le fait que les résidus miniers présentent

une granulométrie assez uniforme. Des essais de perméabilité sur des résidus miniers amendés à la bentonite ont été réalisés à l'École Polytechnique (Aubertin et *al.*, 1995; Ricard, 1994). Les essais de perméabilité ont été réalisés à différents niveaux de compactage afin d'évaluer l'impact de l'indice des vides sur la valeur de  $k$ . L'appareil utilisé dans cette étude pour mesurer  $k$  est un perméamètre à paroi flexible. Les résultats obtenus ont montré l'impact de la bentonite sur la conductivité hydraulique  $k$ . La diminution de  $k$  avec un ajout de 6 % en masse sèche de bentonite est d'environ un ordre de grandeur ce qui correspond à peu près à ce qui a été mesuré par le GREGL.

Le retrait au séchage de ce matériau amendé a également été mesuré. Le pourcentage de retrait croît faiblement avec le pourcentage de bentonite. Cependant, ce pourcentage est faible se situant à des valeurs inférieures à 2 %.

#### **4.3.4.3 Résidus miniers amendés aux boues de traitement HDS**

La possibilité d'utiliser un mélange résidus miniers-boues HDS a été examinée dans ce projet. Des pourcentages de 5 et 10 % de boues ont été essayés pour amender les résidus. Les résultats obtenus ont été très peu concluants. Les principales difficultés rencontrées sont la teneur en eau des boues qui est trop élevée et l'impossibilité de faire un mélange homogène. Il en résulte que la conductivité hydraulique des résidus miniers n'a pas été affectée par l'amendement aux boues HDS.

#### **4.3.4.4 Autres amendements des résidus miniers**

D'autres types d'amendements ont été étudiés afin de voir leurs impacts sur les propriétés mécaniques des résidus miniers. Les matériaux utilisés comme amendement sont la chaux (chaux hydratée pure à 98 %), le ciment Portland ainsi que les boues HDS. Le maximum d'additifs a été fixé au total à 5 % (en poids sec). Les mélanges ont été réalisés avec des matériaux secs (sauf pour les mélanges avec la boue HDS) et les périodes de mûrissement ont été fixées à 100 jours. Deux séries ont été réalisées : une première série exploratoire avec ajout de 5 % de chaux et une deuxième série complète avec les autres additifs. Pour chaque série, des échantillons témoins ont été préparés en parallèle.

La première série d'essais a montré que les propriétés physico-chimiques des résidus sont modifiées par la présence de chaux (4 %). La résistance intacte a atteint une valeur maximale de 1,8 kPa, après 216 heures, soit une augmentation de 660 %, alors que la résistance remaniée a légèrement augmenté de 0,09 à 0,12 kPa, soit une augmentation de 33 %. Ces résistances ont été mesurées à l'aide du cône suédois.

Dans un deuxième temps, avec les mêmes conditions de préparation que la première série, divers mélanges de résidus avec amendements ont été réalisés. Les résultats obtenus montrent qu'il y a un gain de résistance dès le début pour atteindre, par la suite, un plateau entre 100 et 200 heures. Le plus grand gain de résistance a été obtenu avec le mélange 2 % boues HDS et 2 % ciment, où la résistance est passée de 0,13 kPa (résistance initiale) à 90 kPa. Il est intéressant de voir que pour les essais réalisés dans ce projet, les boues HDS sont un meilleur additif au ciment que la chaux.

#### **4.3.5 Boues HDS**

Les boues HDS sont des boues de l'usine de traitement utilisant la technique HDS (High Density Sludge) que l'on retrouve sur le site de la Mine Doyon. On retrouve dans le rapport GREGI 91-19 une caractérisation minéralogique et viscosimétrique de ces boues.

La composition minéralogique a été évaluée à l'aide de la méthode de la diffraction des rayons X. Les principaux minéraux retrouvés dans les boues sont: la bassanite (43 %), la goethite (27 %), la gibbsite (18 %), le quartz (7 %), l'hydroxylapatite (3 %) et de la brucite et manganite en trace.

Quant aux caractéristiques viscosimétriques, elles ont été évaluées sur des boues à la teneur en eau telle qu'obtenue à la mine. L'appareil utilisé pour mesurer ces caractéristiques est un ROTOVISCO RV12 à double cylindres. Les essais ont été réalisés à une température de 7 °C. Pour chaque échantillon, deux types de mesures ont été effectués, soit des essais de relaxation à vitesse constante et des essais de réponse dynamique. Le premier type d'essais permet de connaître le degré de stabilité du mélange et le deuxième permet d'évaluer la viscosité et le seuil d'écoulement. Les résultats obtenus montrent que les boues HDS ont un comportement qui s'apparente à celui d'un fluide de Bingham, qu'elles ont une viscosité qui varie aux alentours de 25 mPa.s et que leur seuil d'écoulement varie entre 4 et 7 Pa. Ces résultats viscosimétriques pourraient être utiles dans l'éventualité où l'on voudrait injecter la halde de stériles de boues HDS afin de diminuer sa porosité.

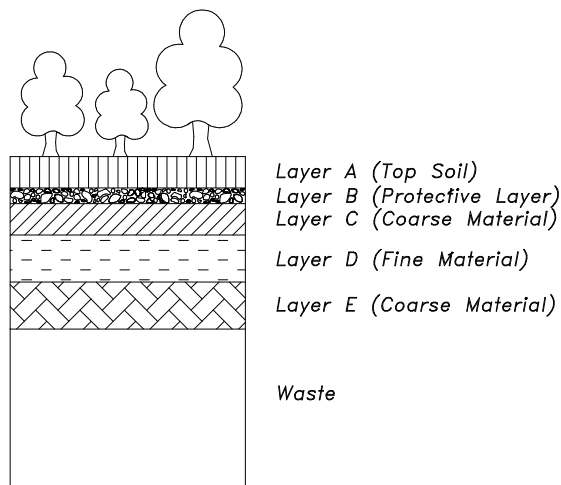
#### **4.4 Barrières sèches**

Le type de barrières sèches présenté dans le rapport du GREGI n'utilise pas le principe de la barrière capillaire pour empêcher l'infiltration de l'eau et de l'oxygène. Le type de barrières présenté dans la section 4.4.1 du rapport GREGI 91-19 vise plutôt à imperméabiliser le site de la même manière que celles utilisées pour les sites d'enfouissement de déchets (EPA, 1991). Lors de la réalisation des travaux du rapport GREGI, le principe de la barrière capillaire était connu. Il est maintenant reconnu comme le type de barrières le plus efficace, à long terme, pour empêcher la migration de l'oxygène et de l'eau jusqu'aux résidus sulfureux. Avant d'aller plus loin, il est nécessaire d'expliquer brièvement le principe de la barrière capillaire. Plus de détails sur le phénomène du bris capillaire peuvent être trouvés dans la littérature (e.g Nicholson *et al.*, 1989; Akindunni *et al.*, 1991; Morel-Seytoux, 1992; Chiu et Shakelford, 1994, Shakelford *et al.*, 1994, Yeh *et al.*, 1994, Bussière *et al.* 1995).

##### **4.4.1 Principes physiques des barrières sèches**

Le concept de la barrière capillaire implique la théorie des écoulements non saturés dans des matériaux de textures (ou de granulométries) différentes. Une barrière capillaire est habituellement créée lorsqu'une couche de matériau fin est placée sur une couche de matériau grossier, comme pour les couches D et E montrées à la figure 1. Dans ce cas, l'eau qui s'infiltré de la surface ne pourra s'écouler à travers la couche E (considérée ici comme initialement sèche) que lorsque la tension capillaire dans le matériau de la couche D sera proche de zéro (c'est-à-dire, le matériau est complètement saturé). Un effet quelque peu similaire peut aussi être créé lorsque la couche de matériau grossier est placée sur la couche de matériau fin, comme pour les couches C et D de la figure 1. Cet agencement empêche la remontée capillaire en provenance de la couche inférieure (c'est-à-dire de la couche D vers la couche C).

Un système comme celui montré à la figure 4-1 inclut donc un double effet de la barrière capillaire, soit un de chaque côté de la couche de matériau fin (couche D). L'assèchement des couches C et E (formées de matériau grossier à faible valeur de AEV) permet ainsi d'empêcher le mouvement de l'eau, tant vers le haut que vers le bas, ce qui favorise le maintien d'un haut degré de saturation dans la couche D. Pour avoir une efficacité similaire à une couverture d'eau, on considère habituellement qu'un degré de saturation de 90 % dans la couche fine est nécessaire (Aubertin et *al.*, 1993). La couche E permet aussi d'empêcher une remontée capillaire de l'eau présente dans les rejets vers la couche D, ce qui pourrait contaminer la couche de matériau fin. Pour cela, l'épaisseur de la couche E doit être suffisante pour assurer son drainage.



**Figure 4-1. Représentation schématique d'une barrière multicouche utilisant le principe de la barrière capillaire (tiré de Bussière *et al.*, 1995).**

Les choix de matériaux présentés dans le rapport GREGI 91-19 n'est pas adapté aux barrières de recouvrement multicouches utilisant le principe de la barrière capillaire. On présente à la figure 1 une représentation schématique de ce type de barrières. Lorsque l'on fait le design d'une barrière capillaire, l'aspect important est le contraste de succion entre les différents matériaux. On considère habituellement qu'un sable peut être utilisé comme composante des deux couches drainantes (couche C et E). L'épaisseur de ces couches est déterminée à partir des caractéristiques de succion des matériaux. Une épaisseur de 2 AEV (*Air Entry Value*) peut être considérée comme critère de design. En ce qui concerne la couche fine, celle-ci devra avoir des caractéristiques de succion suffisantes pour maintenir un haut degré de saturation, malgré une période de sécheresse prolongée. Un matériau silteux est habituellement considéré comme étant le type de matériau le plus efficace comme composante de la couche fine.

#### 4.4.2 Modélisations réalisées à l'aide de HELP



Les modélisations présentées dans la section 4.4.2 du rapport GREGI 91-19 ont été réalisées à l'aide du logiciel HELP (EPA, 1994). Ce logiciel est utilisé pour l'analyse hydrologique de sites d'enfouissement. On dispose de très peu de renseignements sur les modélisations réalisées. On mentionne dans le document que les modélisations ont pour but de simuler numériquement l'écoulement et le drainage latéral. Aucune attention particulière ne semble avoir été portée sur l'écoulement non saturé; c'est pourtant ce type d'écoulement que l'on retrouve dans les barrières sèches.

Les modélisations ont été réalisées pour le cas d'une couche d'argile (1 m d'épaisseur) comprise entre deux couches de sable drainant (0,5 m d'épaisseur). La couche du dessus servant à la revégétation est d'une épaisseur de 1 m. Enfin, un matériau appelé filtre support d'une épaisseur de 0,5 m est placé sur les stériles. Un ensemble de modélisations ont été réalisées afin de voir l'impact de la distance au drain et de la pente pour deux valeurs de conductivité hydraulique du sable drainant ( $10^3$  m/s et  $10^2$  m/s). Les résultats, dans le cas où la couche drainante a une conductivité hydraulique de  $10^3$  m/s, montrent que l'espacement des drains a un impact lorsque l'on diminue sa valeur sous les 80 m. On peut également observer que la pente a un impact majeur sur l'infiltration. Les résultats obtenus, pour le cas où la conductivité hydraulique du sable drainant est de  $10^2$  m/s, sont très différents. En effet, d'après les modélisations réalisées, augmenter la pente, à des valeurs supérieures à 6 %, influence très peu l'infiltration. Quant à l'espacement des drains, l'impact se fait sentir seulement si la pente est inférieure à 6 %. En résumé, on peut dire que les modélisations de l'infiltration, à travers une telle barrière de recouvrement, montrent que celles-ci peuvent être limitées à moins de 20 000 m<sup>3</sup>/année (soit environ 6 % de l'infiltration normale), avec une valeur minimale d'environ 12 000 m<sup>3</sup>/année, si la conductivité hydraulique est maintenue à  $10^9$  m/s.

#### 4.4.3 Solutions applicables identifiées par le GREGI

Dans la section 4.5 du rapport GREGI 91-19, on évalue les solutions applicables à la halde sud de la Mine Doyon dans l'optique de l'installation d'une barrière sèche. La principale conclusion des chercheurs du rapport GREGI est «que les solutions envisageables devront incorporer une géomembrane suffisamment souple et résistante pour suivre les mouvements de surface de la halde tout en maintenant son intégrité». Les principaux commentaires que l'on peut faire sur cette section sont les suivants :

- Les solutions suggérées sont toujours pour une barrière imperméable et non pas pour une barrière capillaire. C'est pour cette raison que l'on rejette les matériaux silteux alors que l'on aurait dû considérer ces matériaux comme étant les plus intéressants;
- On favorise, dans ce document, l'utilisation de géomembranes à l'intérieur de la barrière alors que l'on sait, qu'à long terme, l'on doit remplacer ce type de matériau.

On élimine l'utilisation de matériaux naturels comme matériaux de construction d'une barrière sèche en raison des affaissements observés sur le site. Cependant, aucune mesure de ces affaissements n'a été faite et aucune information n'est disponible sur ce sujet. Une visite récente du site n'a pas permis de confirmer ces affaissements. De plus, on sait que l'installation d'une barrière sèche diminuerait le processus de génération

d'acide et par le fait même, les affaissements. Il nous semble donc très prématuré de rejeter l'utilisation des matériaux naturels comme composantes d'une barrière sèche, à partir d'observations visuelles non vérifiées techniquement.

## **4.5 Hydrogéologie du site**

### **4.5.1 Modélisations hydrogéologiques**

Des analyses numériques ont été réalisées par le groupe GREGI de l'Université Laval pour le site des haldes de stériles de Mine Doyon. Les résultats de ces analyses sont discutés dans les rapports suivants :

- Rapport GREGI 94-05 (GREGI1.14.2e);
- Rapport GREGI 91-19.

Le rapport GREGI 93-11, de Nastev et Isabel (1993), est cité relativement aux analyses numériques présentées dans les deux premiers rapports mentionnés plus haut. Toutefois, ce dernier n'était pas disponible aux réviseurs. La collecte et l'analyse des données hydrogéologiques ont été discutées dans la section 3.0. Le bilan hydrique de la halde élaboré par le groupe du GREGI est également discuté. Ces commentaires ne seront donc pas répétés ici.

La discussion suivante se limite donc aux modélisations numériques réalisées par le groupe de Laval. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel USGS MODFLOW 2D (McDonald et Harbaugh, 1984). La modélisation hydrogéologique comprend deux analyses numériques distinctes:

- Modélisation des assises sous la halde de stériles;
- Modélisation de la halde de stériles.

La première analyse avait pour objectif de réconcilier les niveaux d'eau observés dans les puits creusés dans la halde avec les valeurs de conductivité hydraulique mesurées par Golder et Ass. (1991). En effet, quelques essais d'injection (slug test) réalisés dans certains puits ont permis d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique à faible profondeur dans le socle rocheux sous la halde (moins de 5 mètres) de l'ordre de  $2 \times 10^6$  m/s. Cette valeur de conductivité hydraulique a été jugée incompatible avec les niveaux piézométriques observés. Un modèle numérique a été construit à l'aide de MODFLOW 2D pour tenter d'obtenir une conductivité hydraulique représentative du massif rocheux sous la halde. Seul le socle rocheux a été pris en compte dans cette analyse. Une limite imperméable a été posée à 20 mètres sous le plancher de la fosse. Les limites latérales étaient la fosse au nord-est et la rivière Bousquet à l'ouest. La calibration de ce modèle numérique, sur les niveaux piézométriques observés dans la halde, donne une valeur de conductivité hydraulique de l'ordre de  $10^9$  m/s pour le socle rocheux. Les chercheurs du GREGI concluent que la plus grande conductivité hydraulique mesurée lors des essais en puits est due à une fracturation locale à faible profondeur et n'est pas représentative de la perméabilité réelle du roc.

Bien que cette conclusion des chercheurs du GREGI paraît justifiable dans ce contexte, sa justification n'est pas suffisamment élaborée dans le rapport. Cet élément de conclusion est important car il aura un impact déterminant dans l'élaboration du modèle conceptuel utilisé dans la préparation de la simulation numérique de la halde. Plus particulièrement, cette conclusion va fortement influencer les prédictions du modèle, en ce qui concerne les pertes d'eau sous la halde et la géométrie du réseau d'écoulement.

Le second modèle, toujours réalisé à l'aide du logiciel USGS MODFLOW 2D, a été utilisé pour modéliser l'écoulement au travers de la halde de stériles. L'objectif de cette seconde modélisation étant de compléter le bilan hydrologique de la halde en tentant d'estimer l'infiltration d'eau dans le roc (*ground water loss*).

Un modèle à 4 couches distinctes a été construit. Le tableau suivant présente les conductivités hydrauliques de ces couches.

**Tableau 4-1**  
**Conductivités hydrauliques utilisées dans les simulations**

<b>Couches</b>	<b>k*</b>
1. Rejet	$1 \times 10^{-3}$ m/s
2. Sol	$7 \times 10^{-7}$ m/s
3. Roc fracturé	$1 \times 10^{-6}$ m/s
4. Massif rocheux	$3,5 \times 10^{-9}$ m/s

\* où k est la conductivité hydraulique

La seconde colonne représente la valeur de conductivité hydraulique attribuée à chacune des couches dans le modèle, suite à la caractérisation sur le terrain et au laboratoire. Pour la quatrième couche (massif rocheux), la valeur utilisée est obtenue de la première modélisation réalisée pour les assises de la halde.

Les conditions aux frontières spécifiées dans le modèle sont :

- Charge constante au nord (fond de la fosse 4891 m);
- Nord-est charge constante (niveau de l'effluent, 4960 m);
- Au sud charge constante (niveau de l'effluent, 4995 à 4955 m);
- Sud-est charge constante (élévation de la rivière Bousquet);
- Nord-ouest charge constante (4975 m);
- Charge constante entre la halde et la rivière Bousquet (4957 m).

Le taux d'infiltration dans le modèle est fixé à 260 mm/an.

#### **4.5.2 Analyse des résultats**

Tel que mentionné précédemment dans ce document (article 3.3.1), suite à une erreur dans le tableau 8 du rapport GREGI, le taux d'infiltration serait sous-estimé (de l'ordre de 8%). Cette correction devrait être prise en compte dans le modèle numérique. Cette erreur doit donc se refléter sur les résultats obtenus avec cette modélisation. La perte d'eau dans le roc, suite à ces analyses, est estimée à 70 mm/an. Certaines réserves doivent donc être posées sur cette estimation, suite à l'erreur introduite dans l'évaluation du taux de recharge.

Une meilleure caractérisation de la conductivité hydraulique du socle rocheux permettrait de raffiner le modèle numérique, tel que recommandé dans le rapport GREGI. Ces derniers recommandent de procéder à des simulations numériques à l'aide d'un logiciel permettant de simuler l'écoulement multiphase. Cette dernière recommandation est jugée peu opportune. La concentration, très élevée en solides dissous, mesurée dans le

lixiviât de la halde et les variations de température (40 à 65 degrés Celcius) influencent l'écoulement dans la halde. Dans un tel cas, il faut plutôt considérer un écoulement en fonction de la densité. Dans cette éventualité, un logiciel utilisant une approche d'écoulement de fluides miscibles à densité variable serait plus approprié. Toutefois, ce problème est complexe car la densité est alors fonction de la concentration en solides dissous et de la température.

Les travaux réalisés par le GREGI, dans le cadre des modélisations hydrogéologiques, sont conventionnels. L'approche et le type de modélisation utilisés sont courants. Le seul objectif, qui permet d'atteindre les modélisations numériques, est de compléter le bilan hydrogéologique. Cette partie des travaux n'apporte pas en soi de nouvelles connaissances à la compréhension du problème de drainage minier acide dans les haldes de stériles en général.

Les valeurs de certains paramètres diffèrent d'un rapport à l'autre (1991 vs 1994). Par exemple, l'infiltration dans le socle rocheux est d'abord présentée comme étant de l'ordre de 8 % pour être finalement présentée à 5 % dans le rapport de 1994. Aucune explication n'est donnée dans ces rapports pour justifier ces modifications.

Une analyse de sensibilité des paramètres utilisés dans la modélisation numérique aurait été souhaitable. Il serait alors possible d'apprécier l'impact de l'erreur soulevée à l'article 3.3.1. De plus, la définition de plages de valeurs des termes d'infiltration serait plus intéressante d'un point de vue technique.

#### **4.6 Nouvelles approches identifiées par ce projet**

Les travaux qui ont apporté le plus, en terme de nouvelles connaissances sur les barrières sèches construites sur une halde de stériles, sont ceux concernant l'amendement des résidus miniers avec de la bentonite comme matériaux de construction de la barrière. L'utilisation de la bentonite peut permettre de diminuer la conductivité hydraulique d'environ un ordre de grandeur. De plus, d'autres travaux ont montré que la bentonite permet d'améliorer les caractéristiques de rétention d'eau du matériau amendé (Ricard, 1994). Comme il a été expliqué dans ce document, les caractéristiques de rétention d'eau sont les paramètres les plus importants lorsque l'on veut faire le design d'une barrière sèche utilisant le principe du bris capillaire. Il serait donc possible d'utiliser des résidus miniers amendés à la bentonite comme composante de la couche fine de la barrière sèche. Cette technique pourrait être applicable dans les cas où les coûts, associés à l'utilisation de ce matériau comme matériau de construction de la barrière sèche, seraient moindres que ceux avec l'utilisation de matériaux naturels.

Un autre aspect intéressant des travaux est l'amélioration des caractéristiques mécaniques avec l'utilisation des boues HDS et de ciment comme amendement. Il est donc très intéressant de noter que les boues HDS (considérées comme un rejet) constituent, à court terme, un meilleur additif au ciment que la chaux. Cette piste intéressante devrait être poussée plus à fond.

Les boues pourraient également être incorporées dans la barrière sèche qui recouvrirait le dessus de la halde de stériles. Cependant, il ne faut pas oublier que les boues contiennent des concentrations élevées en métaux et que la stabilité des boues doit être garantie avant de l'utiliser dans un quelconque recouvrement.

#### **4.7 Applications des nouvelles approches**

Il est maintenant reconnu que l'utilisation de résidus miniers, qui se situent habituellement à proximité des haldes de stériles, peut être une alternative intéressante aux matériaux meubles comme composante d'une barrière sèche (Aubertin et *al.*, 1995). Dans certaines circonstances, un amendement des résidus miniers à la bentonite pourrait permettre à ceux-ci d'atteindre les caractéristiques de perméabilité et de succion nécessaires pour être utilisés comme composante d'une barrière sèche visant à empêcher la génération de drainage minier acide. Cette technologie pourrait être utilisée autant pour les parcs à résidus miniers que pour les haldes à stériles.

Quant aux boues HDS, parce qu'elles semblent constituer un bon additif au ciment, on pourrait les utiliser dans le procédé de remblayage souterrain. Ceci pourrait permettre de diminuer les volumes de boues à stocker en surface tout en réduisant le coût du remblayage.

#### **4.8 Études futures et coûts associés**

Tel que mentionné précédemment, les caractéristiques de succion (ou caractéristiques de rétention d'eau) sont essentielles pour quiconque veut faire le design d'une barrière sèche. Dans le cadre de l'étude faite par le GREGI, aucune mesure de ces caractéristiques n'a été réalisée. Dans l'éventualité où la Mine Doyon voudrait installer une barrière sèche, une campagne de mesure de ces caractéristiques serait essentielle. Une modélisation hydrogéologique en milieu non saturé pourrait, par la suite, permettre de déterminer l'épaisseur des différentes couches de la barrière. Les coûts associés à ces travaux pourraient se situer entre 20 000 \$ à 50 000 \$.

Une étude sur l'impact d'utiliser des boues HDS comme additif au ciment serait également du plus grand intérêt. Une campagne d'essais (essais triaxiaux et uniaxiaux) pourrait permettre de comparer les résultats avec boues HDS et ceux obtenus à l'aide de d'autres additifs. Il serait par la suite possible de comparer la loi de comportement du remblai avec boues HDS versus remblai ordinaire (Ouellet, 1995). On évalue à entre 15 000 \$ et 30 000 \$ les coûts reliés à ces travaux.

La possibilité d'incorporer les boues HDS à la barrière sèche semble être une voie intéressante à étudier. Évidemment, la stabilité chimique de ces boues constitue le principal handicap de cette alternative. On évalue qu'une préfaisabilité technico-économique pourrait être réalisée pour environ 30 000 \$.

Un autre aspect qui mériterait d'être approfondi est l'évaluation des affaissements de la halde mentionnés par les chercheurs du GREGI. On pourrait, par la suite, évaluer l'impact de ces affaissements sur les coûts de construction. De faibles coûts seraient reliés à ces travaux, soit de l'ordre de 5 000 \$ à 15 000 \$.

Comme on l'a vu précédemment, des données contradictoires existent en ce qui concerne la conductivité hydraulique du socle rocheux. Le GREGI suggère, à raison, d'effectuer des essais d'injection à plus grande échelle afin de mieux caractériser la conductivité hydraulique du roc. Des variations, dans les valeurs utilisées pour le socle rocheux, auraient un impact prédominant sur les résultats de la modélisation numérique. Une modélisation considérant l'écoulement multiphase, telle que recommandée par le GREGI, nous semble peu pertinente. En effet, les concentrations élevées en solides dissous et les fortes variations de température influencent l'écoulement de l'eau. Il serait plus intéressant de considérer un écoulement qui est fonction de la densité. À cette fin, il faut alors utiliser un modèle d'écoulement de fluides miscibles à densité variable. C'est un problème complexe car la densité de l'eau est alors fonction de la concentration en solides dissous et de la température. Mais, tel que mentionné plus haut, les conditions de conductivité hydraulique du socle rocheux postulées dans l'élaboration du modèle numérique ont plus d'importances que les variations de densité de l'infiltration sous la halde.

Selon les nouvelles données obtenues sur la conductivité hydraulique, il pourrait être nécessaire d'évaluer les caractéristiques géochimiques et les diverses propriétés de l'écoulement (direction, vitesse) de l'eau souterraine s'infiltrant sous la halde. Le coût d'une telle étude pourrait être de l'ordre de 50 000 \$.

## **4.9 Sommaire**

Les travaux réalisés par le GREGI, en ce qui concerne la caractérisation des matériaux meubles, est typique de ce qui se fait dans le génie conseil et semblent avoir été réalisés selon les règles de l'art. Cependant, ces derniers ne constituent pas des travaux de recherche à l'exception des essais réalisés sur les mélanges résidus miniers-bentonite.

Les barrières sèches, telles que présentées par le GREGI, ne correspondent pas à ce que l'on considère aujourd'hui comme étant une barrière sèche. Le type de barrière proposé par le GREGI n'utilise pas le principe de bris capillaire pour empêcher la migration de l'eau et l'oxygène jusqu'aux résidus sulfureux. Par ce fait, le design proposé dans le rapport GREGI91-19 est extrêmement coûteux et n'est donc pas optimal. D'autres haldes à stériles ont été restaurées à l'aide de barrières sèches au cours des dernières années au Canada avec un design beaucoup plus simple. Le site *Equity Silver Mines*, par exemple, utilise même les stériles comme couche grossière afin d'effectuer le bris capillaire avec le matériau fin (Okane et al., 1995) ce qui permet de réduire les coûts de construction.

Il est évident que le rejet des barrières sèches, comme mode de restauration de la halde sud de la mine Doyon par le GREGI, a été fait prématurément. On peut même dire qu'à partir des connaissances actuelles, la barrière sèche nous apparaît comme la méthode de restauration la plus applicable pour ce site. Cependant, avant l'application de cette technologie, une étude visant la sélection de la solution la plus appropriée pour la restauration de la halde sud ainsi qu'une comparaison entre les différentes options disponibles devra être réalisée.

Tel que mentionné précédemment, les modélisations hydrogéologiques réalisées sont conventionnelles et n'apportent pas de nouvelles connaissances dans ce domaine. L'objectif principal de ces modélisations est de connaître le taux d'infiltration sous la halde afin de compléter le bilan hydrologique. Cependant, les résultats obtenus montrent qu'environ 5 % de l'eau s'infiltré sous la halde.

En conclusion, on peut dire que la quantité de travail réalisée par le GREGI est considérable et que les travaux ont été réalisés selon les règles de l'art. Toutefois, au niveau géotechnique et hydrogéologique, peu de progrès ont été réalisés en terme de compréhension du phénomène de la génération de drainage minier acide dans les haldes à stériles.

Il faut noter que les commentaires présentés dans ce chapitre réfèrent uniquement au contenu des rapports GREGI soumis au NEDEM (voir Introduction Tableau 1-1). Ces commentaires ont pour but de fournir les éclaircissements ou à apporter les nuances favorisant la compréhension des lecteurs qui utiliseront ces rapports.



Considérant les précisions qui nous ont été transmises par l'équipe du GREGI mais qui n'apparaissent pas dans les rapports NEDEM, soulignons:

- Que les chercheurs du GREGI ont rejeté l'utilisation des résidus miniers amendés ou non et des boues de traitement en raison de leur contenu initial élevé en cyanure;
- Qu'en raison des observations faites sur le socle rocheux et aux données disponibles à l'équipe du GREGI, il n'apparaissait pas utile d'approfondir plus avant les caractéristiques de l'écoulement sous la halde.

#### **4.10 Références**

- Akindunni, F.F., Gillham, R.W. et Nicholson, R.V., 1991. Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 28 :446-451.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.F. et Tremblay, L., 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. Final Report (Draft version), Prepared for CANMET, Report C.D.T. P1622, École Polytechnique de Montréal, 202 p.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Bussière, B. et Aachib, M., 1993a. Propriétés des résidus miniers utilisés comme matériau de recouvrement pour limiter le drainage minier acide (DMA). *Geoconfine 93*, Arnould, Barrès et Côme (eds), Balkema, 299-308.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Bussière, B. et Aachib, M., 1993a. On the use of tailings as cover to prevent AMD. *Conférence Conjointe de la SCGC-ASCE sur le Génie Environnemental*, Montréal, 1: 195-202.
- Aubertin, M. et Bussière, B., 1991. Étude préliminaire - Évaluation des barrières sèches construites à partir de résidus miniers alcalins. Rapport soumis au Centre de Recherche Minérales, Projet C.D.T. P1610, École Polytechnique de Montréal, septembre 1991.
- Bussière, B., Lelièvre, J., Ouellet, J. et Bois, D., 1995. Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA: analyse technico-économique sur deux cas réels. *Proceedings of the Sudbury '95, Conference on Mining and the Environment*, 1: 59-68.
- Chiu, T-F. et Shakleford, C.D., 1994. Practical aspects of the capillary barrier effect for landfills. Presented at the 17<sup>th</sup> International Madison Waste Conference, Septembre 21-22, 1994, 357-375.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1991. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model. User's Guide for Version 3, EPA/600/R-94/168a, 81 p.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1991. Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers. Seminar Publication, EPA/625/4-91/025, 169p.
- GREGI, 1991-19 (Gélinas, P., Choquette, M.P., Lefebvre, R., Isabel, D., Leroueil, S., Locat, J., Bérubé, M., Theriault, D. et Masson, A.). Evaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stérils: Étude du site de la Mine Doyon. Rapport GREGI 91-19, Juillet.
- GREGI, 1994-05 (Isabel, D., Gélinas, P.J., Bourque, E., Nastev, M. and Précourt, S.). Water budget for the waste rock dump at la Mine Doyon, Québec. Report GREGI 1994-05, March. MEND report 1.14.2e, March, 1994.
- Leroueil, S., Le Bihan, J.P. et Bouchard, R., 1992. Remarks on the design of clay liners used in lagoons as hydraulic barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 28: 446-451.
- McDonald, M.G. et Harbaugh, A.W., 1984. MODFLOW, A Modular Three-dimensional Finite-difference Groundwater Flow Model, U.S.G.S., Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6.

Mitchell, J.J., Hooper, D.R. et Campanella, R.G., 1965. Permeability of compacted clay. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 91 (SM4), 41-65.

Mohamed, A-M. O., Young, R.N., Caporuscio, F, Yanful, E.K. et Bienvenu, L., 1993. Chemical interactions and cyclic freeze-thaw effects on the integrity of the soil cover for Waite-Amulet tailings. Conférence Conjointe de la SCGC-ASCE sur le Génie Environnemental, Montréal, 1: 259-272.

Morel-Seytoux, H.J., 1992. The capillary barrier effect at the interface of two soil layers with some contrast in properties. HYDROWAR Report 92.4, Hydrology Days Publications, 57 Shelby Lane, Atherton, CA 94027-3926, 109 p.

Nastev, M. et Isabel, D., 1993. Modélisation des écoulements souterrains sous la halde sud de la Mine Doyon. Rapport GREGI-93-11, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval.

Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A. et Reardon, E.J., 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal, 26: 1-8.

O'Kane, M., Wilson, G.W., Barbour, S.L. et Swanson, D.A., 1995. Aspects on the performance of till cover system at Equity Silver Mines Ltd. Proceedings of the Sudbury '95, Conference on Mining and the Environment, 2: 565-573.

Ouellet, J., 1995. Comportement contrainte-déformation d'un remblai hydraulique cimenté pour le remblayage minier. 48<sup>e</sup> Conférence Canadienne de Géotechnique, Vancouver, Septembre 1995 (à paraître).

Ricard, J.F., 1994. Étude en laboratoire de la relation capillaire et de la conductivité hydraulique de résidus miniers. Mémoire de maîtrise, Département Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.

Shackelford, C.D., Chang, C.K. et Chiu, T.F., 1994. The capillary barrier effect in unsaturated flow through soil barriers. Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, ISSMFE/CGS, 789-793.

Tremblay, G., 1974. Géologie du Quaternaire, Régions de Rouyn-Noranda de d'Abitibi, Comtés d'Abitibi-est et d'Abitibi-ouest. Ministère de l'Énergie et des Ressources, DP-236.

Yanful, E.K., Riley, M.D., Woyshner, M.R. et Duncan, J., 1993. Construction and monitoring of a composite soil cover on an experimental waste-rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. Revue Canadienne de Géotechnique, 30:588-599.

Yeh, T.-C. J, Guzman, A., Srivastava, R. et Gagnard, P.E., 1994. Numerical simulation of the wicking effect in liner systems. Ground Water, Vol. 32, 1: 2-11.

## **5. GÉOCHIMIE ET MINÉRALOGIE**

### **5.1 Généralités**

Le projet de la Mine Doyon est certainement une des meilleures études parrainées par le NEDEM au niveau de l'avancement de notre compréhension de la génération de DMA dans les haldes de stériles. À notre connaissance, c'est la plus exhaustive au monde si l'on compare l'étendue des disciplines incluses.

Les travaux de géochimie et de minéralogie du projet de la Mine Doyon sont particulièrement éloquentes. Son approche multidisciplinaire des problèmes du DMA est exemplaire. Cette étude a généré de nouvelles connaissances sur la géochimie et la minéralogie des processus reliés au DMA dans les haldes de stériles. Certains outils d'investigation utilisés sont innovateurs et certaines techniques d'évaluation et d'interprétation sont uniques. L'aspect le plus significatif de ce travail est probablement qu'il attire notre attention sur l'importance de l'altération des phyllosilicates.

Aucune lacune ou défaut majeur n'a été identifié par la révision; toutefois des défauts mineurs voire significatifs sont presque toujours inévitables dans un projet de cette envergure. Les réviseurs ont noté les excellentes réalisations et mis en évidence certains défauts. Les rapports suivants ont été révisés: GREGI, 1991-19; GREGI, 1993-03; GREGI, 1993-04; GREGI, 1993-05; GREGI, 1994-04; GREGI, 1994-06; GREGI, 1994-12.

Considérant que la partie de cette étude traitant de la caractérisation des dépôts naturels à titre de sources possibles de couvertures de sol pour la halde de stériles n'était pas reliée à la géochimie et à la minéralogie, les réviseurs ne l'ont pas inclus dans leur révision.

## **5.2 Caractérisation des solides - Travaux de terrain**

### **5.2.1 Travaux effectués**

L'étude de la Mine Doyon a mis en oeuvre des travaux de terrain d'envergure par l'échantillonnage et la caractérisation de stériles (*solid characterization*). Le programme d'échantillonnage des stériles (*solid*) comprenait les composantes suivantes:

- sept forages (BH-1 à BH-6, forés en 1991 et BH-7, foré en 1992) d'une profondeur de 21 à 47 mètres sur la halde sud, pénétrant successivement la roche stérile, la couche de sol de surface lorsqu'elle était présente et la partie supérieure du massif rocheux et desquels des rognures de forage ont été recueillies à titre d'échantillons composites selon un intervalle approximatif de 1,5 m;
- cinq tranchées exploratoires d'une profondeur de 3 à 5 m (T1 à T5) sur la halde sud, desquelles des échantillons composites (*grab sample*) ont été recueillis à des intervalles inégaux d'approximativement 0,5 à 1,5 m;
- deux fosses de surface d'une largeur de 15 m et d'une profondeur de 5 m (T92-1 et T92-2) sur la halde sud qui ont servies à l'installation de lysimètres et desquelles des échantillons en vrac et composites ont été prélevés.

Les travaux de terrain en caractérisation géochimique et minéralogique comprenaient les composantes suivantes:

- description visuelle et classification;
- évaluation du pH à partir de la pâte (*Paste pH*);
- ségrégation des particules selon leur dimension pour l'analyse de la distribution granulométrique;

## 5.2.2 Méthodologie

### Forage

À l'intérieur des contraintes normales des ressources, le forage à sec représente la meilleure technique disponible pour obtenir des échantillons raisonnablement représentatifs d'une large halde de stériles. À la Mine Doyon, une foreuse à circulation renversée avec marteau plongeur muni d'un forêt excentrique a été utilisée. Les rognures de forage étaient remontées à la surface par l'air comprimé, ce qui permettait de recueillir des échantillons composites selon la profondeur du forage. Cependant, la méthode de forage à sec possède deux inconvénients lesquels ne peuvent être résolus par le développement actuel de la technologie:

- la roche est brisée par le processus de forage, ce qui crée de nouvelles surfaces et particules fines qui ne sont pas représentatives des conditions *in situ*;
- l'humidité de la roche s'évapore quand les rognures de forage sont soufflées dans le trou de forage vers la surface empêchant l'extraction ultérieure de l'eau interstitielle.

La localisation des forages BH-1 à BH-6 sur le site de la Mine Doyon était basée sur deux considérations:

- pour recouper différentes unités lithologiques rencontrées dans la halde sud (référence aux Rapport GREGI 1994-12, pp. 1.2-1.6; Rapport GREGI 91-19, pp. iii-iv et Rapport GREGI 91-19 Annexe A, p. 5);
- pour suivre les ruisseaux de surface de la topographie originale (référence à la figure 2 de la p. 90 du Rapport GREGI 91-19).

Les trois principales unités lithologiques ont toutes été bien échantillonnées: le schiste à séricite (unité 4B, environ 50% de la halde sud) et les tuffs intermédiaires (unité 3, environ 30% de la halde sud) par les forages BH-1, BH-4, BH-5, BH-6; et les volcanoclastites felsiques (unité 4A, 15% de la halde sud) par BH-2 and BH-3. Le forage BH-7, qui a été foré une année avant les autres afin de recueillir des échantillons pour des analyses minéralogiques, recoupait les trois unités lithologiques. Au même moment, les trois zones identifiées (Rapport GREGI 91-19, p. iv) étaient bien représentées.

Les forages BH-1, BH-2 et BH-3 ont été localisés dans le cours original des ruisseaux de surface sous la halde sud se drainant vers le nord-ouest; BH-5 dans le cours original des ruisseaux de surface, sous la halde sud se drainant vers l'est; BH-4 sur la limite de partage des deux sous-bassins versants; et BH-6 et BH-7 sur un plateau de la topographie originale plutôt vers le sud. Ce patron d'auscultation permet de faire un suivi de l'évolution de la qualité de l'eau souterraine lors de son passage à travers la couche originale de sol et les formations rocheuses, ce qui facilite l'évaluation de la migration des contaminants dans l'eau souterraine.

Tous les sept forages ont traversé l'épaisseur entière de la halde sud et plus profondément dans le sol de surface et dans la partie supérieure du massif rocheux. Cette pratique permet de surveiller séparément l'évolution du gradient hydraulique de l'eau souterraine dans le sol de surface (nappe libre) et le massif rocheux (nappe confinée). La variation de la qualité de l'eau peut être quantifiée à mesure qu'elle percole dans la halde, le sol de surface et le massif rocheux. Somme toute, les forages d'auscultation fournissent des indications du patron de migration des contaminants dans les directions horizontale et verticale.

L'utilisation d'échantillons composites de rognures de forage selon un intervalle de 1,5 m est acceptable, équilibrant le besoin d'identifier les variations spatiales verticales et réduisant les coûts d'échantillonnage et d'analyse.

### **Tranchées**

Afin d'échantillonner les différentes unités lithologiques qu'elles contenaient, les cinq tranchées de surface ont été réparties à proximité du sommet de la halde sud (Rapport GREGI 1994-12, p. 2.1; et Rapport GREGI 91-19, Annexe A, p. 5): T1, T2, et T4 ont été localisées dans des zones à prédominance de schiste à séricite; T3 a été localisée dans un empilement de minerais de très faibles teneurs (volcanoclastites felsiques); et T5 était dans une "roche verte" non-réactive. Des échantillons ont été prélevés selon la stratigraphie afin de produire des évidences minéralogiques de l'altération dans les cinq premiers mètres de la halde. L'excavation a été réalisée à l'aide d'une rétrocaveuse hydraulique.

La localisation des cinq tranchées semble adéquate; l'excavation, l'échantillonnage et la description lithologique des tranchées apparaissent appropriés.

### **Fosse**

Deux larges fosses (T92-1 et T92-2) ont été excavées dans deux unités lithologiques (volcanoclastites felsiques et schiste à séricite respectivement) afin d'échantillonner les matériaux et d'installer des lysimètres (Rapport GREGI 1994-12, p. 2.1 and p. 2.4). Les matériaux ont été utilisés pour des analyses granulométriques, des études minéralogiques et la détermination de la teneur en eau. Les descriptions détaillées de l'échantillonnage, de la préservation des échantillons et de la manipulation des échantillons n'étaient pas fournies dans les rapports. Les réviseurs assument que toutes les procédures établies ont été suivies et que les échantillons de matériaux obtenus sont de qualité acceptable.

### **5.2.3 Qualité des données**

#### **Observation et description lithologique**

Les observations de la couleur, de la stratigraphie, de la texture, des précipités secondaires, de l'altération, des unités lithologiques, de la minéralogie, de la granulométrie, etc., dans les tranchées et les forages BH-1 à BH-6

sont bien documentées en fonction de la profondeur et sont présentées en détail dans le Rapport GREGI 91-19, Annexe A, pp. 22-30 et pp. 36-51, respectivement. Les installations de puits dans les forages BH-1 à BH-6 sont clairement illustrées graphiquement dans le même rapport, pp.15-20. La stratigraphie des cinq tranchées est décrite graphiquement aux pages 31-35 (même rapport) et celle des forages BH-1 à BH-6 à la figure 2.3 (p.93) du rapport GREGI 91-19. Ces descriptions sont considérées par les réviseurs comme étant de haute qualité et suffisamment détaillées pour le but de cette étude.

### **pH de la pâte (*Paste pH*)**

Le pH de la pâte a été obtenu en mélangeant une partie de solide avec 2,5 parties d'eau (en volume) et en mesurant par la suite le pH du mélange à l'aide d'une électrode de verre (voir la description du Rapport GREGI 91-19, Annexe A, p. 6). Les résultats sont présentés dans le Rapport GREGI 91-19, Annexe A, pp. 52-56 et illustrés graphiquement aux figures 2.5 et 2.6 (p. 95-96) du Rapport GREGI 91-19.

La mesure du pH de la pâte est une procédure relativement simple, elle n'est pas enclin à créer des erreurs lorsqu'elle est appliquée correctement. Les profils de pH de la pâte correspondent bien avec les observations sur l'altération et ce qui était anticipé de l'information lithologique. De plus, lorsque l'on compare les pH de la pâte avec les pH des lixiviats provenant des mêmes échantillons (Rapport GREGI 93-05, Annexe D-1, pp. 53-59), on note que la grande majorité des pH de lixiviats se comparent aux pH de la pâte selon une marge d'erreur d'approximativement 0,2 unité de pH (ceci n'est pas noté dans le rapport). Il y a quelques exceptions, notamment pour les échantillons provenant du forage BH-1, échantillon 1 à 3 et 11, où les premiers pH de pâte sont beaucoup plus élevés que les derniers pH de lixiviats. Ces différences peuvent s'expliquer par l'oxydation de la pyrite pendant l'entreposage et la manipulation.

Bien que les descriptions du contrôle de qualité sur le terrain pour les mesures de pH de la pâte sont manquantes dans les rapports, cette dernière explication laisse entendre que les données de pH de la pâte sont fiables.

### **Séparation granulométrique (*Particle Size Segregation*)**

L'étude de la Mine Doyon comprenait la séparation granulométrique de quatre échantillons en vrac prélevés sur le terrain (Rapport GREGI 1994-12, p. 2.6). Ceci incluait la cueillette d'un "gros" échantillon des larges fosses (le rapport n'a pas spécifié comment "gros" étaient les échantillons en vrac), retirer les cailloux (*boulder*) plus gros que 0,5 m, tamiser le reste de l'échantillon à l'aide d'un tamis de 70 mm, peser les parties retenues et passantes et retirer un sous-échantillon de la partie passante pour une analyse de distribution granulométrique conventionnelle ultérieure au laboratoire.

La distribution granulométrique est un facteur critique lorsque l'on veut mettre à l'échelle un large empilement de roches stériles à partir des résultats d'essais de laboratoire, encore que sa détermination pour la roche stérile



est extrêmement difficile pour deux raisons: l'hétérogénéité de l'empilement de roches stériles et le besoin d'une grande quantité de matériel pour obtenir un échantillon représentatif.

L'hétérogénéité de l'empilement de roches stériles provient de la ségrégation de la grosseur des roches stériles lors de la construction de la halde, de la variation de la distribution granulométrique du matériel original transporter à la halde (causée par la variation de l'efficacité du sautage et de la compétence de la roche), des degrés variables de désintégration physique et chimique post-déposition (tels l'altération par la circulation des camions et l'oxydation), et ainsi de suite. Suivant la méthode de construction de la halde, une halde typique contient habituellement du matériel grossier dans la partie inférieure, du matériel plus fin dans la partie supérieure et du matériel très fin à la surface. Ainsi, si un échantillon en vrac est prélevé de la surface d'un empilement de roches stériles, il est plausible qu'il soit plus fin que la moyenne de l'ensemble de l'empilement. Outre la variation granulométrique verticale, il y a une variation latérale qui est habituellement fonction de la lithologie de la roche stérile: vraisemblablement, la roche la plus fragile sera fracturée plus finement lors d'un sautage et plus tard sera plus facilement brisée par désintégration physique. Similairement, la roche stérile chimiquement réactive est sujette à la désintégration par altération chimique. Conséquemment, il est justifié de réaliser séparément des analyses granulométriques pour différentes unités lithologiques.

La masse minimale d'un échantillon représentatif dépend du matériau à échantillonner. À titre d'exemple, la masse minimale d'un échantillon représentatif pour un matériel dont les particules les plus grossières sont de 0,5 m, est d'environ 10 tonnes et de 75 tonnes pour un matériau dont les particules les plus grossières sont de 1 m (Cummins *et al.*, 1973, p. 27-16). Visiblement, il est difficile d'isoler d'aussi grandes quantités de roches stériles sur le terrain.

Afin d'obtenir un estimé de la distribution granulométrique avec une exactitude raisonnable dans une halde de stériles, le chercheur devrait idéalement suivre les étapes suivantes: (1) excaver un échantillon en vrac sur l'épaisseur d'une couche; (2) enlever les grosses roches (> 0,25 m) et prendre un échantillon suffisamment gros pour être représentatif de la dimension maximale (pour une dimension maximale de 0,25 m, l'échantillon devrait être plus grand que 2,5 tonnes) et réaliser des analyses par tamisage; (3) estimer le pourcentage de roches stériles plus grandes que la dimension de coupure dans l'empilement (0,25 m); et (4) réaliser des analyses granulométriques pour chaque unité lithologique en se référant aux étapes (1) à (3). Cependant, un tel exercice est nettement très coûteux et rarement justifié en termes de coûts.

La séparation granulométrique effectuée à la Mine Doyon a suivi seulement l'étape précédente (2); il est douteux qu'un échantillon suffisant (10 tonnes) ait été prélevé pour la dimension de coupure utilisée (0,5 m). La figure 2.3 dans le Rapport GREGI 1994-12 montre que le matériel plus profond (1 m) est plus grossier que le matériel moins profond (surface) et que le schiste à séricite présente une différente distribution granulométrique que les volcanoclastites felsiques. Si la distribution des dimensions moyennes est utilisée pour représenter la halde de stériles, elle surestimera vraisemblablement la quantité de fractions fines. L'étude indique correctement que la fraction fine représente la majorité de la surface de contact dans la halde. Cependant, parce qu'aucun estimé de la fraction > 0,5 m n'a été donné, il est impossible d'estimer la quantité

absolue de la fraction fine dans la halde, par conséquent, toute propriété dépendante de l'aire de la surface totale de contact (*total surface area*) dans la halde de stériles ne peut être quantifiée. Les distributions granulométriques déterminées dans cette étude doivent, par conséquent, être traitées comme premières estimations pour l'ensemble de la halde.

#### 5.2.4 Résumé

L'échantillonnage des solides sur le terrain a été réalisé par forage à air sec et par excavation de tranchées et de fosses de surface. La méthode de forage employée respecte les règles de l'art pour l'échantillonnage des haldes de stériles et les méthodes de creusage des tranchées et des fosses reflètent les standards de l'industrie. La localisation des forages, des tranchées et des fosses sont adéquatement sélectionnées et l'échantillonnage ainsi que les intervalles des échantillons composites sont en accord avec les pratiques courantes.

L'observation et la description des échantillons de forages, de tranchées et de fosses sont adéquates, les résultats sont bien documentés et les représentations graphiques sont claires. Les données de pH de la pâte apparaissent dignes de confiance. Cependant, les distributions granulométriques déterminées ne sont pas réellement représentatives de l'ensemble de l'empilement de roches stériles et ainsi elles devraient être considérées comme des premières estimations. Le pourcentage de la fraction granulométrique plus grand que 0,5 m n'est pas quantifié, faisant en sorte qu'il est impossible de déterminer l'aire de la surface totale du matériel dans l'empilement de roches stériles.

## **5.3 Caractérisation des solides - Travaux de laboratoire**

### **5.3.1 Travaux réalisés**

La liste des propriétés géochimiques, minéralogiques et mécaniques des solides caractérisés dans cette étude est impressionnante.

- Minéralogie qualitative par diffraction aux rayons-X (DRX), utilisant des poudres en montages conventionnels et des montages orientés innovateurs sur les 23 échantillons (20 roches stériles, 2 sols de surface, et 1 échantillon de la roche-mère) provenant du forage BH-7, 9 échantillons de roches stériles de la fosse T91-1 prélevés selon des intervalles égaux de 0,5 m de la surface jusqu'à une profondeur de 4,0 m, et 9 échantillons de roches stériles provenant de la fosse T92-2 aussi prélevés selon des intervalles égaux de 0,5 m de la surface jusqu'à une profondeur de 4,0 m, ainsi que la minéralogie qualitative par DRX, uniquement avec des montages de poudres conventionnels de 106 (presque tous) échantillons des forages BH-1 à BH-6;
- *SEM (Secondary Electron Microscopy)* avec *EDX (Energy Dispersive Analysis)* d'une sélection d'échantillons provenant des larges fosses et du forage BH-7;
- Lessivage par de l'eau distillée suivi par l'analyse chimique du lixiviat de presque tous les échantillons de rognures de forage des trous BH-1 à BH-7;
- Analyses chimiques de l'eau interstitielle extraite de 9 échantillons de roches stériles de la fosse T91-1 prélevés selon des intervalles égaux de 0,5 m de la surface jusqu'à une profondeur de 4,0 m et 9 échantillons de roches stériles provenant de la fosse T92-2 aussi prélevés selon des intervalles égaux de 0,5 m de la surface jusqu'à une profondeur de 4,0 m;
- Analyses chimiques globales des trois types de roches contenus dans la halde sud: 45 échantillons de schistes à séricite (unité 4B), 43 échantillons de volcanoclastites felsiques (unité 4A), et 15 échantillons de tuffs intermédiaires (unité 3) (noter que ce travail n'a pas été effectué pour l'étude du NEDEM mais plutôt par Savoie et *al.* (1991) dans une étude séparée. Elle est citée ici parce que les résultats ont été utilisés dans cette étude pour l'interprétation de données);
- Une forme de BAB (bilan acide-base) calculé en utilisant les analyses de sulfures et les analyses de carbonates des trois types de roches contenus dans la halde sud: 45 échantillons de schistes à séricite (unité 4B), 43 échantillons de volcanoclastites felsiques (unité 4A), et 15 échantillons de tuffs intermédiaires (unité 3) (noter que ce travail n'a pas été effectué pour l'étude du NEDEM mais plutôt par Savoie et *al.* (1991) dans une étude séparée. Elle est citée ici parce que les résultats ont été utilisés dans cette étude pour l'interprétation de données);
- Essais au peroxyde d'hydrogène en utilisant certaines fractions granulométriques des trois types de roches sélectionnés des échantillons de tranchées de la halde sud dans une tentative de déterminer l'aire de la surface spécifique (*specific surface area*) des sulfures réactifs;

- Analyses d'images utilisant certaines fractions granulométriques des trois types de roches sélectionnés des échantillons de tranchées de la halde sud pour déterminer l'aire de la surface spécifique (*specific surface area*) des sulfures;
- Des essais d'abrasion Los Angeles, des essais d'attrition Micro Deval et la célérométrie acoustique en utilisant une sélection d'échantillons représentant les trois unités lithologiques.

### 5.3.2 Méthodologie

#### DRX

Les techniques minéralogiques communes pour les mélanges de minéraux, tels que les roches stériles incluent la microscopie en lumière transmise et réfléchi et la diffraction aux rayons-X (DRX). Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. La microscopie optique est normalement employée afin de produire de l'information qualitative mais elle peut fournir des mesures minéralogiques semi-quantitative sur la base d'estimations visuelles. Si cela est couplé avec l'analyse d'image, l'exactitude de la détermination du contenu minéralogique s'améliore de beaucoup. La DRX peut être utilisée qualitativement pour identifier les minéraux présents dans un échantillon ou quantitativement pour des échantillons préparés afin de produire les quantités exactes des minéraux. Les patrons DRX ne sont pas faciles à interpréter, spécialement pour les minéraux mineurs (qui sont souvent les minéraux d'intérêt) quand des interférences existent entre différents minéraux.

Les réviseurs considèrent que la DRX est un choix approprié pour les examens minéralogiques dans cette étude, bien que les aspects quantitatifs peuvent être potentiellement améliorés par l'introduction d'information chimique lors de l'interprétation des données DRX. Les chercheurs ont déclaré que "*à cause des multiples variables impliquées et l'impossibilité de préparer des mélanges standards adéquats (avec les mêmes caractéristiques minéralogiques, physiques et chimiques), de l'information quantitative digne de confiance n'a pu être obtenue par DRX*" (Rapport GREGI 1994-06, p. 12.). Alors que cette assertion est vraie, connaissant la minéralogie semi-quantitative, les chercheurs auraient peut être pu mener des analyses chimiques (analyses globales de roches, CO<sub>2</sub>, S, analyses d'éléments mineurs et traces) des mêmes échantillons de roches et calculer la minéralogie semi-quantitative des échantillons (SENES, 1995). Si cela avait été réussi, l'information quantitative aurait rehaussé les interprétations des transformations minéralogiques.

Cette étude a utilisé deux méthodes différentes de préparation pour les analyses *XRD*: montages en poudre et montages orientés (Rapport GREGI 1994-06, pp. 11-18). Dans les montages orientés, les échantillons sont soit montés à l'état naturel ou dans la glycérine, ce dernier pour gonfler les minéraux expansifs comme la smectite. Les chercheurs rapportent que "*les résultats des analyses de montages orientés ont révélé quelques nouvelles données non-détectées par la méthode de la poudre (powder method).*" (p. 15). Les montages orientés (à l'état naturel et dans la glycérine) ont contribué à la détection de minéraux expansifs; ils ont aussi fourni une preuve de la cristallisation épitaxiale de jarosite dans la muscovite.

Les chercheurs ont déterminé les profils minéralogiques verticaux et utilisé cette information en combinaison avec d'autres informations afin de déduire, sur une base verticale, la dynamique des interactions géochimiques et minéralogiques. Ceci est une approche exemplaire qui convient spécialement à ce genre de recherche. L'utilisation de montages orientés pour étudier l'altération minéralogique dans un environnement de roches stériles est, à notre connaissance, nouvelle et innovatrice et a certainement généré des informations nouvelles (*insightful*) sur les mécanismes d'altération et le cheminement des minéraux silicatés.

### **SEM avec EDX**

L'utilisation de ces techniques électroniques d'analyse de surface est efficace et a produit de l'information utile sur les minéraux d'altération et de précipitations secondaires. Ceci particulièrement illustré lors de la démonstration des changements de composition au cours de la transformation des minéraux silicatés.

Ces techniques sont essentiellement des outils de recherche. Leur utilisation lors de la surveillance routinière des mines est peu probable.

### **Lixiviation des rognures de forage**

La technique simple de lixiviation utilisée dans cette étude (décrite dans le Rapport GREGI 93-05, pp. 2-3 et dans le Rapport GREGI 1994-12, p. 5.21) est une méthode efficace pour obtenir des données sur l'acidité accumulée (*stored acidity*) dans la halde de stériles (SENES, 1995). Les chercheurs ont noté que "... le séchage rapide de petites quantités de lixiviat produit des cristaux solides et un gel amorphe.... Par l'addition d'eau distillée, plus de 95% du lixiviat séché est retourné en solution." (Rapport GREGI 1994-12, p. 2.7). La dissolution rapide et réversible de ces précipités est une garantie que l'acidité, déposée par séchage à l'air sur les rognures de forage, sera remise en solution.

Le lixiviat doit être distingué de l'eau interstitielle présente dans l'empilement de roches stériles; l'eau interstitielle ne contient seulement qu'une partie de l'acidité totale emmagasinée dans l'empilement de stériles puisqu'une quantité d'acidité existe sous une forme solide, alors que le lixiviat extrait contient la presque totalité de l'acidité emmagasinée. L'eau interstitielle est vraisemblablement tellement concentrée que les concentrations de plusieurs de ses différents constituants dissous sont limitées par des contraintes de solubilité, tandis que la solution lixiviée est probablement suffisamment diluée pour que la plupart des minéraux secondaires soient sous-saturés (référence au tableau 5.10, Rapport GREGI 1994-12, p. 5.20 pour une comparaison entre les deux). Conséquemment, le lixiviat ne peut se substituer à l'eau interstitielle pour, par exemple, fournir des indices de la saturation en minéraux secondaires.

Deux aspects de la technique de lixiviation utilisée dans cette étude pourraient introduire un biais dans les données sur l'acidité emmagasinée. Premièrement, les nouvelles surfaces de cassure produites par le forage exposent des sulfures frais ainsi que des minéraux consommateurs d'acide frais, ce qui pourrait contribuer en acidité ou alcalinité pendant l'entreposage ou la lixiviation, modifiant alors les quantités originales d'acidité

emmagasinée. Deuxièmement, l'étude utilise la fraction -2 mm des rognures de forage pour la lixiviation mais étend les résultats à l'ensemble de l'empilement sur la base de la masse. La validité de cette approche est discutable. Nous commenterons sur ce sujet plus loin dans la section sur l'interprétation des données.

### **Analyse de l'eau interstitielle**

L'eau interstitielle a été en contact avec la roche stérile pour une période de temps relativement longue, s'approchant des conditions d'équilibre. Les profils chimiques de l'eau interstitielle peuvent fournir de l'information intéressante sur la génération d'acide, la neutralisation de l'acide et les transformations minéralogiques. Dans cette étude, l'eau interstitielle a été extraite sur le terrain en utilisant un appareil à pression opéré manuellement, accomplissant la séparation solide-liquide aussitôt que l'échantillon était extrait. Les réviseurs considèrent la collecte et l'analyse de l'eau interstitielle dans cette étude comme une opération réussie.

### **Analyse globale de roches (Whole Rock Analysis)**

L'analyse globale de roches est une procédure établie depuis longtemps pour représenter la composition d'un échantillon de roche. Lorsqu'utilisée de concert avec de l'information minéralogique, elle peut aider à fournir une valeur quantitative à la composition minéralogique d'un échantillon de roche. Quand les analyses globales de roches sont faites avant et après l'altération, les changements chimiques et minéralogiques qui ont eu lieu peuvent être déchiffrés.

Cette étude n'a pas utilisé cet approche chimique de façon approfondie. La seule analyse globale de roches présentée dans les rapports est celle du Rapport GREGI 1994-06, p. 133 sur la composition des trois unités rocheuses, laquelle est extraite d'une étude séparée (Savoie et *al.*, 1991).

## **BAB**

Les données de bilan acide-base (BAB) présentées dans cette étude ont été prises dans un autre rapport (Savoie et *al.*, 1991). Le potentiel d'acidité maximum (PAM; *maximum potential acidity*) est calculé à partir du contenu moyen en soufre, en accord avec les pratiques courantes. Une moyenne pondérée globale est ensuite calculée pour la halde sud selon les proportions de chaque type de roche. Un tel PAM (ou contenu en soufre) est adéquat pour le calcul de génération d'acide.

L'utilisation du contenu en carbonates pour calculer le potentiel de neutralisation est discutable. Comme l'étude l'a démontré, l'empilement de roches stériles contient très peu de minéraux carbonatés, ce qui explique l'acidification rapide très peu de temps après le dépôt de la roche stérile. L'étude a aussi mis en évidence l'importance dans la neutralisation d'acide des silicates telles la chlorite et la muscovite. Considérant que le potentiel de neutralisation des silicates est exclus, le potentiel de neutralisation (PN, calculé du contenu en

carbonate) et par le fait même le potentiel net de neutralisation (PNN) (Rapport GREGI 1994-06, p. 132, annexe D et Rapport GREGI 1994-12, p. 1.9, tableau 1.1) sont sous-estimés.

La sous-estimation du PN et PNN n'a pas causé d'interprétation erronée ultérieurement, puisqu'ils ne sont pas utilisés lors de l'interprétation. La durée résiduelle de la génération d'acide est calculée uniquement du bilan du soufre (*sulphur balance*).

### **L'essai au peroxyde d'hydrogène**

L'essai au peroxyde d'hydrogène utilisé dans cette étude pour évaluer l'aire de la surface des sulfures réactifs, tel que mise en évidence par SENES (1995), est similaire à de nombreuses versions d'essais utilisant le peroxyde d'hydrogène pour oxyder les sulfures afin d'estimer plusieurs paramètres reliés au contenu en sulfures, à la réactivité des sulfures, le bilan acides-bases, etc., incluant l'estimation Sobek des sulfures totaux par oxydation au peroxyde (Sobek et al., 1978, pp. 69-72), l'essai au peroxyde d'hydrogène (Coastech Research, 1989), l'essai de production nette d'acide (PNA) (Coastech Research, 1991), et l'essai de génération nette d'acide (GNA) (Finkelman et al., 1986, pp. 521-534; Oshay et al., 1984, pp. 13-14).

De façon générale, les essais à base de peroxyde n'ont seulement eu qu'un succès limité dans des applications spécifiques sous des circonstances spécifiques. Il est maintenant accepté qu'un tel succès dépend des propriétés minéralogiques du matériel à l'essai et des objectifs des essais. Comme moyen de déterminer le contenu en sulfures, la réactivité des sulfures et l'acidité nette, les essais au peroxyde ont été critiqués et n'ont pas été appliqués largement.

L'étude de la Mine Doyon tente d'utiliser les essais au peroxyde d'hydrogène pour déterminer l'aire de la surface spécifique réactive des sulfures en comparant les profils pH-temps et température-temps des échantillons avec ceux d'un matériel standard (Rapport GREGI 94-04, pp. 19-21 and Rapport GREGI 1994-12, pp. 3.7-3.8). Comme les détails permettant d'obtenir le pourcentage de l'aire de la surface réactive de la pyrite à partir des comparaisons de profils ne sont pas explicités, il est impossible d'évaluer la validité et l'exactitude des valeurs du tableau 4 au Rapport GREGI 94-04.

Les chercheurs concluaient que les essais au peroxyde d'hydrogène n'ont pas réussi à déterminer l'aire de la surface réactive de la pyrite des quatre types de roches à cause des différences dans la dimension des grains et dans l'aire de la surface spécifique entre les échantillons et le standard, et recommandaient des essais additionnels sous des conditions variées. L'opinion des réviseurs est que, à moins que les chercheurs soient capables de préparer un standard possédant toutes les caractéristiques (incluant la distribution granulométrique, la composition minéralogique, la réactivité des sulfures et des minéraux consommateurs d'acide, etc.) sauf une aire de surface réactive spécifique de pyrite identique aux échantillons, l'essai au peroxyde d'hydrogène ne réussira vraisemblablement pas à déterminer les aires de surfaces réactives spécifiques des échantillons.

### **Analyse d'images**

Dans cette étude, l'analyse d'images sur des photographies MES a été utilisée pour "*mesurer l'aire de surface typique de grains de pyrite dans différents types de roches et comparer les dimensions*" (Rapport GREGI 1994-12, p. 3.8 et Rapport GREGI 94-04, p. 21). L'objectif fixé a certainement été atteint. Les grains de pyrite sont relativement faciles à identifier sur une image MES et les analyses d'images assistées par ordinateur sont assez exactes pour la détermination du pourcentage de surface occupée par les grains de pyrite.

Considérant que l'analyse d'image est basée sur des sections polies, pour atteindre une représentativité acceptable du type de roche à l'étude, suffisamment d'échantillons doivent être utilisés pour faire la moyenne des variations d'un spécimen à l'autre à l'intérieur de ce type de roche et une étendue suffisante doit être analysée pour faire la moyenne des variations d'une image à l'autre à l'intérieur d'un même spécimen. Du tableau 5 (Rapport GREGI 94-04), le nombre d'images utilisées (trois) apparaît adéquat pour les tuffs mafiques, les volcanoclastites et la roche intrusive, considérant que les variations d'une image à l'autre sont faibles alors que plus de trois images aurait dû être employées pour trouver la moyenne du schiste à séricite à cause d'une grande variation d'une image à l'autre (5.5% à 34%). Puisque seulement un spécimen a été utilisé pour chaque type de roche, le degré auquel les moyennes présentées au tableau 5 sont représentatives de leur type de roche respectif est sujet à débat. Nous comprenons que le but des analyses d'image était d'obtenir de l'information "typique" plutôt que "représentative" sur l'aire de la surface de la pyrite de différents types de roches. Ainsi, malgré la représentativité discutable, nous considérons l'analyse d'image comme une application réussie.

Une attention devrait être portée au fait que le pourcentage de l'aire de la pyrite déterminée par analyse d'image est physique plutôt qu'une aire de surface réactive. La détermination est faite sur des sections fraîchement polies, non sur les surfaces rugueuses et irrégulières des roches stériles dans leur état naturel. Néanmoins, l'information engendrée par l'analyse d'images est utile. À titre d'exemple, le pourcentage représentatif de l'aire de la surface de pyrite dans un type de roche donné obtenu par analyse d'images peut être appliqué à l'aire totale de ce type de roche pour calculer l'aire totale de pyrite de ce type de roches à l'intérieur d'un empilement de roches stériles.

### **Essais mécaniques**

Cette étude a tenté de relier les résultats de plusieurs essais portant sur "l'altérabilité" (et par conséquent son effet sur le taux de génération d'acide) de différents types de roches stériles. Nous considérons que cette tentative est un exercice utile et une première étape importante vers l'introduction de propriétés mécaniques des roches stériles dans l'équation de prédiction du DMA.

Les trois essais standards (Abrasion Los Angeles, attrition Micro-Deval et désintégration par des sulfates de magnésium) sont bien connus et chaque essai fournit une mesure du pourcentage de masse perdue en particules fines. Les trois essais sont réalisés sur une dimension de particules, sous-ensemble d'échantillons plus grands; par conséquent les résultats pourraient être difficiles à relier aux conditions de terrain. Il semble que les essais



d'abrasion et d'attrition soient en quelque sorte agressifs et pourraient vraisemblablement surestimer la production naturelle de particules fines à l'intérieur d'une halde de stériles statique, bien qu'un estimé de la limite supérieure soit utile pour estimer l'effet potentiel maximum de l'altération sur la production de DMA. L'essai au sulfate de magnésium est particulièrement intéressant et semble être l'essai le plus adéquat pour étudier les conditions d'altération dans un amas pour les raisons suivantes (SENES, 1995):

- il simule les cycles humide/sec que l'on retrouve à l'intérieur de l'amas;
- il simule la pression de la cristallisation exercée par l'action du gel (formation de glace) et par la précipitation de minéraux secondaires (gypse et jarosite) entre les couches de phyllosilicates, tel que démontré par cette étude (Rapport GREGI 1994-06);
- il attaque les plans de faiblesses et les microfractures existantes comme l'altération naturelle le ferait, c.-à-d. que l'essai est dépendant de la lithologie;
- il utilise le sulfate de magnésium comme agent d'attaque, en parallèle aux conditions du site là où la qualité de l'écoulement (*seepage quality*) a montré que la chimie du magnésium et des sulfates était particulièrement appropriée.

Il semble logique que cet essai en particulier aurait pu être approfondi avec plus de vigueur. Cependant, les chercheurs ont choisi de concentrer leur attention sur les résultats de l'essai d'abrasion Los Angeles sans justification (SENES, 1995).

La célérométrie acoustique a été utilisée pour caractériser des propriétés similaires à celles données par les trois essais standards. Cet essai a l'avantage d'être non-destructif, rapide, peu coûteux et à même de fournir de l'information sur l'anisotropie. Cet essai a le désavantage de ne pas quantifier la production de particules fines. Les données présentées au tableau 3 du Rapport GREGI 94-04 suggèrent que cet essai fournit une comparaison qualitative de la résistance et de l'anisotropie de différents types de roches: cependant, il n'est pas clair comment les mesures de la vitesse des ondes de compression et de cisaillement peuvent être utilisées pour prédire la croissance de l'aire d'une surface spécifique résultante de l'altération, sauf si cette méthode est calibrée par quelqu'autre méthode fiable de mesure de telles propriétés. Selon l'opinion des réviseurs, cet essai potentiellement approprié comme outil de dépistage afin de sélectionner des matériaux pour des essais standards d'altération et peut-être aussi pour classer les roches stériles selon leur susceptibilité à l'altération.

Les quatre essais ont tous produit un classement similaire des quatre types de roches stériles en terme de résistance mécanique et par conséquent permettant d'en déduire la résistance à l'altération. L'application ultérieure à des fins quantitatives, de n'importe laquelle de ces méthodes nécessite de la recherche additionnelle afin de corrélérer les résultats d'essais à d'autres essais sur l'altération et aux observations de terrain sur une grande variété de types de roches. Les futurs chercheurs devraient porter une attention particulière à l'essai au sulfate de magnésium et à la célérométrie acoustique.

### 5.3.3 Qualité des données

#### XRD et SEM-EDX

La qualité des données *XRD* dépend de plusieurs facteurs: représentativité des échantillons utilisés dans la fabrication du spécimen, la qualité de la préparation du spécimen, la résolution de l'angle d'incidence, la condition de l'équipement et l'aptitude de l'ordinateur ou de l'être humain à interpréter le diffractogramme. Aucune de ces conditions expérimentales n'a été présentée dans le rapport et pour cette raison, il est impossible de porter un jugement. Néanmoins, puisque que la *XRD* est une technique analytique mature, que le groupe de recherche est expérimenté et puisque les données de *XRD* sont cohérentes avec d'autres données expérimentales, nous déduisons que les données de *XRD* sont dignes de confiance.

Comme pour la *XRD*, les conditions expérimentales telles la sélection d'échantillons, la préparation de spécimen, l'opération des équipements et le traitement des données des études par la *SEM-EDX*, n'ont pas été discutées dans les rapports; il est difficile d'évaluer avec certitude la qualité des données générées. Le fait que premièrement, la *SEM-EDX* soit une technique analytique de surface mature, deuxièmement, que la *SEM-EDX* produise des données en accord avec les données la *XRD* (précipitation épitaxiale de jarosite entre les plans des minéraux dans la muscovite altérée et présence de minéraux expansibles) et troisièmement, que les observations de *SEM-EDX* révèlent des évidences d'altération des minéraux conséquents avec les données chimiques (pertes de K et Al par, gain de Mg par, la muscovite en altération); tout suggère que les *SEM-EDX* sont crédibles.

La *XRD* et la *SEM-EDX* ont été employées dans cette étude pour générer des informations caractéristiques en utilisant des échantillons de roches caractéristiques et les données recueillies devraient être considérées comme telles. L'étude n'a pas tenté de générer des données représentatives en utilisant des échantillons représentatifs, ce qui requière des échantillons de roches plus strictement contrôlés pour la préparation des spécimens et plus d'observations expérimentales de chaque spécimen afin de faire la moyenne des erreurs d'échantillonnage et des variations d'une mesure à l'autre. Comme résultat, il est alors impossible d'évaluer quantitativement, sur la base exclusive des données *XRD* et *SEM-EDX*, quelle est l'étendue des phénomènes observés dans l'empilement de roches stériles.

#### Lixiviation des rognures de forage et analyse de l'eau interstitielle

Les réviseurs considèrent que les échantillons de rognures de forage ont une représentativité adéquate, en nombre et en localisation, de l'ensemble de la halde et des trois principaux types de roches contenus dans la halde. Les échantillons d'eau interstitielle sont des cas caractéristiques et appropriés des deux types de roches examinés.

Les mesures d'assurance de la qualité et de contrôle de la qualité (c.-à-d. témoin de terrain et de laboratoire, duplicata, standards de laboratoire, doubles de contre-vérification, etc.) ne sont pas décrites dans les rapports. Nous présumons que des procédures adéquates *QA/QC* (Quality Assurance/Quality Control) et *GLP* (*Good Laboratory Practice*) ont été suivies pour garantir la qualité des données des analyses chimiques.

### **Analyse globale de roches et détermination des acides-bases**

Ces données chimiques sont extraites de l'étude de Savoie et *al.* (voir note de bas de page 2) et leur qualité ne peut être évaluée.

### **Essai au peroxyde d'hydrogène**

L'essai était une évaluation préliminaire de sa capacité à caractériser l'aire de la surface de la pyrite réactive; les chercheurs ont conclu que ce test n'était pas réussi.

### **Analyse d'image**

Comme il a été expliqué dans la section précédente (méthodologie), cette analyse a été employée pour produire des informations caractéristiques plutôt que représentatives. Par rapport à cet objectif, nous considérons que les données générées sont dignes de confiance, puisque les techniques de *SEM* et d'analyse d'image sont exactes et solides. Il aurait été préférable de regarder plus d'images pour les spécimens exhibant une large variation.

### **Essais mécaniques**

Aucune description *QA/QC* n'a été fournie dans les rapports, par conséquent il est impossible d'évaluer la qualité des résultats des essais mécaniques. Le fait que les résultats des essais mécaniques donnent un classement similaire de résistance aux quatre types de roche examinés suggère l'acceptation générale des résultats d'essais, encore que cela ne dise rien sur l'exactitude et la répétition (précision) des données. Les données fournies à l'annexe B.3 du Rapport GREGI 94-04 portent à confusion. Elles sont mal sous-titrées et peu expliquées dans le texte principal.

## **5.3.4 Résumé**

Cette étude a permis de déterminer un nombre impressionnant de caractéristiques des solides. Les techniques utilisées incluent des instruments d'analyses de surfaces (*XRD*, *SEM-EDX*), des analyses chimiques de l'eau associée aux solides (lixiviats et eau interstitielle extraite des solides), des analyses chimiques des solides (analyses globales de roches et détermination acides-bases) ainsi que des techniques de détermination de l'aire de surface (essai au peroxyde d'hydrogène et analyse d'images) et des essais physico-chimiques de résistance à l'altération (abrasion Los Angeles, attrition Micro Deval, désintégration au  $MgSO_4$ , célérométrie acoustique).

Nous considérons que l'analyse des lixiviats de rognures de forage, les analyses globales de roches et la détermination des acides-bases sont des moyens appropriés pour obtenir des données représentatives. Nous considérons l'utilisation de la *XRD*, *SEM-EDX* et les analyses chimiques de l'eau interstitielle comme des moyens adéquats pour rassembler des données caractéristiques sur différentes unités lithologiques. Nous considérons les essais au peroxyde d'hydrogène, l'analyse d'images et les essais mécaniques comme étant utiles et innovateurs, mais ce sont des tentatives préliminaires d'introduction de nouveaux paramètres quantitatifs de caractérisation des solides pour la prédiction du DMA.

Les méthodologies utilisées dans cette étude de caractérisation des solides sont généralement bien conçues et appliquées, quoique quelques embûches et subtilités doivent être considérées lors de l'interprétation des données recueillies. La caractérisation des solides pourrait être améliorée en couplant la *XRD* avec les analyses globales de roches et en utilisant la méthode de titration plutôt que l'analyse des carbonates lors de la détermination du PN et en accordant plus d'attention à l'essai au  $MgSO_4$ . Nous ne pensons pas que l'utilisation de l'essai au peroxyde d'hydrogène mérite d'être poursuivie comme méthode de détermination de l'aire de la surface des sulfures réactifs.

Les rapports présentent peu d'information sur le *QA/QC* connexe aux différents essais de caractérisation des solides, ce qui rend difficile l'évaluation de la qualité des données. Selon notre impression, la majorité des données présentées dans les rapports sont fiables pour l'objet de cette étude.

## **5.4 Chimie de l'eau-travaux de terrain**

### **5.4.1 Travaux réalisés**

Les travaux de terrain reliés à la chimie de l'eau incluaient:

- l'installation de six puits d'observation dans la halde sud et de sept puits d'observation autour de la halde sud;
- l'installation de douze lysimètres à gravité à deux endroits dans la halde;
- l'installation de trois déversoirs et de l'instrumentation permettant de surveiller le débit dans trois fossés collecteurs entourant la halde et installation d'une station météorologique sur le site;
- la cueillette d'échantillons d'eau souterraine dans les puits d'observation, de lixiviats provenant des lysimètres et d'échantillons de drainage provenant des fossés collecteurs, ainsi que des mesures de terrain associées à ces échantillons d'eau.

### **5.4.2 Méthodologie**

### **Installation de puits d'observation**

La localisation des six puits d'observation à l'intérieur de la halde est bien sélectionnée (voir les commentaires de la section 5.2.2 sur le forage). Les choix des sites pour les sept puits d'observation autour de la halde sont aussi adéquats, couvrant la superficie de la halde de stériles et fournissant de l'information sur les variations du bruit de fond de la qualité de l'eau souterraine en amont et sur l'évolution de la qualité de l'eau souterraine en aval.

Tous les puits d'observation sont installés de façon appropriée selon les standards de l'industrie. Les piézomètres sont terminés à la fois dans le sol de surface original et dans la roche-mère afin de surveiller le mouvement de l'eau souterraine dans les deux régimes et les changements de la qualité de l'eau à mesure que l'infiltration se poursuit en profondeur. Les puits sont scellés adéquatement entre les deux piézomètres et les détails des installations de puits sont bien documentés (Rapport GREGI 91-19, Annexe A, pp. 15-21).

### **Installation de lysimètres**

Douze lysimètres (demi barils en polyéthylène) ont été installés à deux endroits recoupant deux des trois principaux types de roches de la halde sud (Rapport GREGI 1994-12, p. 2.4). À chaque endroit, deux (duplicata) lysimètres ont été positionnés sous la surface à 2,0, 3,0 et 5,0 m de profondeur. Un piézomètre a été installé dans chaque lysimètre, lequel a été rempli avec du gravier stérile non-réactif de 2 cm. Les niveaux d'eau dans les piézomètres ont été calibrés de façon à permettre la lecture des volumes d'eau sans vider les barils. L'eau dans les lysimètres pouvait être échantillonnée ou vidée des piézomètres par une pompe actionnée de la surface. Les aménagements des lysimètres dans cette étude ont été bien conçus et peuvent fournir une référence valable pour des exercices similaires sur d'autres sites. La chimie de l'eau recueillie des lysimètres est, pour cette étude, une partie importante et irremplaçable de la série de données.

Il y a un inconvénient inévitable à l'installation de lysimètres par excavation-enfouissement; la roche stérile originale a été perturbée, changeant les patrons initiaux de déplacement de l'air et les chenaux d'infiltration, résultant en changements artificiels des propriétés hydrologiques et chimiques de la roche stérile et de l'eau d'infiltration. Quoique la roche stérile ait été remblayée soigneusement et que les chercheurs aient reconnu qu'un certain temps a été nécessaire pour qu'un nouvel équilibre du système soit atteint, personne ne sait réellement combien de temps cela prendra pour que les conditions précédant l'excavation soient rétablies dans la roche stérile remblayée (les chercheurs suggèrent une année) ou si cela est en effet possible. Néanmoins, il n'y a pas de meilleures alternatives aux aménagements à la Mine Doyon et elles représentent par conséquent "la meilleure technologie disponible".

### **Instrumentation de mesure du débit et station météorologique**

Les données sur le débit sont nécessaires pour le calcul des charges et par conséquent du bilan de masse (*mass balance*) des composés chimiques tels les sulfates et l'acidité. L'instrumentation originale comprenait un système automatique de surveillance de déversoirs branché à un enregistreur en continu sur charte de papier à diagramme (*chart recorder*). Les chercheurs ont découvert ultérieurement que les diagrammes enregistrés étaient virtuellement inutilisables parce que de fréquents bris dans l'alimentation énergétique empêchaient l'établissement d'une référence temporelle absolue. Depuis, un système d'acquisition de données (*data logger*) muni d'un circuit indépendant donnant une référence temporelle absolue a été installé, ce qui devrait être suffisant pour corriger le problème.

Une station météorologique a été installée à l'usine de traitement pour recueillir des données sur les précipitations, la température, l'humidité relative et la pression atmosphérique. Il aurait été préférable d'installer la station météorologique sur la halde sud. Pour l'interprétation hydrologique, les chercheurs ont utilisé les données de précipitation provenant des trois stations météorologiques régionales et non les données recueillies par la station météorologique de l'usine de traitement (Rapport GREGI 1994-05).

### **Cueillette des échantillons d'eau sur le terrain et mesures**

L'échantillonnage de l'eau a été accompli, suivant la source de l'échantillon, à l'aide d'échantillonneurs automatiques programmables, de cueillette manuelle, de pompes Wa-Terra et de pompes péristaltiques (Rapport GREGI 1994-12, p. 2.5 et Rapport GREGI 91-19, pp. 6-7). Sauf pendant la période de gel, des échantillons hebdomadaires ont été prélevés au déversoir des fossés collecteurs et de façon complémentaire des échantillons additionnels ont été recueillis au moment d'évènements spéciaux comme la fonte de la neige. La glace a été brisée afin de prendre des échantillons occasionnels durant la période de gel. Les puits d'observation et les lysimètres ont été échantillonnés de façon irrégulière. Lorsque nécessaire, les échantillons étaient filtrés et préservés sur le terrain. Lorsque cela était possible, les puits d'observation étaient purgés d'un volume d'eau de 4-8 fois le volume équivalent au niveau statique préalablement au prélèvement des échantillons de qualité de l'eau. Les échantillons d'eau ont été entreposés dans un endroit réfrigéré pour une courte période de temps avant d'être expédiés à différents laboratoires pour des analyses physiques et chimiques.

Les méthodes d'échantillonnage de l'eau et de manipulation et d'entreposage des échantillons utilisées dans le projet de la Mine Doyon sont compatibles avec les standards bien établis dans l'industrie. Ceci devrait être suffisant pour assurer que les échantillons d'eau arrivant aux laboratoires d'analyses soient d'une qualité acceptable et n'aient subis aucun changement chimique indésirable. Il apparaît à la lecture des rapports que les échantillons d'eau n'ont fait l'objet d'aucune mesure physique ou chimique sur le terrain. Toutes les analyses semblent avoir été réalisées dans des laboratoires.

### **5.4.3 Qualité des données**

Aucune donnée sur la chimie de l'eau n'a été recueillie sur le terrain. Les données physiques recueillies sur le terrain et qui sont pertinentes au calcul du bilan massique des composés chimiques comprennent les enregistrements de débit, les volumes d'eau dans les lysimètres et les informations météorologiques. La qualité de ces données est au-delà de la portée de ce chapitre.

#### **5.4.4 Résumé**

Dans l'étude de la Mine Doyon, le travail de terrain ayant rapport à la chimie de l'eau incluait l'installation de puits d'observation, de lysimètres, d'instruments de mesure de l'écoulement, d'une station météorologique et la cueillette de données et d'échantillons d'eau des installations. L'installation de puits d'observation à la Mine Doyon est d'une qualité irréprochable. La conception des lysimètres est exemplaire. L'échantillonnage, la manipulation et l'entreposage de l'eau est conforme aux standards de l'industrie. Cependant, l'instrumentation de mesure de l'écoulement fonctionnait de façon inadéquate à un moment donné (ce qui est maintenant corrigé) et la station météorologique aurait dû être installée à la halde sud plutôt qu'à l'usine de traitement.

## **5.5 Chimie de l'eau-travaux de laboratoire**

### **5.5.1 Travaux réalisés**

Le travail de laboratoire réalisé sur la chimie de l'eau comprend les parties suivantes:

- mesure de paramètres physico-chimiques, soit le pH, le Eh et la conductivité dans les échantillons d'eau recueillis dans les puits d'observation, les fossés collecteurs et les lysimètres;
- mesure de paramètres chimiques sur les mêmes échantillons d'eau tels: solides dissous totaux, acidité, sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), métaux majeurs dissous (K, Na, Ca, Mg, Al,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), métaux en trace dissous (Cu, Pb, Zn, Cd, Pb, Mn);
- développement d'une corrélation pour le calcul de certains paramètres chimiques ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ , Mg, and Al) à partir du TDS ou de la conductivité et adaptation d'une méthode analytique (*Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy ou EDXRF*) pour mesurer rapidement les concentrations d'une sélection de métaux dans le DMA.

### **5.5.2 Méthodologie**

#### **Mesure des paramètres physico-chimiques**

Les techniques routinières de mesures du pH, du Eh et de la conductivité sont établies depuis longtemps et le développement de circuits électroniques, de microprocesseurs intégrés et de sondes plus sensibles dans les deux dernières décades a rendu de telles mesures encore plus fiables, rapides et commodes. Un technicien qualifié suivant des procédures adéquates peut faire ces mesures avec précision. Les instruments utilisés, dont la liste est à la page 5.3 du Rapport GREGI 1994-12, sont des modèles commerciaux communs de qualité démontrée et les réviseurs considèrent leur utilisation comme appropriée.



## Mesure des paramètres chimiques

Les méthodes utilisées pour déterminer les paramètres chimiques incluant *TDS*, acidité,  $\text{SO}_4^{2-}$ , métaux majeurs dissous (K, Na, Ca, Mg, Al,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) et métaux en trace dissous (Cu, Pb, Zn, Cd, Pb, Mn), tel que décrit à la p. 5.3 du Rapport GREGI 1994-12, sont des procédures standards bien établies; nous considérons que leur utilisation dans cette étude est adéquate. Dans cette étude, les chercheurs ont aussi adapté la méthode *EDXRF* pour analyser les échantillons d'eau recueillis par les lysimètres par gravité et d'eau interstitielle extraite sous pression (voir la section 5.6.4 pour une discussion détaillée). Dans la phase finale de l'étude, les chercheurs ont réduit le nombre de paramètres mesurés directement et ils ont utilisé les *TDS* ou la conductivité pour calculer certains des paramètres non-mesurés ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ , Mg, et Al), suivant une corrélation empirique développée à partir de la base de données de la phase précédente (voir la section 5.6.4 pour une discussion détaillée).

Un aspect important des déterminations chimiques nécessaires à l'interprétation des résultats d'analyse n'est pas présenté: la préservation du ratio  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ . Pour préserver le ratio  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , l'acide nitrique ne doit pas être utilisée puisqu'elle oxyde le  $\text{Fe}^{2+}$ .

## Corrélation chimique et EDXRF

Les chercheurs ont développé une relation empirique à l'aide de la base de données accumulée pendant la phase initiale de l'étude afin de calculer certains importants paramètres de la qualité de l'eau ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_{\text{total}}$ , Mg, et Al) à partir du *TDS* (ou de la conductivité) (Rapport GREGI 93-04, p. 5). Cette méthode a l'avantage d'être simple, rapide et peu coûteuse, et elle a raisonnablement bien fonctionné pour les échantillons concentrés de la Mine Doyon. Le même calcul a moins bien réussi pour les solutions de DMA avec un *TDS* inférieur à 25 000 mg/L. La performance relativement satisfaisante pour les solutions plus concentrées a été possible parce que la composition des échantillons de DMA provenant du site était virtuellement constante en termes de ratios entre les différentes espèces chimiques. Cette stratégie pourrait ne pas être applicable à d'autres sites puisqu'une mise à jour de la corrélation empirique est requise à mesure que la chimie de l'eau évolue. Une discussion plus détaillée de ce sujet est présentée à la section 5.6.4.

Dans cette étude, la *EDXRF*, normalement utilisée pour l'étude des solides, a été modifiée pour analyser les métaux dissous en standardisant les étapes d'évaporation d'un aliquot d'échantillon liquide sur une pièce de membrane filtrante. Le grain de précipité/résidu sur le filtre est ensuite bombardé de rayons-X; les rayons-X secondaires fluorescents caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon sont détectés. La courbe résultant de l'énergie des rayons-X incidents versus le compte des rayons-X fluorescents est utilisée pour déterminer la concentration de chaque élément par comparaison avec des courbes de calibration standards. La position de l'énergie identifie l'élément et le nombre de comptes indique la concentration. Cette méthode analytique est techniquement valable et offre quelques avantages, tels qu'être relativement rapide, peu coûteuse, productive et elle nécessite seulement un petit aliquot (20  $\mu\text{L}$ ) d'échantillons, ce qui est très utile pour l'analyse de l'eau interstitielle extraite sous pression à cause du petit volume normalement obtenu. Il y a

quelques désavantages, une d'entre-elles étant la dépendance sur la prémisse que les ratios entre les éléments majeurs dissous dans l'échantillon doivent être constants pour une performance acceptable. Ceci limite sérieusement l'application élargie de cette méthode. Néanmoins, puisque cette exigence était remplie par la plupart des échantillons de DMA de la Mine Doyon, la *EDXRF* a raisonnablement bien fonctionné dans cette étude. Une discussion plus détaillée sur le sujet est présentée à la section 5.6.4.

### 5.5.3 Qualité des données

#### Mesure des paramètres physico-chimiques

La mesure du pH, du Eh et de la conductivité peut être faite avec précision quand la bonne procédure est suivie avec rigueur. La préservation de l'intégrité de l'échantillon représente la clé pour l'acquisition de données de qualité sur les paramètres physico-chimiques. La qualité des données recueillies apparaît acceptable.

#### Mesure des paramètres chimiques

Il est impossible d'évaluer avec certitude la qualité des données chimiques présentées dans les rapports puisqu'aucune description *QA/QC* n'a été fournie. Sur l'hypothèse que des procédures adéquates *QA/QC* ont été suivies et du fait que les analyses de solutions chimiques de cette étude, à l'exception de la méthode de corrélation et de la *EDXRF*, sont des travaux de laboratoire routiniers et établis de longue date, nous supposons que les résultats des données chimiques sont acceptables.

Comme dans le cas des mesures physiques, la clé pour des échantillons chimiques de qualité repose sur un échantillonnage, une manipulation et un entreposage appropriés ainsi qu'une analyse rapide des échantillons d'eau pour minimiser les changements chimiques des solutions dans les analyses visées. Ceci pourrait nécessiter que les échantillons de terrain soient séparés en deux sous-échantillons ou plus, chacun étant traité et préservé suivant les analyses visées. Par exemple, les échantillons devraient être filtrés et non-modifiés pour les déterminations de *TDS*, acidité et  $\text{SO}_4^{2-}$ , alors qu'ils devraient être filtrés et préservés avec de l'acide pour l'analyse des métaux dissous. Les échantillons semblent avoir été manipulés de façon appropriée sur le terrain (voir la section 5.4.2 à "Cueillette des échantillons d'eau sur le terrain et mesures"), quoique le manque d'informations exclut une évaluation approfondie.

#### Corrélation chimique et *EDXRF*

Les données utilisées pour le calcul des paramètres chimiques non-mesurés directement sont soit les *TDS* ou la conductivité. Pour des commentaires sur la qualité des données de ces deux paramètres, voir la discussion précédente au point intitulé "Mesure des paramètres chimiques". La qualité des données chimiques calculées est discutée à la section 5.6.4.

Il est impossible d'évaluer la qualité des données obtenues par *EDXRF*, puisqu'aucune information sur *QA/QC* (utilisation de blancs, duplicata, standards, etc.) n'est donnée concernant l'utilisation routinière de la *EDXRF* pour déterminer les paramètres chimiques ( $\text{Fe}_{\text{total}}$ , Mg, Ca, Al, et  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Néanmoins, une évaluation approximative de la qualité générale de cette méthode analytique peut être faite à partir des informations données aux tableaux 4, 6 et 7 du Rapport GREGI 93-04. Basé sur les analyses de sept duplicata d'échantillons standards, les limites de détection mentionnées de cette méthode (*MDL: methods detection limits*) sont: 55 pour  $\text{Fe}_{\text{total}}$ , 35,5 pour Mg, 32,2 pour Ca, 18,5 pour Al, et 38,1 pour  $\text{SO}_4^{2-}$  (à noter que les concentrations en Mg et en Ca du standard utilisé se situaient en dessous de leurs *MDL* respectives).

Ces limites de détection sont adéquates pour des solutions concentrées, comme c'est le cas pour la plupart des échantillons de DMA de la Mine Doyon, mais ne sont pas très utiles pour la surveillance environnementale de solutions diluées comme les échantillons de bruit de fond ou d'effluent (*discharge*). L'exactitude de la méthode, indiquée par les erreurs relatives évaluées par la moyenne des concentrations détectées tirées du tableau 6 et les concentrations réelles dans le tableau 4, sont comme suit: -7,2% pour  $\text{Fe}_{\text{total}}$ , -6,5% pour Mg, 13,2% pour Ca, 11,6% pour Al et 45,3% pour  $\text{SO}_4^{2-}$ . En utilisant un critère d'acceptabilité de 10%, il est clair que les exactitudes pour Ca, Al et spécialement  $\text{SO}_4^{2-}$ , sont inacceptables pour le S-40 (utilisé pour évaluer la LDM des métaux dissous) et S-100 (utilisé pour évaluer la LDM pour  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Au niveau de la précision (répétitivité), un examen du tableau 6 montre que tous les paramètres sauf  $\text{SO}_4^{2-}$  ont un écart type supérieur à 10% de la moyenne des concentrations détectées, ce qui indique une performance insatisfaisante de cette méthode pour le standard S-40, en ce qui concerne les concentrations des quatre métaux dissous.

Afin de réduire les erreurs relatives d'exactitude et de précision, la méthode *EDXRF* doit être utilisée pour analyser des solutions beaucoup plus concentrées que les standards S-40 et S-100, c'est ce qui a été fait dans cette étude. Il est dit, à la page 10 du Rapport GREGI 93-04, que tous les échantillons ont été dilués approximativement au point central de la courbe de calibration  $\text{SO}_4^{2-}$  (p. 19), soit environ 6000 mg/L ou 160 fois le *MDL*. Les dilutions approximatives ont été faites sur la base du  $\text{SO}_4^{2-}$  des solutions originales estimées par la conductivité ou *TDS*, en utilisant la relation développée dans cette étude. Si pour effectuer des analyses acceptables, nous utilisons des concentrations minimales des échantillons d'alimentation de la *EDXRF* correspondant à dix fois les *MDL* (550 pour  $\text{Fe}_{\text{total}}$ , 355 pour Mg, 322 pour Ca, 185 pour Al et 381 pour  $\text{SO}_4^{2-}$ ), nous constatons que la grande majorité des résultats d'analyse provenant des tableaux 7 et 8 (sauf pour celles rapportées comme inférieures aux limites de détection) sont supérieurs à ces concentrations minimales. L'utilisation de la *EDXRF* est justifiée pour ces échantillons. Une erreur a été notée au tableau 7 (p.12) où le Ca par *EDXRF* est inscrit à 12 mg/L alors que la *MDL* du Ca est de 32 (cette inscription devrait plutôt être reportée comme inférieure à la *MDL*).

La méthode *EDXRF* est discutée ultérieurement à la section 5.6.4.

#### 5.5.4 Résumé

Les techniques de laboratoire utilisées pour la chimie de l'eau incluent les mesures de paramètres physico-chimiques à l'aide d'instruments (pH, Eh et conductivité), des analyses chimiques habituelles (*TDS*, acidité,  $\text{SO}_4^{2-}$  et métaux dissous) par *AAS* et par méthodes humides et la *EDXRF*. Une corrélation empirique a aussi été utilisée pour calculer des paramètres chimiques à partir des mesures de *TDS* ou de conductivité.

La sélection des méthodes analytiques de laboratoire est généralement adéquate. La méthode de corrélation semble efficace pour cette étude en particulier à cause des caractéristiques spéciales des échantillons de DMA de la Mine Doyon; elle pourrait ne pas s'appliquer sur d'autres sites. La technique *EDXRF* a des limites de détection utiles pour analyser des solutions de DMA mais elle n'est pas satisfaisante pour la caractérisation de solutions plus diluées telles que celles provenant de la surveillance du bruit de fond ou d'effluents. Pour être fructueuse, la *EDXRF* doit être appliquée à des solutions dont les concentrations sont supérieures à certains minima, ce qui est le cas avec la majorité des échantillons analysés. Cette étude n'a pas rapporté un aspect important de l'analyse chimique qui est nécessaire pour une interprétation exacte des données chimiques soit la préservation du ratio  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ .

Les rapports n'ont pas présenté beaucoup d'informations sur la *QA/QC* relativement à l'acquisition des données chimiques, rendant difficile l'évaluation de la qualité des données. Les réviseurs se fient sur la maturité des techniques analytiques, la compétence de l'équipe de recherche et sur la concordance des données générées par différentes méthodes pour statuer sur la qualité des données. Notre impression est que la majorité des données présentées dans les rapports sont d'une qualité digne de confiance dans le cadre de cette étude.

## **5.6 Commentaires de la révision par rapport**

Cette section fait la révision de sept rapports (sur dix) de la Mine Doyon ayant plus ou moins de composantes géochimiques et/ou minéralogiques. Les sept rapports sont mis en ordre chronologique selon leur date de publication et chaque rapport est discuté sur trois aspects (lorsqu'applicable): forces, faiblesses et commentaires spécifiques.

Cette section traite de contenu seulement; elle ne traite pas de problèmes d'esthétiques, de grammaire et de style, d'organisation du contenu et de références croisées.

### **5.6.1 Rapport GREGI 91-19**

C'est le plus ancien (écrit en juillet 1991) de la série de rapports sur la Mine Doyon. Il documente la plupart des aspects du projet jusqu'en 1991 et fournit une interprétation préliminaire des données. Quelques-unes des interprétations préliminaires présentées dans ce rapport ont été rehaussées, augmentées ou modifiées dans les rapports ultérieurs, lesquels sont divisés en volumes séparés selon les disciplines (c.-à-d. géochimie, microbiologie, hydrologie, etc.).

## **Forces**

Les principales forces de ce rapport se présentent comme suit:

- c'est un rapport synthèse mettant en place la structure multidisciplinaire et fournissant de bonnes directions et recommandations pour l'acquisition de données dans les travaux à suivre;
- il documente efficacement les premières données du projet en détail, il est rehaussé par des illustrations et des graphiques bien conçus et il décrit aussi la méthodologie expérimentale;
- il reconnaît l'importance de l'altération des silicates et des transformations minéralogiques et met en évidence la corrélation entre différents paramètres physico-chimiques, laquelle a été utilisée ultérieurement pour réduire le nombre d'analyses chimiques;
- il contient une excellente revue de littérature sur le DMA, laquelle vraisemblablement a assuré au personnel du projet une bonne compréhension de la géochimie et de la minéralogie du processus de DMA et par conséquent a amélioré la qualité globale du projet.

## **Faiblesses**

Les principales faiblesses se présentent comme suit:

- les interprétations géochimiques et minéralogiques sont incomplètes, mal expliquées et mal soutenues;
- la description de la méthodologie expérimentale est sursimplifiée;
- les procédures *QA/QC* pour l'acquisition des données ne sont pas bien documentées.

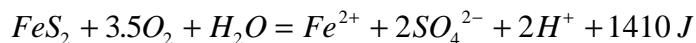
### Commentaires spécifiques

Les interprétations contenues dans ce rapport sont répétées (et augmentées) dans des rapports ultérieurs. Les commentaires sur ces interprétations sont donnés dans les sections suivantes à la rubrique de différents rapports et ne seront pas répétés ici.

#### **5.6.2 Rapport GREGI 93-03**

Ce rapport traite principalement d'auscultation et de modélisation de la production de chaleur et du transfert de la chaleur (par conséquent d'aspects physiques) de la halde sud. Il comprend très peu de géochimie et minéralogie, quoique les résultats de ce rapport aient d'importantes implications géochimiques. Le seul aspect géochimique impliqué dans ce rapport est lié à la conversion de la production de chaleur à la production de sulfates.

L'adoption d'une production de chaleur d'une valeur de 1410 J/mol  $FeS_2$  oxydé (ou 705 J/mol  $SO_4^{2-}$  produit) implique une oxydation complète de la pyrite en sulfate:



En dépit du fait que cette étude ait identifié des espèces intermédiaires de sulfures (tel le sulfure élémentaire) lors du processus d'oxydation de la pyrite, nous croyons que la durée de vie des espèces intermédiaires est courte et que leur quantité est probablement stable. Dans le cadre de la modélisation de la production et du transfert de la chaleur, l'hypothèse d'une totale conversion de la pyrite en sulfate est bien posée.

#### **5.6.3 Rapport GREGI 93-05**

Ce rapport, daté de mars 1994, est une mise à jour de la compilation des données chimiques pour le projet de la Mine Doyon et contient peu d'interprétations.

## **Forces**

Les principales forces de ce rapport incluent:

- c'est un document de mise à jour des données chimiques et de la méthodologie expérimentale;
- il fournit un bilan de masse des sulfates.

## **Faiblesses**

Les principales faiblesses de ce rapport sont:

- la qualité des données chimiques ne peut être évaluée parce que les procédures *QA/QC* utilisées lors de l'acquisition des données ne sont pas rapportées;
- il y a quelques défauts dans l'interprétation des données (voir les commentaires spécifiques ultérieurs).

## **Commentaires spécifiques**

À la page 3, troisième paragraphe, les auteurs déclarent "*puisque le contenu original en eau de chaque échantillon est inconnu, l'acidité a été calculée en utilisant un contenu en eau de 5,7%, lequel représente le contenu moyen en eau de la halde.*" Cette approche assume que toute l'acidité extraite par lixiviation des échantillons de rognures de forage réside dans la phase liquide (l'humidité de 5,7%) et ainsi pourrait avoir négligé l'importance des formes "solides" d'acidité, telles la mélanterite, l'hydronium jarosite, la schwartzlite, etc. Si les formes solides d'acidité représentent vraiment une portion significative de l'acidité totale dans la zone non-saturée, cette approche pourrait avoir grossièrement surestimé la concentration d'acidité dans l'eau interstitielle, et pourrait potentiellement rendre compte pour les observations dans la figure 5 (p.13) que plusieurs des valeurs calculées d'acidité de l'eau interstitielle, spécialement celles dans les forages les plus acides, sont beaucoup plus élevées que leur valeurs correspondantes d'acidité mesurées dans les piézomètres. Ce point n'a pas été noté dans le rapport.

Au tableau 1 à la page 6, le total des sulfates solubles emmagasinés est calculé par une augmentation proportionnelle des résultats de lixiviation de la fraction -2 mm des échantillons -2 cm de rognures de forage, au lieu de l'échantillon entier de rognures de forage -2 cm. Ceci est problématique. Le calcul adéquat devrait augmenter proportionnellement le résultat de lixiviation selon l'échantillon complet de rognures de forage, pas seulement la fraction -2 mm. Pour illustrer, supposons (1) l'échantillon complet de rognures de forage -2 cm est représentatif de la halde à stériles, (2) la fraction -2 mm représente 20% en poids de l'ensemble de l'échantillon de rognures de forage et (3) la charge d'acidité par unité de poids de la fraction +2 mm est 1/5 de celle de la fraction -2 mm; le calcul du total des sulfates emmagasinés serait 45 387 tonnes, non 126 077 tonnes comme calculé dans le rapport. Par conséquent, l'évaluation du sulfate emmagasiné présentée au tableau 1 est

vraisemblablement surestimée de 2-3 fois. Conséquemment, dans l'énoncé de la page 5 , "*...cela représente 7 années d'oxydation active,*" le chiffre 7 devrait être remplacé par 2 à 3,5. Si ceci contredit les autres calculs, une source d'erreur devra être cherchée ailleurs, par exemple, l'estimé du taux annuel d'oxydation de la pyrite (16 443 t/an) ou l'hypothèse que ce taux est constant.

Les chercheurs auraient dû mener au moins une expérience de lixiviation pour comparer l'acidité emmagasinée par unité de poids de différentes fractions granulométriques.

À la figure 2 de la page 10, tous les graphiques montrent une plage sans points expérimentaux sur l'axe vertical et l'axe horizontal. Ceci pourrait être une indication de quelques processus caractéristiques dans les réactions de génération d'acide-neutralisation, c.-à-d. diminution d'un minéral-tampon. Étudier les causes derrière cette observation pourrait potentiellement aider à l'interprétation géochimique et minéralogique des données. Ce point n'est pas discuté et l'observation n'est pas mentionnée dans le rapport.

Un bon exercice pour vérifier la qualité des analyses chimiques est d'accomplir un calcul de bilan des charges (*charge balance computation*), lequel peut être aisément fait pour quelques-unes des données chimiques compilées dans ce rapport. Une analyse chimique acceptable devrait montrer un déséquilibre des charges inférieur à 10%. Aucune vérification de ce genre n'a été mentionnée dans ce rapport malgré la grande quantité de données d'analyse de solutions.



#### 5.6.4 Rapport GREGI 93-04

Ce rapport décrit une méthode de corrélation pour calculer certains paramètres chimiques à partir des *TDS* ou de la conductivité et une technique d'analyse pour analyser des échantillons relativement concentrés de DMA.

##### Forces

Les principales forces des méthodes décrites sont:

- les deux méthodes ont fonctionné de façon satisfaisante pour les échantillons de DMA les plus concentrés provenant de la halde sud;
- les deux méthodes sont basées sur des principes fondamentaux valables et sont techniquement faisables;
- la méthode de corrélation chimique possède l'avantage d'être simple, rapide, peu coûteuse, capable de s'appliquer à des solutions concentrées de DMA et peut éventuellement éliminer le besoin d'analyser certains paramètres chimiques dans certaines circonstances;
- la technique *EDXRF* a aussi l'avantage d'être rapide, peu coûteuse, productive, capable d'accomplir des déterminations multi-éléments et de s'appliquer à des solutions de fortes concentrations et de requérir une faible (20 µL) quantité d'échantillons liquides, ce qui est spécialement avantageux pour analyser de l'eau interstitielle extraite sous pression à cause de son petit volume;
- les deux méthodes peuvent avoir leur "créneau" d'applications quand les circonstances le justifient.

##### Faiblesses

Les principaux points faibles des méthodes décrites sont:

- les deux méthodes reposent sur la prémisse que les solutions analysées doivent suivre une "signature" constante, c.-à-d., la composition des solutions doit rester "constante" (sauf lors de la dilution) pour une performance adéquate des méthodes;
- les courbes de corrélation et les courbes de calibration doivent être mise à jour à mesure que la chimie de la solution (la "signature") change dans le temps;
- bien que les deux méthodes aient bien fonctionné à la Mine Doyon, elles pourraient mal fonctionner à d'autres sites, si la chimie de l'eau n'est pas adéquate;
- les deux méthodes ne fonctionnent bien qu'avec des solutions relativement concentrées; elles ne sont pas satisfaisantes avec des solutions diluées telles que celles rencontrées lors du monitoring du bruit de fond (*background*) ou d'un effluent;
- la méthode de calibration ne peut être utilisée pour les concentrations d'éléments en trace;

- la méthode par *EDXRF* implique de l'équipement complexe, coûteux et spécialisé et est sensible à des erreurs d'opérateurs/dûes à l'environnement/de bruit de fond.

### Commentaires spécifiques

Ajouter le texte suivant sous cette entête à la fin du dernier paragraphe (SENES (1995):

Les corrélations entre acidité, Al, Fe<sub>total</sub>, Mg, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et TDS et conductivité sont présentées à la page 4 avec des coefficients de détermination impressionnants. Ces corrélations sont développées en utilisant 69 échantillons d'eau souterraine provenant de forages et 41 échantillons d'eau d'écoulement recueillis aux déversoirs pendant deux saisons (printemps et été) d'une année (1991) (voir p.2). Dans le cas de la Mine Doyon, la qualité de l'eau d'écoulement (*seepage quality*) a fait l'objet d'une surveillance depuis la mise en place et un programme exhaustif d'auscultation mis en oeuvre en 1990 a démontré que les patrons chimiques du DMA étaient bien établis. Par conséquent, il était probablement acceptable de développer des corrélations sur la base de six mois de données. Cependant, il peut être dangereux de compter entièrement sur les valeurs calculées pour certains paramètres, particulièrement sur des sites avec une chimie de DMA moins bien établie. Des analyses chimiques devraient être faites régulièrement sur ces sites, peut être selon plusieurs intervalles d'échantillonnage séparés afin de vérifier la performance de la courbe de corrélation. Des analyses complètes et plus fréquentes devraient être définitivement réalisées, si des déviations successives des courbes de corrélation sont détectées. Les restrictions de la méthode de corrélation doivent être clairement transmises à quiconque vient pour utiliser n'importe lequel des paramètres chimiques calculés.

Les auteurs déclarent (p.3) que "*ces corrélations sont significatives pour expliquer les processus de la génération d'acide dans la halde. Les résultats indiquent que les échantillons lixiviés (leachate samples) provenant de la base de la halde et des fossés peuvent être considérés comme une seule solution, montrant plus ou moins de dilution. Il est ainsi possible d'établir des relations pour le calcul de la concentration des constituants majeurs comme Fe, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Al, Mg et acidité en se basant sur la mesure d'un paramètre simple, tels les TDS ou la conductivité.*" Cette assertion de garantie (*qualifying statement*) est très importante et devrait être soulignée dans le rapport. Un essai de similitude entre les données de forages/puits et les données d'écoulement semble nécessaire pour appliquer cette approche à d'autres sites (c.-à-d. est-ce que la dilution explique les différences entre les niveaux de concentration?). Il est discutable que ces corrélations soient appliquées aux lixiviats provenant des échantillons de rognures de forage. Les lixiviats ont-ils des "signatures" différentes des échantillons d'eau souterraine et de drainage ayant servis à développer les corrélations ? Les chercheurs auraient dû analyser plus d'échantillons de lixiviats pour valider l'applicabilité des corrélations.

La *EDXRF* est encore applicable aux lixiviats acides provenant de la halde sud où le ratio d'un élément par rapport à un autre est presque constant (c.-à-d. les différences de concentrations sont attribuables à la dilution). Le besoin de solutions standards uniques pour préparer les courbes de calibration est un inconvénient important de cette méthode. Le standard doit avoir une composition similaire à celle du lixiviat. Pour une performance optimale, la méthode exige la dilution d'échantillons hautement concentrés avec de l'acide nitrique jusqu'à une

plage étroite de concentration. Les limites de détection sont élevées comparativement aux analyses chimiques conventionnelles (c.-à-d. *AAS*, *ICP*, chimie humide). Les concentrations des éléments analysés doivent être au-dessus d'un certain minimum pour des résultats analytiques fiables (référence à la section 5.5.3 pour les commentaires sur l'exactitude et la précision de cette méthode)

Les tableaux 7 et 8 (p. 11-12) comparent les résultats par les analyses chimiques conventionnelles, par la méthode de corrélation et par la *EDXRF*. Pour les échantillons de piézomètres, la méthode par corrélation et la *EDXRF* ont une acceptabilité approximativement égale; les deux peuvent donner quelquefois des chiffres très erratiques. Les limites de détection de la méthode *EDXRF* sont clairement trop élevées pour l'eau interstitielle extraite sous pression, au niveau du Fe, de l'Al et du Mg.

### **5.6.5 Rapport GREGI 94-04**

Ce rapport décrit les tentatives de relier les résultats de plusieurs essais mécaniques à la susceptibilité à l'altération (et ainsi son effet sur le taux de génération d'acide) de différents types de roches stériles de la Mine Doyon. Les essais au peroxyde d'hydrogène et les analyses d'images sont aussi utilisés pour caractériser les aires de la surface de la pyrite.

#### **Forces**

Les forces majeures de ce rapport sont comme suit:

- c'est la première tentative systématique à la connaissance des réviseurs pour comparer différents essais mécaniques et d'en relier les résultats à des observations de terrain et de laboratoire sur la susceptibilité à l'altération de roches stériles dans une étude sur le DMA;
- c'est la première tentative connue des réviseurs d'utiliser la célérométrie acoustique pour étudier la génération de DMA provenant de roches stériles;
- les différents essais mécaniques, les essais au peroxyde d'hydrogène et les analyses d'images ont produit des résultats plus ou moins comparables;
- bien qu'avec une méthode de calcul approximative, ce rapport a vérifié l'effet des formes de particules sur l'aire de la surface spécifique.

#### **Faiblesses**

Les réviseurs considèrent ce qui suit comme les principaux points faibles de ce rapport:

- l'utilisation des résultats de différents essais mécaniques est de nature qualitative;

- l'essai au peroxyde d'hydrogène pour déterminer les surfaces réactives spécifiques de la pyrite a échoué (comme les auteurs l'ont signalé);
- les auteurs auraient dû accorder plus d'attention à l'essai au sulfate de magnésium au lieu de l'essai d'abrasion Los Angeles, comme ils ont fait dans le rapport;
- le calcul des aires des surfaces spécifiques est imparfait (voir les commentaires spécifiques qui suivent).

### **Commentaires spécifiques**

Les deux formules au bas de la p. 13 sont inexactes. Les formules exactes sont:

$$S_g = 7 \cdot l^2$$

$$N = \frac{M}{2.7 \cdot l^3}$$

Ces erreurs sont reportées à la formule du haut de la p. 14, laquelle devrait être corrigée pour

$$SS_{plate} = \frac{7}{G_s \cdot l}$$

Cette erreur se reflète à la figure 5 où la ligne représentant les particules en forme de plaques est placée de façon inadéquate sous celle des particules cubiques. La position adéquate de la ligne devrait être au-dessus de la ligne des particules cubiques, mais sous la ligne des particules en forme de disques. Il est évident que l'aire de la surface spécifique des particules allongées et en plaques est supérieure à celle des particules cubiques quand les deux passent au travers de la même ouverture de tamis.

Cette erreur n'affecte pas les aires calculées de surfaces spécifiques des volcanoclastites acides (le seul type de roches pour lequel on assume une forme de particules en plaques) aux tableaux 2 (p. 16), 6 (p. 23) et tous les tableaux de l'annexe B.3 (p. 58-70), parce que ces aires de surface ne sont pas calculées en utilisant la formule inexacte; une voie différente a été utilisée.

Toutes les entrées numériques au tableau 6 (p.23) sont inexactes: celles-ci sont des quantités (aires spécifiques après essais)/(aires de surface spécifique avant essais); c'est-à-dire, les multiples de l'aire de la surface spécifique après essai sur les aires de surfaces spécifiques avant-essai exprimés en pourcentages et évalués en utilisant chacune des trois formes (cubique, disque et plaque) pour chacun des quatre types de roches. Toutes les entrées numériques devraient être divisées par 100 pour obtenir "*le pourcentage d'augmentation des aires de surface spécifique*" ("*l'augmentation de la surface spécifique*"), tel que mentionné dans la légende du tableau. Par contraste, les chiffres à "augmentation" au tableau 2 (p.16) sont calculés correctement.

Le calcul des surfaces spécifiques dans tous les tableaux de l'annexe B.3 (p. 58-70) présente deux défauts. Premièrement, le tamis de fond pour les analyses granulométriques (0,08 mm ou approximativement 200 mesh) est trop grossier. La procédure adéquate devrait être de tamiser le matériel avant-essai et après-essai en utilisant les tamis standards avec un tamis de fond de 400 mesh (0,038 mm) et de prendre le matériel -400 mesh et d'effectuer une analyse granulométrique jusqu'à 0,001 mm (1 µm) en utilisant une autre méthode telle l'analyseur automatique de dimensions de particules ou la sédimentométrie. Le matériel -200 mesh a une influence dramatique sur l'aire de la surface spécifique. Par exemple, au tableau supérieur de la p. 60, la surface spécifique pour la fraction passante 0,08 mm est calculée dans ce rapport en utilisant 0,04 mm (la demi de l'ouverture du tamis), ce qui donne une valeur de 648 148 cm<sup>2</sup>/g. Si le tamisage de cette fraction avait été poursuivi et si l'on trouve que 50% est retenu sur le tamis 0,038 mm, 25% est supérieur à 0,01mm et 25% est inférieur à 0,01mm, on peut calculer les surfaces spécifiques comme au tableau 5-1.

**Tableau 5-1**  
**Calcul de l'effet de la fraction -200 mesh sur l'aire de la surface spécifique**

<b>Fraction granulométrique</b>	<b>% poids</b>	<b>Surface spécifique cm<sup>2</sup>/g</b>	<b>% poids x Surface spécifique</b>
-0,080 mm +0,038 mm	50	439,4	219,7
-0,038 mm + 0,010 mm	25	1080,2	270,0
-0,010 mm (utilisé 0,005 mm)	25	5185,2	1296,3
Surface spécifique de la fraction -0,08 mm (cm <sup>2</sup> /g)			1786,0

La surface spécifique recalculée (1786 cm<sup>2</sup>/g) a presque triplée comparativement à celle du rapport (648 cm<sup>2</sup>/g). Ceci a pour effet d'augmenter la surface spécifique de l'ensemble du matériel avant-essai de 10,53 cm<sup>2</sup>/g à 21,91 cm<sup>2</sup>/g, c'est-à-dire plus que doubler la surface spécifique antérieure.

Le second défaut, moins marqué, est l'utilisation de moyenne discrète de grosseurs de grains pour le calcul des surfaces spécifiques. Dans ce rapport, la surface spécifique de la fraction -20 mm + 14 mm, par exemple, est calculée en utilisant une dimension moyenne de grains de 17 mm (moyenne des deux ouvertures de tamis). Ensuite, la surface spécifique de l'échantillon entier est calculée par la moyenne pondérée des surfaces spécifiques des fractions granulométriques individuelles qui constituent l'échantillon. Si une méthode d'intégration numérique avait été utilisée, le résultat aurait été plus exact (Cummins et *al.*, 1973, pp. 27-34 à 27-37).

#### **5.6.6 Rapport GREGI 1994-06**

C'est un rapport qui se démarque de la série de rapport sur la Mine Doyon, documentant la plupart des découvertes géochimiques et minéralogiques de cette étude et présentant certains calculs/interprétations géochimiques et minéralogiques révélateurs.

### **Forces**

Les forces majeures de ce rapport se résument brièvement comme suit:

- les techniques d'investigation et d'interprétations sont scientifiquement valables;
- l'intégration d'informations provenant de différentes analyses (*XRD*, *SEM-EDX* et analyses chimiques) est exemplaire;
- il a dévoilé, pour la première fois, des évidences minéralogiques directes de l'altération des phyllosilicates, de leur pouvoir-tampon et du cheminement évolutif de l'environnement d'une halde de stériles acide;
- il a présenté, pour la première fois, des évidences de la formation de minéraux argileux provenant de l'altération acide des phyllosilicates;
- il a révélé, avec le support d'observations microscopiques directes, le rôle de la croissance de minéraux secondaires (c.-à-d. jarosite et gypse) dans la désintégration physique de la roche-hôte;
- il comprend une comparaison révélatrice entre les profils selon la profondeur de la dissolution des silicates et de la précipitation des minéraux secondaires mesurés et calculés;
- il utilise une approche intéressante pour calculer le transfert de masse vertical;
- les montages conventionnels et orientés sont joints d'une façon innovatrice pour produire de l'information sur les transformations minéralogiques.

### **Faiblesses**

Ce rapport possède les points faibles suivants:

- le calcul-interprétation minéralogique est basé sur des données provenant d'un seul forage, soit BH-7 (SENES, 1995);
- la minéralogie révélée par *XRD* est de nature qualitative; on aurait pu la rendre plus quantitative par l'utilisation d'analyses globales de roches sur les échantillons de rognures de forage afin de rehausser les interprétations minéralogiques (SENES, 1995);
- les données recueillies dans ce projet ne sont pas exploitées pleinement dans l'interprétation minéralogique (voir les commentaires spécifiques qui suivent);

- l'utilisation innovatrice de montages orientés dans la *XRD* n'est pas documentée de façon suffisamment claire pour que d'autres personnes intéressées par cette approche puissent la suivre.

### Commentaires spécifiques

Dans les calculs de transfert de masse présentés au tableau 3 (p. 32), K et Na auraient pu être inclus aux équations de bilan de masse. Il serait intéressant de constater les résultats de l'addition de ces deux éléments sur la stabilité de la solution mathématique.

La *XRD* et la lixiviation des rognures de forages ont été menées sur virtuellement tous les échantillons des forages BH-1 à BH-7 (voir section 5.3.1). Les auteurs auraient dû utiliser au moins un autre forage pour valider les observations minéralogiques et les calculs de transfert de masse sur BH-7. Ce serait un exercice très valable qui ajouterait à la confiance dans l'ensemble de l'étude minéralogique.

D'autres calculs intéressants auraient pu être faits en utilisant les données existantes. Par exemple, le pourcentage d'acide neutralisé dans la halde de stériles peut être calculé des concentrations en K, Na, Mg, Ca, Al, Mn dans l'eau interstitielle et dans l'eau d'écoulement à la base de la halde (*toe seepage*), et du bilan massique d'eau (*water balance*). Ce pourcentage ajouterait à notre connaissance des processus de génération-consommation de l'acide à l'intérieur de la halde. Le taux de dissolution peut aussi être calculé des données comme l'équilibre annuel d'acidité-alkalinité dans l'eau interstitielle et dans l'eau d'écoulement à la base de la halde.

Les commentaires suivants sont formulés par SENES (1995):

La figure 9 (p.26) montre que les trois premiers mètres du forage BH-7 sont presque neutres alors que les lixiviats sous 4 m sont acides. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette observation: la partie supérieure de la halde pourrait être trop froide pour supporter l'activité bactérienne nécessaire à la génération accélérée de DMA, la surface aurait pu être compactée par la circulation de camions de façon telle que la perméabilité à l'air devienne un facteur limitant l'oxydation, l'acide généré aurait pu être neutralisé *in situ* par des minéraux consommateurs d'acide ou l'acide aurait pu être emporté (lessivé) par l'eau d'infiltration. Lequel de ces facteurs (ou d'autres) est dominant ? Le rapport ne l'explique pas clairement.

À la page 24, à gauche au bas de la figure 6c, la référence illustrant un rhomboèdre de jarosite dans la muscovite est difficile à localiser; la figure 8c le montre beaucoup plus clairement.

La figure 12 sur la p. 36 montre les résultats des calculs de transfert de masse d'une excellente manière et elle est très révélatrice lorsque comparée avec les observations minéralogiques du tableau 1 (p. 12). Les ressemblances sont remarquables et les tendances et les amplitudes relatives ont été assez bien reproduites, grâce à la crédibilité des calculs de transfert de masse. Cependant, les auteurs ont négligé de suggérer cette comparaison révélatrice.

Les recommandations proposées dans le rapport (p. 37) ne peuvent logiquement découler du travail présenté dans le rapport. Les réviseurs ne considèrent pas le manque de données sur la qualité de l'eau comme un "point faible essentiel" de cette étude. Les chercheurs devraient être loués pour l'utilisation de deux différentes méthodes (extraction sous pression et extraction par lixiviation) pour obtenir les échantillons d'eau interstitielle de la roche stérile; la plupart des investigateurs se fient seulement sur les échantillons d'écoulement d'eau et les analyses de roches pour estimer la qualité de l'eau interstitielle. Selon notre opinion, la sous-utilisation des données recueillies est plus un problème que le "*manque de données*", faisant comprendre qu'un des objectifs du projet était simplement l'accumulation de données. Aucune tentative n'a été faite pour corrélérer les données sur la qualité de l'eau interstitielle et de lixiviat avec les données d'eau d'écoulement (*seepage data*).

### **5.6.7 Rapport GREGI 1994-12**

Ce rapport est un excellent panorama et un résumé de l'ensemble de l'étude de la Mine Doyon. Il met ensemble toutes les pièces de l'étude et les intègre en un document cohérent. Il présente aussi du travail qui n'avait pas été documenté dans d'autres rapports (e.g. thermographie infrarouge et modélisation numérique).

Considérant que ce rapport intègre des rapports séparés de la série de la Mine Doyon, la majorité des forces et faiblesses des rapports précédents s'applique aussi à ce rapport. Plusieurs parties de ce rapport répètent les textes et les structures de rapports antérieurs, ainsi plusieurs des commentaires spécifiques faits précédemment sur des rapports séparés sont aussi valides pour ce rapport. Les forces, faiblesses et commentaires spécifiques ne seront pas répétés ici et le lecteur est référé aux sections précédentes pour leur formulation. Les forces, faiblesses et commentaires spécifiques uniques à ce rapport apparaissent plus bas.

#### **Forces**

Les forces principales de ce rapport comprennent:

- il intègre les rapports antérieurs et certains travaux non-reportés à date d'une manière concise, logique et cohérente;
- il introduit quelques informations manquantes dans les rapports précédents, fournit les ponts nécessaires entre les composantes et fait un tout de l'ensemble de l'étude de la Mine Doyon.

#### **Faiblesses**

Les faiblesses de ce rapport sont comme suit:

- plusieurs parties de ce rapport sont des reproductions mot à mot de rapports précédents ce qui a comme résultat de répéter plusieurs erreurs des rapports précédents;



- les références croisées avec les autres rapports ne sont pas faites d'une manière claire et systématique et certains liens avec des documents antérieurs sont absents.

### Commentaires spécifiques

Aux pages 1.8 et 1.9, le calcul du PN, et ainsi du PNN, est basé sur l'analyse des carbonates (AC). Ceci donne un PN et un PNN biaisés (sous-estimation) (voir la section 5.3.2 sous "Détermination des acides-bases").

À la section 2.3.4, pages 2.9 à 2.10, les équations (4) et (7) sont inexactes. Les équations exactes sont:

$$S_w = \frac{W_c(1-n)r_s}{nr_w}$$

$$n = \frac{r_s(W_c + 1) - r_b}{r_s(W_c + 1)}$$

La porosité calculée par les deux méthodes coïncide de façon excellente.

À la page 3.2, quatrième paragraphe, l'erreur faite précédemment en calculant l'aire de la surface d'une plaque a été corrigée. Cependant, la courbe de la figure 3.1 n'a pas été corrigée en conséquence (voir la section 5.6.5 pour la discussion de cette erreur). De plus, les ratios présentés au bas de la page 3.2 (c.-à-d., 1,47 (disque) : 1,17 (plaquette): 1,00 (cube)) sont inexactes, les ratios exacts devraient être 4,00 (disque) : 1,17 (plaquette) : 1,00 (cube).

À la page 3.4, les nombres du tableau 3.2 sont différents de ceux présentés au tableau 2 du Rapport GREGI 94-04, alors que les courbes de distribution granulométrique (p. 3-5), lesquelles sont supposées être à la base du calcul de ces nombres, sont identiques à celles présentées aux pages 56-57 du Rapport GREGI 94-04. Le rapport n'explique pas comment cela est possible. De plus, dans ce rapport la détermination des surfaces spécifiques présente les deux mêmes désavantages dont il a été discuté aux commentaires spécifiques de la section 5.6.5.

La discussion sur la grande quantité de données générées par l'auscultation du DMA aux déversoirs (pages 5.7 à 5.14) est largement qualitative (sauf pour le calcul du sulfate et de la production d'acide) et n'ajoute pas beaucoup de connaissances à cette étude.

Le rapport déclare au second paragraphe de la page 5.43 que: *"la dissolution de la chlorite va contribuer à neutraliser le pH de la solution comme il est illustré à l'équation (6). Cependant, si le pH demeure faible, l'aluminium (Al) va vraisemblablement demeurer en solution et contribuer à l'acidité."* Cette énoncé est déroutant; il laisse supposer que la dissolution de la chlorite va moins contribuer à la réduction du pH quand

l'aluminium (Al) est en solution. Ce qui est faux. Quand l'aluminium (Al) reste en solution, la dissolution de la chlorite contribue plus fortement à réduire le pH de la solution, parce que la précipitation de l'aluminium est génératrice d'acide et ainsi abaisse le pH de la solution. De plus, l'énoncé semble confondre le concept d'acidité et le pH. L'acidité mesure la concentration totale en solution de métaux précipitables alors que le pH mesure l'activité des ions  $H^+$ . Il est possible qu'une solution ait une acidité élevée et un pH qui n'est pas très bas; réciproquement, il est aussi possible qu'une solution ait un très faible pH et une acidité qui n'est pas très élevée. L'énoncé pourrait être modifié par: "La contribution d'une dissolution complète de la chlorite à la neutralisation de l'acide dépend du pH de la solution en contact avec la chlorite subissant la dissolution. Quand le pH de la solution est approximativement sous 2,5, à la fois  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$  resteront en solution, par conséquent chaque mole de chlorite complètement dissoute neutralisera 16 moles de  $H^+$ , comme il est illustré à l'équation (6). Quand le pH de la solution est approximativement entre 2,5 et 3,5,  $Fe^{3+}$  précipite mais  $Al^{3+}$  reste en solution, ainsi chaque mole de chlorite dissoute neutralisera 14 moles de  $H^+$ . Finalement, si le pH de la solution est supérieur à environ 5, à la fois  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$  précipitent; la dissolution d'une mole de chlorite neutralisera seulement 8 moles de  $H^+$ ."

L'énoncé de la même page après l'équation (7.1): "...dans certaines circonstances, une nette baisse de l'acidité va résulter principalement en une réduction de la concentration du  $Fe(III)$  de la solution" est inexact. La précipitation de jarosite provenant de la solution réduit toujours l'acidité de cette solution, pas seulement dans "certaines circonstances", comme l'illustre l'équation (7.1) où la jarosite prend 3  $Fe^{3+}$ , ce qui est équivalent à 9  $H^+$  en acidité, de la solution mais remet en même temps 6  $H^+$  dans la solution, ce qui cause une perte nette d'acidité équivalente à 3  $H^+$ .

## **5.7 Nouvelles approches identifiées par la révision**

Les nouvelles approches pertinentes à la géochimie et à la minéralogie provenant de ce projet sont divisées en deux parties: techniques et connaissances.

Dans les techniques sont inclus les outils d'investigation du terrain, les méthodes analytiques de laboratoire et les techniques quantitatives et d'interprétations.

Les connaissances incorporent les observations, les faits, les théories et les hypothèses.

Pour se qualifier comme "nouvelles approches", les techniques ou connaissances doivent être nouvelles ou impliquer une composante qui est innovatrice dans le champ de la recherche du DMA.

### **5.7.1 Techniques**

Cette révision considère ce qui suit comme les nouvelles techniques de ce projet pour les études minéralogiques et géochimiques:

1. L'utilisation combinée de montages conventionnels et de montages orientés pour l'analyse *XRD* d'échantillons de roches et de sol afin d'identifier des minéraux expansifs et des orientations préférentielles de croissance des minéraux;
2. L'utilisation combinée de *SEM* et de *EDX* pour étudier la progression de l'altération des phyllosilicates et le patron d'altération;
3. L'utilisation combinée de l'essai d'abrasion Los Angeles, de l'essai d'attrition Micro Deval, de l'essai de désintégration au  $MgSO_4$  et de l'analyse d'images pour caractériser la susceptibilité à l'altération d'échantillons de roches et son effet sur la génération de DMA;
4. L'utilisation de la célérométrie acoustique pour déterminer la résistance mécanique et l'anisotropie des roches menant à l'évaluation du potentiel d'altération pour la prédiction du DMA;
5. L'utilisation de méthodes de corrélation afin de calculer des paramètres chimiques pour l'auscultation du DMA;
6. L'adaptation de la technique *EDXRF* pour analyser des échantillons de DMA, spécialement lorsque le volume impliqué est extrêmement petit;
7. Cueillette d'échantillons d'eau provenant de lysimètres enfouis pour caractériser la qualité de l'eau dans la zone non-saturée d'une halde de stériles génératrice d'acide;

8. Calcul du transfert de masse vertical dans une halde de stériles à l'aide d'analyses chimiques de lixiviats de rognures de forages et comparaison des changements minéralogiques inférés avec des observations expérimentales.

### 5.7.2 Connaissance

Une partie de ce qui suit est connu depuis longtemps mais n'était pas supporté par des preuves sur le terrain. Lorsque de telles preuves de terrain sont fournies par l'étude de la Mine Doyon, elles sont décrites plus bas comme "nouvelles connaissances". Les nouvelles connaissances géochimiques et minéralogiques ajoutées par cette étude de la littérature sur le DMA incluent:

1. Pour le cas de la Mine Doyon, les propriétés physiques de roches stériles, telles que déterminées par les différents essais mécaniques utilisés dans cette étude, permettent de prédire partiellement les différents taux de génération de DMA de roches stériles;
2. Pour le DMA possédant des caractéristiques chimiques bien définies, il existe de bonnes corrélations entre les différents paramètres chimiques à un degré tel que certains paramètres chimiques peuvent être calculés à partir des autres avec une exactitude acceptable et de telles corrélations peuvent être avantageuses pour réduire la charge d'analyses chimiques de l'auscultation du DMA;
3. L'altération des silicates est bien définie à la Mine Doyon. Il est montré qu'elle peut contribuer de façon significative à la neutralisation de l'acide dans un empilement de roches stériles. Quand des concentrations élevées de Al et Mg sont rencontrées dans le drainage d'une halde de stériles, qui est connu pour ne pas contenir des quantités significatives d'oxydes et d'hydroxydes d'Al et de Mg, une altération rapide des aluminosilicates, laquelle contribue à la consommation d'acide, devrait être soupçonnée;
4. Il est observé que les précipités d'hydroxydes de fer peuvent enrober de la pyrite fraîche ou partiellement oxydée, que de la jarosite peut cristalliser à l'intérieur de la muscovite entre les feuillets et du gypse peut se former le long des plans de schistosité. Les deux derniers processus aident à disloquer les minéraux et les roches et exposent la pyrite fraîche à l'oxydation, accélérant la génération d'acide et l'altération des roches stériles;
5. Des évidences sont observées de l'altération progressive des phyllosilicates: la chlorite subit une dissolution complète, libérant le Fe, Al et Mg au profit des solutions en contact; la muscovite et la paragonite sont transformées en une phase minérale expansive semblable à la smectite par la perte structurale de Al, K, Na et le gain de Mg avant d'être complètement transformées. La silice amorphe est la phase résiduelle finale pour ces trois minéraux.
6. Les minéraux primaires, les minéraux secondaires et la solution réagissent les uns avec les autres pour mener aux transformations minérales observées ainsi qu'à la composition de l'eau interstitielle et d'écoulement. L'altération des trois minéraux (chlorite, muscovite, paragonite) libère de l'aluminium

(Al) ce qui explique les hautes concentrations en Al dans l'eau interstitielle, les lixiviats et l'eau d'écoulement. La muscovite libère du potassium (K) et la paragonite libère du sodium (Na), lesquels sont nécessaires pour la formation de K-jarosite et de Na-jarosite respectivement. La dissolution de la chlorite libère du magnésium (Mg), lequel est repris par la muscovite et la paragonite lors de leur transformation en phase d'altération intermédiaire ressemblant à la smectite. L'oxydation de la pyrite génère de l'acide laquelle crée un environnement convenable pour la formation de jarosite. Une partie de l'acide générée est consommée par la dissolution des trois minéraux;

7. Les profils chimiques des lixiviats extraits par lessivage des rognures de forages peuvent être utilisés pour calculer le transfert de masse vertical, lequel décrit la perte de minéraux primaires et la perte/gain de minéraux secondaires à différentes profondeurs. L'information minéralogique dérivée de cette façon peut être comparée aux profils minéralogiques observés et dans le cas de la Mine Doyon, la minéralogie calculée reproduit la plupart des importantes caractéristiques de la minéralogie observée, indiquant le succès de cette approche.

## **5.8 Application des nouvelles approches**

Cette section considère l'applicabilité des nouvelles approches identifiées à la section 5.7, ce qui inclut les nouvelles techniques et les nouvelles connaissances pour deux grandes catégories de gens: les chercheurs sur le DMA et les opérateurs de mine. Les chercheurs sur le DMA sont principalement intéressés à découvrir les mécanismes de génération, de consommation et de transport d'acide; à développer des moyens de prédire le taux de DMA et sa durée; et à chercher des méthodes pour prévenir ou réduire le DMA. Les opérateurs de mine sont plus concernés par les aspects pratiques du DMA: auscultation du DMA pour la conformité, la fermeture des sites avec des matériaux générateurs d'acide de la façon présentant le meilleur coût-rendement et estimer le coût de restauration de tels matériaux. Les législateurs, les consultants et d'autres groupes intéressés pourraient aussi trouver cette information utile.

### **5.8.1 Techniques**

Pour faciliter la présentation, les techniques sont identifiées par la même numérotation qu'à la section 5.7.1. Lorsque qu'appropriée, l'applicabilité de chaque technique est discutée pour les chercheurs sur le DMA et les opérateurs de mine.

1. **Utilisation combinée de montages conventionnels et de montages orientés pour l'analyse au XRD.** Cette technique est très spéciale et peut être utilisée par d'autres chercheurs pour étudier les transformations minéralogiques au cours des processus d'altération. Leur utilisation par des opérateurs de mine est peu probable.

2. **Utilisation combinée de SEM et de EDX.** Ce sont aussi des techniques spécialisées convenant plus à des chercheurs sur le DMA dans leur quête des mécanismes d'altération des minéraux. Leur utilisation par des opérateurs de mine est peu probable.
3. **Utilisation combinée de l'essai d'abrasion Los Angeles, de l'essai d'attrition Micro Deval, de l'essai de désintégration au MgSO<sub>4</sub> et analyse d'images.** Ces essais ne sont pas encore totalement développés pour la caractérisation du DMA des roches stériles. Les chercheurs peuvent explorer plus en avant ces essais et en trouver un ou deux qui sont plus adéquats pour l'objectif précité. Une grande quantité de travaux d'essais est requis pour quantitativement valider et calibrer ces essais avec des observations de terrain. Lorsqu'un ou deux essais seront totalement développés, ils pourront être utilisés à la fois par les chercheurs et les opérateurs de mine dans la boîte à outils de la prédiction du DMA, spécialement pendant les premières étapes de développement d'une mine.
4. **Célérométrie acoustique.** C'est un nouvel essai intéressant pour la caractérisation de roches stériles. Les mêmes commentaires qu'au point précédent (3) s'appliquent à cet essai.
5. **Méthode de corrélation pour calculer les paramètres chimiques pour le suivi du DMA.** Cette technique pourrait être intéressante pour des opérateurs de mines pour lesquels le DMA a des caractéristiques bien définies et a été surveillé depuis un certain temps. La corrélation peut alors être développée en utilisant la base de données historique et la technique peut être utilisée pour réduire le nombre d'analyses chimiques d'échantillons de DMA. Cette technique, toutefois, sera utile pour un nombre limité de mine (où le drainage est lourdement contaminé et la composition est stable dans le temps). Quand cette méthode est utilisée pour l'auscultation du DMA, la validité de la corrélation devrait être vérifiée périodiquement, les données générées de cette façon devraient être clairement identifiées comme "valeurs calculées" et les limitations de la méthode devraient être transmises à ceux qui utilisent ces valeurs. Comme outil d'auscultation, cette technique aurait peu de valeur pour les chercheurs sur le DMA.
6. **EDXRF.** Cette technique pourrait être utilisée par des chercheurs dans des situations similaires à celles de la Mine Doyon, c'est-à-dire, quand un grand nombre d'échantillons très contaminés, certains d'entre eux étant disponibles seulement en volumes minuscules, ont besoin d'être analysés et quand l'équipement nécessaire est déjà disponible. Nous ne croyons pas que cette technique se répandra dans l'industrie minière pour l'auscultation routinière du DMA parce que l'utilisation de l'équipement est coûteux et qu'une expertise spéciale est nécessaire.
7. **Cueillette d'échantillons d'eau des lysimètres enfouis.** C'est une technique simple, relativement peu coûteuse pour recueillir des échantillons de la zone non-saturée dans les empilements de roches stériles, lesquels sont autrement difficiles à obtenir. Elle peut être utilisée efficacement par des chercheurs sur le DMA autant que par les mines qui désirent surveiller la qualité de l'eau de la zone non-saturée.
8. **Calculs du transfert de masse vertical** C'est un technique quantitative/interprétative qui peut être adoptée par d'autres chercheurs sur le DMA et quand elle est utilisée correctement, elle peut générer des connaissances très utiles sur les processus du DMA prenant place dans un empilement de roches stériles. Son utilisation, cependant, implique une cueillette intensive de données (échantillonnage par forage,

analyses chimiques de lixiviats extraits des rognures de forage et analyses *DRX* des rognures de forage) et par conséquent, elle est probablement limitée à de gros projets de recherche sur le DMA. Son utilisation par des opérateurs de mine est peu probable.

### 5.8.2 Connaissances

Les points sont identifiés par la même numérotation qu'à la section 5.7.2. Lorsqu'appropriée, l'applicabilité de chaque nouvelle connaissance est discutée pour les chercheurs sur le DMA et les opérateurs de mine.

1. Pour les chercheurs sur le DMA, ces connaissances ajoutent un peu plus de motivation pour sélectionner et standardiser certains des essais mécaniques disponibles par l'entremise d'une validation et d'une calibration sur le terrain dans le but de prédire le DMA. Il pourrait même être valable de tenter d'utiliser quantitativement les résultats d'essais dans des modèles mathématiques prédictifs. Les opérateurs de mines devraient attendre que ces essais soient prouvés avant de les accepter pour une utilisation routinière.
2. Cette connaissance devrait donner aux opérateurs de mines, dont la situation justifie l'utilisation de la méthode de corrélation pour l'auscultation du DMA, une confiance permettant d'adopter cette méthode. Pour les chercheurs, cette connaissance est intéressante à avoir.
3. La consommation d'acide par les silicates est représentée par certains chercheurs comme étant trop lente pour une contribution significative au PN. Cette connaissance devrait amener ces chercheurs à repenser sérieusement leur conception. Les silicates, spécialement les phyllosilicates, peuvent potentiellement offrir un large pouvoir-tampon là où l'eau d'infiltration se déplace très lentement, affectant la qualité de l'eau et ceux-ci ne devraient pas être négligés. Quand des concentrations en Al et Mg sont rencontrées dans le drainage d'une halde de stériles qui n'est connue comme ne contenant pas des quantités significatives d'oxydes et d'hydroxydes d'aluminium et magnésium, les opérateurs de mine devraient soupçonner et étudier la possibilité d'une altération rapide des aluminosilicates.
4. Cette connaissance s'ajoute à la littérature sur le DMA et elle contribue à notre appréciation générale des processus de génération du DMA et de consommation du DMA. Elle donne aussi aux spécialistes en modélisation un peu plus de confiance pour écrire leurs algorithmes de prédiction du DMA. Cette connaissance pourrait aider les opérateurs de mine à comprendre leur observations sur le terrain et la chimie de leur drainage.
5. Pour les chercheurs et les opérateurs de mine, cette connaissance indique la nécessité, pour la recherche, de recueillir une description complète de la chimie du DMA. Elle aide aussi à expliquer pourquoi la prédiction et la caractérisation du DMA sont spécifiques à chaque site. La nature dynamique des interactions entre les minéraux et les solutions montre que les processus du DMA sont vraiment complexes et elle incite les opérateurs de mine à ne pas croire aveuglément les prédictions du DMA par modèles mathématiques. Cette connaissance peut aussi avoir des applications au-delà de la prédiction du DMA: elle peut fournir des indices dans la prédiction des problèmes de stabilité (comme les

affaissements et les ruptures) provenant de la minéralogie et de la pétrologie de la roche dans les haldes de stériles, elle peut aider à révéler les transformations minéralogiques dans les opérations de lixiviation en tas (*heap leaching*) et les effets des changements minéralogiques sur la chimie de la solution, la récupération (*value recovery*) et le contrôle de la pollution et elle peut aider à définir les conditions du sol pour la croissance des plantes pour les fins de la restauration du site. De plus, les commentaires du point (4) s'appliquent également.

6. Voir le point 5
7. Cette connaissance donne aux chercheurs une confiance dans l'utilisation des calculs de transfert de masse comme un outil d'interprétation.

## **5.9 Études futures et coûts associés**

Selon l'opinion des réviseurs, les travaux géochimiques et minéralogiques menés par l'équipe de recherche de la Mine Doyon sont satisfaisants et la plupart du temps complet. Il n'y a aucune lacune majeure restant à combler et aucun défaut majeur à corriger. Néanmoins, il y a quelques aspects à améliorer. Ceux-ci sont présentés plus bas avec une estimation approximative des coûts associés.

### **Géochimie des éléments en trace**

Le rapport a mentionné que dans la campagne de cueillette de données de 1991, les métaux en trace dissous, tels Cu, Pb, Zn, Ni, et Cd ont été mesurés. Aucun des dix rapports n'a discuté de ces données. Nous reconnaissons tous l'importance de la présence de métaux en trace dans le drainage minier à cause de leur contribution majeure à la toxicité aquatique. Bien que la plupart des métaux en trace peuvent être aisément enlevés par précipitation dans les procédés de traitement, nous avons toujours besoin de connaître leur niveau dans le drainage minier et ce qui contrôle leur solubilité afin d'évaluer les conséquences environnementales de fuites dans l'eau souterraine, de déversements accidentels et d'écoulements incontrôlés à cause d'inondations inhabituellement hautes. Il n'est donc pas surprenant que l'équipe de recherche de la Mine Doyon ait opté pour laisser de côté la géochimie des métaux en trace, étant donné le travail remarquable qu'ils ont accompli sur la minéralogie et la géochimie des éléments majeurs. Mentionnons que les contrôles géochimiques des métaux en trace dissous dans le DMA sont une préoccupation de toute première importance dans plusieurs projets de recherche sur le DMA dans le monde.

Il serait d'un très grand intérêt d'étudier la géochimie des métaux en trace (c.-à-d. ce qui contrôle la libération des éléments en trace dans les minéraux primaires et ce qui contrôle leur concentration dans le DMA) en utilisant la base de données existante et en établissant la relation avec les constatations déjà faites sur la géochimie et la minéralogie. Ce travail pourrait être un excellent choix pour une thèse de niveau gradué qui serait supervisée par un des membre de l'équipe de recherche originale. Le coût approximatif de ce travail est



estimé à 20 000 - 25 000 \$. Il n'est pas recommandé d'effectuer une nouvelle campagne d'échantillonnage imposante ou une grande quantité d'analyses chimiques additionnelles sur les échantillons déjà recueillis.

### **Analyses additionnelles des données d'auscultation**

La grande quantité de données d'auscultation de l'eau n'est étudiée que qualitativement dans les rapports de la Mine Doyon. Selon les réviseurs, ces données ont été sous-utilisées. Il est possible de réaliser des analyses de causes à effets et statistiques sur les précipitations, la qualité de l'eau et les données d'auscultation de l'écoulement du drainage afin d'étudier les paramètres contrôlant la libération de l'acidité et des contaminants de la halde de stériles (incluant les paramètres hydrologiques, hydrogéologiques et géochimiques). Si des relations significatives sont produites par cet exercice, les variations temporelles et spatiales de l'acidité et des charges de contaminants pourraient être mieux comprises. (Il a été appris récemment que ce travail a été entrepris comme une composante d'un projet NEDEM séparé).

Le coût de cette recherche est estimé à environ quatre semaines de temps pour un expert spécialisé en géosciences et en analyse statistique, soit environ 13 000 \$.

### **Validation des conclusions minéralogiques et géochimiques provenant des données de BH-7**

L'utilisation des données provenant d'un seul forage, pour établir les conclusions minéralogiques et géochimiques, est une faiblesse du travail traitant des transformations minéralogiques. Il pourrait être d'un grand intérêt de valider les conclusions par un exercice similaire utilisant des données d'un autre forage (on peut choisir dans les six forages restants). Il est compris que des données chimiques de *XRD* et de lixiviats sont disponibles dans la base de données existante. Ainsi des profils minéralogiques (qualitatif et semi-quantitatif) peuvent être bâtis et le transfert de masse vertical peut être calculé sans essais additionnels. Seulement un nombre limité d'analyses *SEM-EDX* sont nécessaires, pourvu que les rognures de forage aient été bien préservées. Autrement, le travail de *SEM-EDX* peut être omis. Ce travail est estimé à 15 000 \$.

### **Correction des défauts et contrôle de qualité des rapports**

Quelques défauts relativement mineurs sont identifiés dans ce chapitre et d'autres dans les autres chapitres révisés. Ceux-ci devraient être corrigés. Le contrôle de qualité dans les dix rapports présentés pour la révision a été assez pauvre et devrait être refait selon un standard acceptable. Considérant que ces deux aspects n'appartiennent pas exclusivement à la géochimie et à la minéralogie, un estimé de coût ne sera pas présenté.

## **5.10 Résumé**

Les réviseurs considèrent les travaux géochimiques et minéralogiques du projet de la Mine Doyon comme une étude instructive. Aucun défaut majeur n'a été identifié par la révision et aucune lacune majeure ne reste à

comblé. Quelques défauts, de mineurs à quelque peu significatifs, ont été trouvés et présentés dans ce chapitre. Ce qui suit résume les principales conclusions de ce chapitre.

### **Caractérisation des solides-travaux de terrain**

La méthode de forage utilisée est conforme aux règles de l'art pour l'échantillonnage des haldes de stériles et les méthodes de creusage de tranchées et de fosses sont conformes avec les standards de l'industrie. Les localisations de forages, tranchées et fosses sont adéquatement sélectionnées et les procédures d'échantillonnage coïncident avec les pratiques courantes. L'observation et la description des échantillons sont de premier ordre et bien documentés. Les données de pH de la pâte semblent dignes de confiance. Cependant, les distributions granulométriques établies ne sont pas représentatives de l'ensemble de l'empilement de roches stériles et le pourcentage de la fraction granulométrique supérieure à 0,5 m n'est pas quantifiée, ce qui rend impossible la détermination de l'aire totale de la surface du matériel contenu dans l'empilement de roches stériles.

### **Caractérisation des solides-travaux de laboratoire**

Un nombre impressionnant de caractéristiques des solides a été déterminé. L'utilisation d'analyses des lixiviats de rognures de forage, d'analyses globales de roches et la détermination des acides-bases semble appropriée comme moyen d'obtenir de données représentatives; l'utilisation de la *XRD* et de la *SEM-EDX* et des analyses chimiques de l'eau interstitielle semble adéquate comme moyen de rassembler des données typiques. L'essai au peroxyde d'hydrogène, l'analyse d'images et les essais mécaniques sont utiles et innovateurs, mais ils sont uniquement des tentatives préliminaires. Les méthodologies sont généralement bien conçues et bien appliquées, bien que quelques embûches et subtilités demande de l'attention au moment d'interpréter les données. Des améliorations peuvent être faites en juxtaposant la *XRD* avec les analyses globales de roches, en utilisant une méthode de titration pour déterminer le PN et en se concentrant sur l'essai au  $MgSO_4$ . L'essai au peroxyde d'hydrogène ne vaut pas la peine d'être réutilisé pour la détermination de la surface des sulfures réactifs.

### **Chimie de l'eau-travaux de terrain**

L'installation de puits d'observation à la Mine Doyon est d'une qualité irréprochable. La conception des lysimètres est exemplaire, bien qu'elle ne soit pas appropriée à tous les sites comme ceux où les larges cailloux (*boulder*) dominant. L'échantillonnage, la manipulation et l'entreposage de l'eau sont conformes aux standards de l'industrie. Cependant, l'instrumentation de mesures de l'écoulement fonctionnait de façon inadéquate à un moment donné (ce qui est maintenant corrigé). La station météorologique aurait dû être installée à la halde sud plutôt qu'à l'usine de traitement.

### **Chimie de l'eau-travaux de laboratoire**

La sélection des méthodes analytiques de laboratoire est généralement adéquate. La méthode de corrélation semble efficace pour cette étude en particulier. La technique *EDXRF* a des limites de détection utiles pour analyser des solutions de DMA mais elle n'est pas satisfaisante pour la caractérisation des solutions plus diluées. La méthode *EDXRF* semble avoir du succès dans cette étude. La méthode de préservation du ratio  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  pour les analyses chimiques n'est pas signalée.

### **Commentaires de la révision par rapport**

Les composantes géochimiques et minéralogiques de sept des dix rapports de cette étude ont été commentées sur une base individuelle. Les forces majeures, les faiblesses majeures et la plupart des commentaires spécifiques marquants ont été documentés.

### **Nouvelles approches identifiées par la révision**

Les nouvelles approches provenant de ce projet sont identifiées comme techniques et connaissances. Les techniques comprennent les outils d'investigation du terrain, les méthodes analytiques de laboratoire et les techniques quantitatives et d'interprétation. Les connaissances incluent les observations, les faits, les théories et les hypothèses.

### **Application des nouvelles approches**

L'applicabilité de chacune des nouvelles approches (technique ou connaissance) est considérée pour deux larges catégories de gens: les chercheurs sur le DMA et les opérateurs de mine.

### **Études futures et coûts associés**

Il n'y a aucune lacune majeure restant à combler dans cette étude. Quatre futures études potentielles sont identifiées.

## **5.11      Références**

APHA, WWA, WPCF, 1985. *Standard methods for the examination of water and waste water*. 16ième édition.

Coastech Research, 1991. Acid rock drainage prediction manual. Rapport NEDEM 1.16.1b.

Coastech Research, 1989. Investigation of prediction techniques for acid mine drainage. Rapport NEDEM 1.16.1a.

Cummins, A.B. and Given, I.A. (eds.), 1973. *SME mining engineering handbook*, Vol. 2. Society of Mining Engineers of AIME, New York.

Drever, J.I., 1982. *The geochemistry of natural waters*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Finkelman, R.B. and Giffin, D.E., 1986. Hydrogen peroxide oxidation: An improved method for rapidly assessing acid-generating potential of sediments and sedimentary rocks. *Recreation and Revegetation Research*, Vol. 5.

Garrels, R.M. and Christ, C.L., 1965. *Solution, minerals, and equilibria*. Harper & Row Publishers, Inc., New York.

GREGI, 1991-19 (Gélinas, P., Choquette, M.P., Lefebvre, R., Isabel, D., Leroueil, S., Locat, J., Bérubé, M., Theriault, D. et Masson, A.). Évaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stériles: Étude du site de la Mine Doyon. Rapport GREGI 91-19, juillet.

GREGI, 1993-03 (Lefebvre, R., Gélinas, P. and Isabel, D.). Heat transfer during acid mine drainage production in a waste rock dump, La Mine Doyon (Québec). Rapport GREGI 93-03, mars. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.

GREGI, 1993-04 (Choquette, M., Gélinas, P. and Isabel, D.). Two rapid methods to evaluate acid mine drainage composition: Total dissolved solids and energy dispersive X-Ray fluorescence spectroscopy. Rapport GREGI 93-04, mars, révisé décembre 1993, Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.

GREGI, 1993-05 (Choquette, M., Gélinas, P. and Isabel, D.). Monitoring of acid mine drainage: Chemical data from La Mine Doyon - south waste rock dump. Rapport GREGI 93-05, mars, révisé décembre 1993. Rapport NEDEM 1.14.2, mars 1994.

GREGI, 1994-04 (Locat, J., Bérubé, M.A., Gélinas, P., et Choquette, M.). Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des principales unités lithologiques à la Mine Doyon. Rapport GREGI 94-04, janvier.

GREGI, 1994-06 (Choquette, M. and Gélinas, P.). Mineralogical transformations associated with AMD production in a waste rock dump, la Mine Doyon - south waste rock dump. Rapport GREGI 1994-06, mars. Rapport NEDEM 1.14.2f, mars, 1994.

GREGI, 1994-12 (Gélinas, P., Lefebvre, R., Choquette, M., Isabel, D., Locat, J. and Guay, R.). Monitoring and modelling of acid mine drainage from waste rock dumps, La Mine Doyon case study. Rapport GREGI, 1994-12, août, révisé septembre 1994. Rapport NEDEM 1.14.2g, juin, 1994.

- Guay, R., 1993. Development of a modified MPN procedure to enumerate iron oxide bacteria. Final report by EnviroMine Inc., février. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.
- Guay, R., 1994. Diversité microbiologique dans la production de drainage minier acide à la halde sud de la Mine Doyon. Rapport final par Département de Microbiologie, Faculté de Médecine, Université Laval. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.
- Jenne, E.A. (ed.), 1979. Chemical modeling in aqueous systems - speciation, sorption, solubility, and kinetics. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Melchior, D.C. and Bassett, R.L. (eds.), 1990. Chemical modelling of aqueous systems II. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Morin, K., Gerencher, E., Jones, C.E., and Konasewich, D.E., 1991. Critical literature review of acid drainage from waste rock. Rapport NEDEM 1.11.1.
- Norecol Environmental Consultants Ltd., 1991. New methods for determination of key mineral species in acid generation prediction by acid base accounting. Rapport NEDEM 1.16.1c.
- Oshay, T.A. and Hossner, L.R., 1984. The determination of potential acidity of over-burden sediments. Proceedings of Surface Mine Reclamation Workshop, Texas Agricultural Extension Service and Texas A. & M. University, October 9-10, San Antonio.
- Savoie, A, Trudel, P., Sauvé, P., Hoy, L. and Kheang, L., 1991. Géologie de la Mine Doyon (région de Cadillac). Rapport ET 90-05, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.
- SENES Consultants Limited (SENES), 1995. Preliminary review comments by SENES for Chapter 5.0. 25 avril et 22 juin 1995.
- Sobek, A.A., Shuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R.M., 1978. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. Rapport EPA, EPA-600/2-78-054, USEPA, Cincinnati.
- Steffen Robertson and Kirsten (B.C.) Inc., Norecol Environmental Consultants, and Gormely Process Engineering, 1989. Draft acid rock drainage technical guide, Volumes 1 and 2. British Columbia Acid Mine Drainage Task Force Report.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1981. *Aquatic chemistry*, 2nd edn. Wiley Inc., New York.

## **6. MICROBIOLOGIE**

### **6.1 Généralités**

L'objectif de l'étude (énoncé à la page 63 du rapport) sur la diversité microbologique (Guay, 1994) était : “d'évaluer l'influence de la température et des conditions anoxiques sur l'activité des souches bactériennes acidophiles ferroxydantes et thiooxydantes au sein de la halde sud de la mine Doyon.”

Même si des divergences majeures divisent encore les divers scientifiques oeuvrant dans le domaine du drainage minier acide (DMA), quant à l'importance relative des différentes réactions impliquées, il est généralement admis que le lessivage bactérien des minerais sulfureux provient d'un processus complexe auquel participent les bactéries par action directe de catalyse, l'action indirecte des ions ferriques et l'interaction électrochimique des différents minéraux présents sur les sites particuliers. Toutes ces réactions sont interreliées et mènent au DMA qui est un problème majeur de l'industrie minière, lors de l'abandon des parcs à rejets et des parcs à stériles sulfureux.

Les espèces bactériennes *Thiobacillus ferrooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans* ont été associées à la génération de DMA de divers environnements miniers, mais, en fait, c'est plutôt une véritable communauté microbienne qui se développe dans ces environnements perturbés et leur diversité est probablement plus importante que ce que l'on avait d'abord pensé.

L'étude portait sur cette diversité microbienne sous de multiples aspects : analyse microbologique d'échantillons de rognures de forage, analyse microbologique des eaux souterraines, influence de divers paramètres physico-chimiques sur l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique sur des souches de référence et des isolats provenant du site évalué. L'évaluation des paramètres physico-chimiques est particulièrement importante en ce qui concerne la présence ou l'absence d'oxygène, étant donné qu'il est généralement admis que les bactéries ferroxydantes citées sont des aérobies stricts. L'efficacité des stratégies utilisant des barrières sèches ou humides dépend (dans une proportion qui reste à évaluer) du caractère restrictif imposé par l'aérobie obligatoire. La température est un autre paramètre physique qu'il convient d'évaluer en rapport avec la croissance des communautés microbiennes impliquées. Comme espèce, les communautés bactériennes sont limitées à certains écarts de température qui peuvent avoir un effet limitant. Cependant, comme groupe, les bactéries peuvent croître sur une gamme très étendue de températures suivant les températures permises pour chacune des espèces. Des écarts importants de température peuvent donc être, en soi, des facteurs de diversité microbienne.

L'autotrophie des bactéries ferroxydantes ainsi que leurs exigences nutritionnelles particulières limitent très sérieusement l'emploi des techniques conventionnelles d'énumération bactérienne. Le travail, portant sur la description d'une méthode d'énumération des bactéries ferroxydantes, se veut un outil pour permettre l'énumération plus précise de ces bactéries en contournant les principales difficultés reliées à l'usage des milieux solides.

## **6.2 Diversité microbiologique**

### **6.2.1 Isolement et culture des microorganismes à partir des rognures de forage et propriétés physiologiques de croissance des isolats**

Suite au forage du puits d'observation #1 de la halde sud de la mine Doyon, des échantillons (21) de rognures ont été prélevés sur toute la longueur du forage à des intervalles de 1,52 m jusqu'à une profondeur finale de 30,5 m. Afin de vérifier le comportement des souches isolées vis à vis des températures croissantes et pour évaluer le caractère thermophile des isolats, deux méthodologies ont été utilisées. La première méthode a consisté à cultiver des souches isolées à 25°C puis à cultiver sa sous culture positive à une température de 5°C plus élevée que la précédente dans du nouveau milieu de culture (dilution 1/100), procédé qui a été répété jusqu'à une température de croissance atteignant 40°C. La deuxième approche fut l'ensemencement direct de 3,0 g d'échantillon dans du milieu de culture, chaque échantillon étant incubé directement aux températures expérimentées soit : 25, 30, 35, 40 et 45°C.

Les résultats selon la première méthode font état de peu de croissance positive à des températures supérieures à 35°C, résultat surprenant pour l'auteur qui comptait isoler des espèces thermophiles. Par contre, la deuxième approche a permis d'isoler des thermophiles modérés pouvant croître à 40 et 45°C. Selon l'auteur, les vitesses d'oxydation du fer ferreux (critère utilisé pour mesurer l'activité oxydante des isolats) semblent plus élevées chez des souches prélevées dans les 10-12 premiers mètres de forage. Cependant, l'examen des résultats (tableau 4, p.24) montrent une répartition sensiblement uniforme des vitesses d'oxydation.

#### **Points forts de cette section**

Les méthodes d'isolement, de préservation ainsi que de caractérisation des souches se révèlent efficaces pour préserver ce qui semble être les principaux représentants des communautés microbiennes présentes à différents niveaux.

La partie échantillonnage et traitement des échantillons a été bien conduite. La méthode proposée peut même se révéler intéressante pour les scientifiques oeuvrant dans le domaine.

L'utilisation de deux techniques de sous-cultures pour évaluer le caractère mésophile ou thermophile des isolats s'est révélée judicieuse et serait à retenir.

La croissance et l'activité d'oxydation à des températures excédant 42°C, ne sont pas courantes pour des *thiobacilli*. Même si l'identification et la caractérisation des souches n'ont pas été poussées plus loin, la croissance et, à plus forte raison, l'activité microbienne à 45°C seraient significatives. Les espèces responsables seraient plutôt des thermophiles modérés.

### **Points faibles de cette section**

Pour qui souhaite reproduire la technique d'échantillonnage, il est assez laborieux de reconstituer le protocole : il faut puiser les détails un peu dans la section "matériel et méthodes", un peu dans la section écrite des résultats et un peu dans les figures et les tableaux des résultats. La composition de la *solution nutritive à pH 2,0* (p.6) n'est pas décrite dans le rapport. Est-ce de la solution 9K (Silverman et Lundgren, 1959)? Regrouper dans la section "matériel et méthodes", tous les détails pertinents contribuerait à augmenter l'accessibilité à ces techniques.

Tel que mentionné précédemment, les méthodes d'échantillonnage de culture ont été choisies judicieusement et bien conduites. Toutefois, il conviendrait de modifier la deuxième approche de façon à pouvoir isoler des espèces thermophiles qui seraient vraisemblablement perdues par dilution au cours de la première série de sous-cultures. Quoique les raisons fournies pour expliquer l'absence de thermophiles modérés semblent satisfaisantes, il aurait été intéressant d'isoler aussi les souches thermophiles et d'en évaluer la contribution dans l'activité oxydante totale.

### **6.2.2 Analyse microbiologique des eaux souterraines**

Cette analyse a été menée sous deux aspects soit l'échantillonnage proprement dit des eaux souterraines et la mise en culture des isolats provenant des puits #1, #2, #4, #6 et à des profondeurs variant entre 30,5 et 42,5 m. Cette collecte d'échantillons se faisait concurremment avec une évaluation de la colonisation préférentielle de quatre types de minéraux : pyrite, sphalérite, chalcopryrite et soufre élémentaire. Pour ce faire, un dispositif de "pièges à bactéries" a été mis au point. Des dispositifs ont été laissés en place pendant une période de 40 jours au terme desquels ils ont été retirés des puits. Une série de fragments de chacun des minéraux ont été traités dès leur sortie des puits pour la microscopie électronique à balayage et le reste des fragments de même que les eaux souterraines retenues ont été gardés pour une analyse microbiologique.

Les résultats de cette section concernent plus la colonisation de différents substrats, telle que détectée par la microscopie à balayage. Des tableaux (Tableau 5 et Tableau 6) regroupent les observations de l'auteur. A partir des photos, l'auteur conclut qu'une certaine diversité microbiologique est présente dans les eaux souterraines puisqu'il y a plusieurs types morphologiques observés. Il y aurait présence de bactéries dont la forme et les dimensions seraient typiques des thiobacilles sur la pyrite, la chalcopryrite et le soufre dans le puits #1 et dans le puits #4. Dans ce dernier puits, la sphalérite serait aussi un substrat, selon le texte, mais il y a une mention de colonisation incertaine pour le même substrat au même puits, si l'on consulte le Tableau 6.

### **Points forts de cette section**

Le dispositif de pièges à microorganismes est innovateur et peut se révéler un outil intéressant pour d'autres types de sites à échantillonner. La technique a permis de simuler des conditions de colonisation sur différents



substrats et d'isoler des échantillons d'eaux souterraines, en préservant le mieux possible la diversité des communautés microbiennes présentes. Il y a donc un effort louable en ce sens qui a été fait.

### **Points faibles de cette section:**

Il n'est pas fait mention si les divers minéraux introduits dans les pièges à bactéries avaient été préalablement stérilisés ni s'ils avaient déjà subi une amorce d'oxydation.

Les résultats notés ++++ présentent effectivement l'aspect de surfaces colonisées par des microorganismes, certains permettent de penser, tout comme l'affirme l'auteur, qu'il pourrait y avoir plus d'un type bactérien d'adsorbé. On peut toutefois se demander pourquoi des photos d'aspects très différentes (puits #2-E sur pyrite et puits #4-K sur pyrite aussi) sont notées comme semblables, les échelles de grossissement sont peut-être à l'origine des différences. Puisqu'il s'agit d'une étude comparative, il aurait été souhaitable que ces photos soient un peu plus commentées. Il n'est pas clair non plus, à l'échelle présentée, qu'il y a colonisation sur chalcopyrite au puits #4-I.

Toutefois, la possibilité que certaines structures ressemblant à des bactéries résultent plutôt d'une cristallisation de l'hydroxyde de fer sous forme de globules à bas pH (v.g figure 9-A), n'est pas abordée ni dans les résultats (pas de témoins abiotiques) ni dans la discussion. Tout au plus, le puits #6-N (pyrite) est noté incertain quant à la colonisation bactérienne, alors que le puits #6-M (chalcopyrite) est noté colonisation faible. La différence, d'après les photos, n'est vraiment pas évidente.

La diversité biologique y est abordée et les résultats présentés rendent compte des efforts déployés pour préserver une éventuelle diversité microbienne qui aurait pu être présente sous deux aspects: plus d'un type bactérien et pléomorphisme de *T. ferrooxidans*. Contrairement à ce qui est écrit (p.37), le pléomorphisme de *T. ferrooxidans* est décrit à l'annexe II au lieu de l'annexe I.

Les microphotographies mentionnées ci-dessus sont les seules fournies, quant à la diversité des isolats provenant des eaux souterraines. La variabilité morphologique décrite aurait été observée à partir de ces microphotographies. Les différents caractères morphologiques décrits, dans le texte et illustrés aux annexes I à IV, sont en fait un exercice d'association entre des structures déjà décrites (annexes I à IV) et des observations disponibles sur les microphotographies présentées. Peut-être que les épreuves originales sont plus convaincantes, mais d'après les photos disponibles dans le rapport, et qui sont quant même d'une qualité acceptable, il n'y aurait que les dimensions et la forme globale (bâtonnet, spirale, etc. ) qui puissent être comparées. Dans ces conditions, la nature des microorganismes est plus une estimation qu'une identification formelle. Un sommaire des caractéristiques physico-chimiques de chaque point d'échantillonnage, en parallèle avec les espèces suspectées adsorbées sur les minéraux de même les espèces estimées présentes dans les eaux souterraines, auraient facilité la compréhension globale de la dynamique des communautés présentes à ces sites.

L'auteur rapporte (p.35) que ses résultats sur la diversité microbiologique des environnements hostiles, tels les eaux souterraines, vont à l'encontre des conclusions de plusieurs chercheurs qui avaient trouvé que ces environnements étaient colonisés par des communautés bactériennes relativement uniformes. Étant donné que

ces auteurs ne sont pas mentionnés, il est difficile de vérifier cette affirmation. Toutefois, la diversité serait plus typique d'un vrai système écologique même dans cet environnement hostile. D'ailleurs, des références classiques et récentes le confirment : Brierley (1978), Harrison (1984), Hutchins et al. (1986) et Schippers et al. (1995).

La numération bactérienne a été réalisée par une technique modifiée du nombre le plus probable (NPP). La référence citée (*Laflour et coll., 1993*), (cf. p.15) n'apparaît pas dans la liste des références. Cette technique est décrite dans un rapport séparé commenté dans la section 6.4 du présent document.

Le tableau 1 et non pas le tableau 7 (coquille à la page 13) donne la composition chimique de l'eau souterraine au puits #4 qui a été utilisée pour confectionner les milieux de culture. L'utilisation d'une eau provenant d'un milieu naturel, pour isoler les souches indigènes des eaux souterraines, est une bonne pratique. Cependant, cette eau n'est pas bien caractérisée. En effet, seulement quatre paramètres physico-chimiques (pH, potentiel rédox, conductivité et densité) ont été directement mesurés. Les teneurs en ions ont été calculées à partir de corrélations qui ne sont pas fournies. Des mesures directes des concentrations en ions auraient été grandement préférables. De plus, les concentrations en sels de base (phosphate, potassium et ammonium) non pas été spécifiées pas plus que la limite de solubilité du dioxyde de carbone (source de carbone des bactéries autotrophes) dans cette eau fortement minéralisée.

On peut également se demander pourquoi l'eau souterraine qui a servi à confectionner le milieu de culture ne provient pas du puits #1? En effet : "*le caractère ferroxydant des souches n'a été observé que dans le puits #1*" et l'on mentionne que : "*les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines étaient fort différentes les unes des autres.*" (p. 25).

### **6.2.3 Influence de substrats énergétiques et de la température sur l'oxydation microbienne de l'ion ferreux**

Ces séries d'expériences avaient pour but d'évaluer le potentiel d'oxydation des bactéries indigènes au site, soit les bactéries isolées des eaux souterraines (cf. section précédente) vis à vis le fer ferreux, lorsque mises en présence de sulfate ferreux, de soufre élémentaire et de pyrite des substrats énergétiques possiblement présents dans la halde. Il est mentionné, dans la section "méthode", que l'activité métabolique sur divers substrats sulfurés a été mesurée par l'acidification des milieux de culture ou par la détermination des concentrations résiduelles de  $\text{Fe}^{+2}$  par dosage volumétrique. La section "résultats", toutefois, ne montre que des mesures de fer ferreux et ne fait pas état du pH. L'inoculum utilisé était constitué du volume d'eau souterraine prélevé de chaque puits et ajouté à quatre volumes d'une solution stérilisée de sels de base (milieu 9K sans sulfate ferreux). Le Tableau 7, qui comporte une numération bactérienne correspondant aux substrats testés et aux différentes températures d'incubation, vient ajouter de la crédibilité à la possibilité d'oxydation à médiation microbiologique.

### **Points forts et points faibles de cette section**

Cette série d'expériences aurait besoin d'une clarification sur le plan méthodologique. Est-ce que le témoin était constitué d'un volume d'eau stérilisée par filtration auquel on avait ajouté 4 volumes de solution 9K (sans sulfate ferreux)? Une faible activité d'origine bactérienne pourrait quand même être observée d'un tel témoin : une enzyme, soit d'origine extracellulaire (le plus probable), soit provenant de la lyse des bactéries, pourrait, possiblement, subsister dans le filtrat en quantité très faible mais suffisante pour être détectée. En ce sens, le témoin ne serait pas, à proprement parler, vraiment abiotique. L'auteur semble conscient de ce fait puisqu'il mentionne : "*Nous avons pu constater de plus qu'une certaine activité réductrice chimique et même biologique vis à vis le fer pouvait se produire dans les milieux de culture utilisés (ensemencés ou stériles)*", (page 38). D'un point de vue microbiologique, ce témoin-milieu était nécessaire, mais il ne semble pas constituer un témoin abiotique parfait pouvant rendre compte de l'activité chimique du système matière-en-place indépendamment de toute activité biologique. Il faut préciser toutefois que l'activité d'origine microbiologique pouvant, être présente dans les témoins, est très minime comparé à celle des essais et il est raisonnable de penser que la différence peut être significative.

Pour cette série d'expériences, l'activité microbiologique n'a été mesurée que par l'oxydation du fer ferreux. L'altération du soufre et de la pyrite n'ont malheureusement pas été quantifiés. Un déclin rapide de fer ferreux signifie que le substrat sulfuré est oxydé lentement d'où un faible ratio fer ferreux/fer ferrique. Le  $Fe^{+2}$  est un substrat "facile" pour *T. ferrooxidans*. Les quantités de soufre élémentaire ou de pyrite ajoutées aux essais inoculés (fig. 11B-C, 12B-C, 13B-C, 14B-C et 15 B-C) ne sont pas spécifiées.

Les témoins stériles montrent une augmentation de la concentration en fer ferreux, en particulier à la plus haute température (42 °C), cela suggère des pertes par évaporation. Même si la corrélation entre un nombre de microorganismes et l'activité oxydante n'est pas parfaite, cette série d'expériences a le mérite de montrer que le  $Fe^{+2}$  peut être oxydé en présence de microorganismes. Cependant, cela n'est pas un fait nouveau.

### **6.3 Respiration anaérobie par *Thiobacillus Ferrooxidans***

Des isolats provenant d'eaux souterraines du puits #4 ont été mis en culture en présence et en absence d'oxygène, cette dernière caractéristique constituant une façon de simuler des conditions de terrain sous 30 m de stériles miniers. Lorsque le fer ferreux a été complètement oxydé en aérobiose, du soufre élémentaire ou de la pyrite stérile a été introduit aseptiquement dans les flacons, lesquels ont été introduits sous incubation stationnaire, en condition d'anaérobiose. La croissance microbienne a aussi été évaluée, de même que le pH.

Les résultats les plus importants, selon l'auteur du rapport, seraient la mise en évidence de respiration anaérobie par un isolat contenant un mélange non défini de souches acidophiles à activité ferroxydante. En présence de soufre élémentaire, l'auteur a déterminé des taux de réduction anaérobie du  $Fe^{+3}$  de 85 mg/L\*h pour une souche de collection (ATCC 13661) et de 55 mg/L\*h pour les bactéries indigènes. Les figures 16 et 17 du rapport

présentent les cycles d'oxydation aérobie du  $\text{Fe}^{2+}$  et de réduction anaérobie du  $\text{Fe}^{3+}$ , en présence de soufre élémentaire, pour la culture pure et la culture mixte. Il aurait été intéressant d'ajouter à ces figures l'évolution du pH de même que le comportement du témoin. Pour les figures 16 et 17, il faut noter une erreur dans les unités de l'axe vertical : la concentration en  $\text{Fe}^{2+}$  est en g/L et non pas en mg/L.

L'auteur du rapport mentionne que la présence de soufre élémentaire comme intermédiaire dans l'oxydation de la pyrite n'a pas été mise en évidence (p. 57). En présence de pyrite, la réduction anaérobie n'a pas donné de résultats reproductibles. Un taux approximatif de 25 mg/L\*h a été avancé. Il aurait été intéressant de fournir les résultats expérimentaux bruts à ce sujet.

### **Points forts et points faibles de cette section**

Dans cette section, également, une clarification méthodologique serait souhaitable : la composition du milieu, telle que décrite dans la section «matériel et méthodes» (p.15), serait de : *“100 ml d'eau souterraine provenant du puits #4 et stérilisée par filtration, à laquelle on aurait ajouté du sulfate ferreux à une concentration finale de 11,5 g/L et du sulfate d'ammonium à raison de 3 g/L.”* Alors que pour la même expérience, on décrit dans la section «résultats» (page 56) : *“Les résultats obtenus lors de la croissance de T. ferrooxidans ATCC 13661 et des isolats bactériens provenant du puits #4 sur un milieu de culture constitué de 4 volumes de milieu 9K auquel était additionné un volume d'eau souterraine stérilisée sont présentés aux Figures 16 et 17”.* Comme nous l'avons déjà mentionné, la composition chimique de l'eau souterraine illustrée au Tableau 1 comporte un certain nombre de paramètres calculés à partir de courbes de corrélation dont ni la provenance ni la légitimité ne sont discutées.

La même discussion que l'expérience précédente (section 6.2.3) s'applique quant au témoin. La présence d'un témoin abiotique crédible permettant de mesurer ce qui est activité chimique et ce qui est activité microbiologique semble incontournable. Or, si le témoin en aérobie peut être acceptable, il en va tout autrement du même témoin placé en anaérobie. Un témoin plus conforme au système-milieu en anaérobie serait de filtrer une partie de la culture en aérobie de façon à enlever les cellules bactériennes et les précipiter d'hydroxyde de fer présents avant de commencer le premier cycle en anaérobie. Ce témoin ne constituerait pas un témoin abiotique parfait pour les raisons mentionnées précédemment, mais il permettrait d'effectuer, au moins, une estimation de l'activité du système en absence de bactéries en condition d'anaérobie et de grande disponibilité de fer ferrique et de soufre ou de pyrite.

La relative stabilité de la taille de la population bactérienne n'est pas discutée (accroissement de 10 %). Est-ce que la population est en phase stationnaire et que le cycle anaérobie est plus un mécanisme d'adaptation qu'une voie métaboliquement utile pour la production d'énergie? Ou bien, est-ce que les conditions restrictives du milieu ne permettaient pas une croissance significative de la communauté? Il serait logique que pour ces bactéries longtemps décrites comme des aérobies stricts, la respiration anaérobie soit un mécanisme adaptatif permettant d'obtenir une certaine quantité d'énergie de façon à survivre, il serait alors normal que le temps de génération en anaérobie soit plus long.

L'étude de la respiration anaérobie repose uniquement sur la transformation du  $\text{Fe}^{+2}$  en  $\text{Fe}^{+3}$  (dernier paramètre qui en fait n'est pas mesuré) et sa reformation théoriquement à partir d'électrons arrachés au soufre élémentaire ( $\text{S}^{\circ}$ ). L'absence de réaction similaire chez le témoin laisserait supposer que la réaction est totale et complètement à médiation microbienne. Le modèle est attrayant, mais les résultats montrés ne permettent pas de conclure hors de tout doute.

La respiration anaérobie sur le soufre élémentaire a bien été décrite chez les auteurs cités (p.61), par contre, la capacité de respiration anaérobie de *T. ferrooxidans* sur la pyrite est sujet à plus de controverses. Certaines études comme Suzuki et al. (1990) et Sugio et al. (1992) ont montré une réduction anaérobie du  $\text{Fe}^{+3}$  en présence de pyrite; malheureusement, ces études n'ont pas utilisé de témoins stériles. Ainsi, on ne peut distinguer, dans leurs résultats, la contribution des bactéries aux phénomènes d'oxydoréduction purement chimiques. Lizima et Suzuki (1989) ont effectué un essai anaérobie en cuve de réduction du  $\text{Fe}^{+3}$  en présence de pyrite. Pour cet essai, la présence des bactéries a permis de doubler la production de  $\text{Fe}^{+2}$  après 100 minutes par rapport à la lixiviation indirecte (phénomène abiotique). Puisque le  $\text{Fe}^{+2}$  additionnel doit provenir de l'altération de la pyrite, la contribution de *T. ferrooxidans* est démontrée. Ces auteurs mentionnent qu'ils n'ont pas étudié en détail la réduction bactérienne du  $\text{Fe}^{+3}$  en présence de pyrite; si bien que l'équation de vitesse et les paramètres cinétiques n'ont pas été déterminés. Cependant, un doute subsiste quant à l'origine du fer ferreux supplémentaire observé en présence des bactéries : Pourrait-il provenir de l'inoculum?

### **Commentaires généraux sur le rapport**

Les résultats de l'ensemble du rapport sur la diversité sont, dans l'ensemble, intéressants. Mais le lecteur reste sur son appétit au niveau de leur interprétation ainsi que de leur signification par rapport aux travaux antérieurs. Certains d'entre eux, même si intéressants, sont en fait des résultats préliminaires et il y aurait lieu de les poursuivre (v.g. l'identification et la caractérisation des isolats).

Le modèle représenté à la Figure 18 est intéressant et constitue un louable effort de synthèse pour poser la problématique en terme d'activité ferroxydante à différents niveaux de la halde sud de la Mine Doyon. Cependant, nous ne croyons pas qu'il y ait présence de soufre élémentaire en quantités appréciables dans cette halde. En effet, l'annexe V, p. 70, présente les caractéristiques minéralogiques des rognures de forage du puits #1: on note l'absence du soufre élémentaire. De plus, il est bien connu (Silverman, 1976; Dutrizac et MacDonald, 1974; et Lowson, 1982) que très peu de soufre élémentaire est produit lors de l'oxydation de la pyrite.

## **6.4 Technique du NPP modifiée**

### **6.4.1 Problématique présentée**

Il s'agit essentiellement de l'adaptation de techniques déjà existantes (microméthodes) et d'un test utilisé couramment comme test présomptif (*presumptive test*) pour la détection des coliformes dans l'eau : la méthode du nombre le plus probable (NPP) de coliformes présents dans l'eau analysée. La méthode du nombre le plus probable se veut un calcul statistique basé sur une estimation de la taille d'une population bactérienne à partir de dilutions et du nombre de réplicats positifs pour chaque dilution. Les résultats sont ensuite lus à partir de tables standards (American Public Health Association, 1976).

L'auteur (Guay, 1993) affirme, et avec raison, que l'autotrophie de *Thiobacillus ferrooxidans* limite très sérieusement l'utilisation des techniques conventionnelles développées principalement pour les hétérotrophes. L'auteur énumère les principales approches utilisées antérieurement pour contourner cette difficulté et en arriver à une estimation de la taille d'une population. Un ensemble de techniques sont donc citées, lesquelles peuvent être classées en deux catégories suivant qu'elles détectent de la matière ou biomasse (comptage direct dans la chambre de Petroff-Hausser, la plupart des techniques immunologiques de détection du matériel *in situ*, et toutes les techniques de détermination de la biomasse) ou des cellules viables (dilutions sur agar et membranes filtres sur agar, etc.). Chacune de ces approches comporte ses lacunes. Le manque de spécificité et la faible corrélation avec la viabilité des cellules limitent l'usage des méthodes de détection de la biomasse, alors que le faible recouvrement sur milieu solide constitue la principale difficulté pour la détection des cellules viables.

L'auteur explique l'inefficacité relative des milieux de culture solides pour la mise en évidence du nombre d'unités viables par la toxicité relative des substances gélifiantes employées (agar). Il semble y avoir consensus, sur ce point, et dans la littérature citée et dans d'autres articles non cités traitant du même sujet.

Les problèmes inhérents à la détection adéquate des cellules viables de *T. ferrooxidans* dépendraient donc de la non disponibilité de milieu de culture solide pouvant supporter efficacement la croissance de *T. ferrooxidans*, et de la précision relative des techniques employées.

#### **6.4.2 Solution proposée**

Tenant compte de la problématique exposée, l'auteur propose la technique suivante :

1. Détection des cellules viables en milieu liquide;
2. Augmentation de la précision et de la fiabilité de la technique de NPP en l'adaptant sous forme de microtechnique, ce qui représente deux avantages majeurs par rapport à la technique originale:
  - Augmentation de la précision de la méthode par l'emploi d'instruments plus précis propres aux microtechniques (techniques sérologiques, ELISA etc.), et par l'utilisation de plus petits volumes, ce qui peut aussi augmenter la précision lors de dilutions sériées;

- Surtout augmentation du nombre du réplicats, ce qui améliore grandement la fiabilité de la méthode par rapport à la technique originale.
3. Vérification de la technique par comptage direct et par détection des cellules viables selon la technique de dilutions sur pétris.

Pour cette dernière partie, un agent gélifiant très purifié a été utilisé : Type I, low EEO agar de Sigma, qui devrait plutôt se lire Type I low EEO agarose. L'usage de l'agarose, au lieu de l'agar, serait plus approprié, d'après la littérature consultée, et expliquerait la contradiction entre la toxicité décrite lors de l'emploi de certains types d'agar et l'augmentation de ce qui semble être précisément cette même substance toxique dans leur milieu de culture. La référence citée (*Johnson et al., 1987*) mentionne bien agarose type I.

#### **6.4.3 Résultats et discussion présentés**

L'auteur présente d'abord la numération bactérienne de ses trois suspensions-mères, lesquelles auraient été diluées de façon à ce que le nombre de bactéries présentes soit compris entre 18 et  $2 \times 10^4$  cellules. Puis de ces suspensions diluées, la technique du NPP a été appliquée, laquelle a été contrôlée par d'autres comptages en chambres Petroff-Hausser et par la méthode de dilutions sur pétris. La corrélation semble assez bonne pour deux souches testées sur trois parmi les *thiobacilli* testés. Les explications fournies semblent pertinentes. Toutefois, la discussion, et d'une manière générale, tout ce qui concerne les milieux de culture est très laborieux à suivre et à déchiffrer à travers la littérature citée. En fait, l'auteur relate trop succinctement des considérations pertinentes dont il a fort justement tenu compte, mais qui ne sont pas mentionnées dans ce rapport : toute la question du choix de l'agarose au lieu de l'agar, le choix des milieux eux-mêmes qui semble judicieux, mais il faut consulter plusieurs articles pour comprendre les raisons de ce choix. L'auteur mentionne qu'il faut user de précautions avec des isolats provenant de l'environnement à cause de la contamination possible par des microorganismes hétérotrophes. Fort probablement que le milieu FeTSB est plus visé par ce problème, étant donné qu'il contient du bouillon tryptone lequel est plus apte à permettre la croissance d'organismes plus exigeants sur le plan nutritionnel que les milieux strictement minéraux.

Dans la présentation de résultats, les variations présentées sont-elles des maxima d'écart ou ont-elles une valeur d'écart-type? Les coefficients de régression ont été calculés suivant quelle méthode? Par estimation de conformité avec les limites des deux méthodes ou par une méthode statistique particulière?

#### **6.4.4 Commentaires généraux sur le rapport**

Le choix de la technique du NPP pour détecter des populations bactériennes de *T. ferrooxidans* n'est pas nouveau. Cette technique a déjà été utilisée par Johnson et al. 1987 (référence #4 du rapport), toutefois, sans les adaptations proposées par l'auteur, cette méthode est laborieuse et nécessite plusieurs réplicats pour être



précise. Cette difficulté semble contournée par la technique proposée. Cependant, un autre inconvénient persiste: dans une population mixte provenant de l'environnement, toutes les populations pouvant oxyder le fer seront détectées et pas seulement *T. ferrooxidans*. Néanmoins, la technique décrite semble intéressante pour quantifier des cellules viables à activité ferroxydante; et ce, dans un temps plus court.

Par sa forme, ce rapport ressemble plus à un article scientifique soumis pour fin de publication. Dans ce contexte, il pourrait être normal que l'on doive se référer aux articles cités à la bibliographie pour un complément d'information. Cependant, étant donné qu'il s'agit d'un rapport mis en vente destiné à des scientifiques et pas nécessairement à des microbiologistes, susceptibles d'utiliser cette technique, il serait souhaitable que le document soit complet par lui-même et qu'il puisse permettre de reproduire la technique sans devoir recourir à d'autres sources. Une description du matériel et des techniques de dilutions, de la composition des milieux, de la méthode adaptée de lecture des résultats ainsi qu'une table de référence pour interpréter les résultats du NPP, rendraient ce rapport plus attrayant pour un usager éventuel de cette technique.

## **6.5 Nouvelles connaissances fournies par les travaux**

L'auteur aurait observé plusieurs types morphologiques différents en surface de la halde et dans les eaux souterraines. La diversité serait aussi plus importante que décrit précédemment sur les différents minéraux immergés dans les eaux souterraines. Tel que mentionné précédemment, il serait logique effectivement qu'une certaine diversité microbienne soit présente dans un environnement hostile, pauvre et perturbé mais en pleine colonisation par des espèces pionnières microbiennes adaptées à cet habitat. Encore faut-il que toutes ces bactéries annoncées à la surface des minéraux, en soient effectivement. De plus, ce n'est peut-être pas la réalité de la diversité en elle-même que le raffinement des méthodes de collection et de culture des microorganismes qui permet de les mettre en évidence. Dans ce sens le système des pièges à bactéries est intéressant et novateur. Les méthodes d'échantillonnage et de culture en deux techniques aussi.

Par contre, la section respiration anaérobie n'a de nouveau que d'être observée pour des communautés bactériennes indigènes possiblement mixtes. Mais le procédé lui-même avait déjà été décrit par les auteurs cités pour des souches de référence et dans des conditions semblables à celles employées, mesurant le même paramètre.

Le fait que des microorganismes isolés à partir de rognures de forage aient la propriété de croître d'abord, puis d'oxyder le fer ferreux à 45°C alors que selon les travaux antérieurs cette activité décroissait rapidement après 40°C, serait nouveau, selon l'auteur. En fait, la nouveauté pourrait être plus grande que soupçonnée, s'il s'avérait que les bactéries impliquées sont des *thiobacilli* mésophiles plutôt que des thermophiles modérés: la température limite de 45°C semble être un point de non retour pour beaucoup d'espèces bactériennes mésophiles. Les souches mésophiles pouvant croître à 45°C, le peuvent parfois grâce à des gènes spéciaux portés par des plasmides (information génétique indépendante de l'ADN chromosomique bactérien) et pouvant,

dans certains cas, être transférés à une autre bactérie. La présence d'un tel plasmide chez les espèces acidophiles de *thiobacilli* serait juste ce qu'il faut pour compliquer le problème un peu plus.

L'adaptation de la technique du nombre le plus probable en microtechnique constitue une amélioration sensible pour faire la numération des bactéries chimiolithotrophes acidophiles. Cette technique modifiée permet d'utiliser moins de matériel biologique pour fin d'analyse et augmente sensiblement la précision de la méthode à cause des instruments propres aux microtechniques qui sont remarquablement précis. Cette technique permet aussi de réduire le temps-technicien lors du premier jour de la technique.

La figure synthèse (#18) du document sur la diversité microbiologique, constitue une première tentative intéressante pour mettre en parallèle les phénomènes mis en jeu; et ce, à différents niveaux.

## **6.6 Application de nouvelles connaissances**

Les nouvelles connaissances décrites dans la section 6.5 nous aident à poser la problématique, en termes plus précis, en ce qui a trait aux divers mécanismes mis en jeu à différents niveaux. Certains résultats présentés sont des résultats préliminaires sur des communautés mixtes non caractérisées, toutefois ces résultats montrent que dans un système complexe comme la halde sud, les choses ne sont pas aussi simples que d'éliminer une espèce bactérienne en lui coupant simplement l'oxygène. Cependant, il est clair que la production du DMA ne cesse pas immédiatement, si l'on recouvre la halde sud par une barrière étanche à l'oxygène. En effet, la lixiviation indirecte par les ions ferriques et la respiration anaérobie sur la pyrite (si elle existe) vont simultanément continuer par produire du DMA. Lorsque tout le fer ferrique aura été réduit à l'état ferreux par ces deux mécanismes, la production de DMA va cesser; puisqu'en absence d'oxygène, le  $Fe^{+2}$  ne pourra être réoxydé en  $Fe^{+3}$  (agent oxydant pour la lixiviation indirecte et accepteur d'électrons pour la respiration anaérobie).

## **6.7 Études ultérieures et coûts associés**

Il nous apparaît donc utile d'isoler et de caractériser les souches provenant des rognures de forage et pouvant croître à une température supérieure ou égale à 45°C. Il serait aussi nécessaire d'isoler et d'identifier formellement les souches provenant des eaux souterraines et d'évaluer de façon convaincante la respiration anaérobie en présence de pyrite.

A cet effet, le choix du  $Fe^{+2}$  comme unique paramètre servant à mesurer l'activité de la souche, l'oxydation du fer et sa réduction ultérieure à partir d'un substrat, nous paraît interrogeable. En effet, l'oxydation du fer ferreux et la réduction du fer ferrique sont impliquées tant dans les réactions spontanées (chimiques) que dans les réactions à médiation enzymatique d'origine microbienne, il y aurait lieu de rechercher un autre paramètre pour mesurer l'activité propre des microorganismes. Une alternative est de soustraire des résultats obtenus en

présence de bactéries, la contribution d'origine purement chimique (lixiviation indirecte) dont la cinétique aurait été déterminée au préalable.

Lorsque la respiration anaérobie à partir de la pyrite aura été démontrée de façon convaincante, il faudra évaluer sa cinétique (équation de vitesse et paramètres cinétiques incluant l'influence de la température), afin de pouvoir estimer sa contribution dans l'état actuel du système et sa contribution potentielle lors d'une modification du système visant à couper l'oxygène pour contrer le DMA. Une simulation numérique globale du site, intégrant les cinétiques de la lixiviation indirecte et de la respiration anaérobie ainsi que les effets thermiques, serait nécessaire à ce sujet. Une telle simulation permettrait de prédire l'intervalle de temps requis, avant que ne cesse la production du DMA, après l'installation d'une barrière étanche à l'oxygène.

D'un point de vue plus fondamental, il sera aussi intéressant de déterminer les voies métaboliques impliquées dans les phénomènes de respiration anaérobie sur le soufre élémentaire et la pyrite (le cas échéant) lesquelles sont peu abordées dans la littérature citée.

Trois études seraient donc à réaliser afin de saisir l'impact de la microbiologie sur le processus de DMA à la halde sud de la mine Doyon. Les résultats escomptés ainsi que coûts approximatifs pour la réalisation de trois études sont présentés au tableau 6-1.

## **6.8 Résumé**

Le dispositif d'échantillonnage du type «piège à bactéries» constitue une approche innovatrice pour la récupération *in situ* de microorganismes.

La technique d'isolation en deux approches (sous-cultures avec gradient de thermique et incubation directe à différentes températures) est également nouvelle.

La technique du «nombre le plus probable» pour quantifier les cellules viables de *T. ferrooxidans* n'est pas nouvelle. Cependant, les adaptations microméthodes proposées par l'auteur contribuent à rendre la technique plus systématique, plus précise et plus fiable. Néanmoins, un inconvénient persiste : la méthode ne peut discriminer entre les différentes espèces ferroxydantes. La méthode demeure également assez longue (environ 10 jours).

Plusieurs éléments du rapport sur la diversité microbiologique sont, en fait, des résultats préliminaires. L'identification des espèces, ayant colonisé les différents substrats solides, n'est basée que sur la morphologie des microorganismes, aucun test biochimique plus poussé n'a été effectué pour confirmer l'identification présumée. L'auteur mentionne (p. 63) qu'il a, au moins à deux reprises, cru repérer la thermophile modérée *sulfobacillus thermosulfidooxidans*. Cependant, les espèces thermophiles n'ont pas été isolées par aucune des deux approches de culture. Les résultats sur la respiration anaérobie de *T. ferrooxidans* et d'une population

mixte indigène au site, en présence de pyrite et de fer ferrique, sont intéressants mais incomplets. La quantification de la contribution purement chimique du phénomène, la détermination d'un témoin abiotique crédible et la reproductibilité des résultats sont des éléments fondamentaux à élucider.

Le cas échéant, la cinétique (équation de vitesse et paramètres cinétiques) de même que les voies métaboliques de ce phénomène restent à déterminer.

**Tableau 6-1**  
**Coûts approximatifs des études microbiologiques**

<b>Priorité</b>	<b>Recherche</b>	<b>Coûts</b>
<b>I</b>	<b>Identification souches rognures de forage et eaux souterraines</b>  La littérature n'est pas convainquante sur l'existence de ce phénomène. Si le fer ferrique peut agir comme accepteur d'élection, l'élimination de l'oxygène (barrière de recouvrement) n'arrêtera pas instantanément la production du DMA. Cependant, lorsque tout le fer ferrique aura été réduit en fer ferreux la production de DMA va cesser. Il faut connaître la cinétique de ce phénomène afin de pouvoir prédire l'intervalle de temps requis pour que la production du DMA soit stoppée (mois ou années).	<b>\$70 000</b>
<b>II</b>	<b>Cinétique respiration anaérobie <i>T. ferrooxidans</i></b>  La connaissance des voies métaboliques est intéressante d'un point de vue scientifique et elle peut permettre d'identifier des moyens pour lutter contre le phénomène de respiration anaérobie (s'il existe).	<b>\$40 000</b>
<b>III</b>	<b>Voies métaboliques respiration anaérobie</b>  La contribution des espèces thermophiles à la production du DMA est importante à qualifier versus la contribution des espèces mésophiles. L'identification formelle des espèces associées au DMA est relativement coûteuse, puisqu'elle implique une campagne d'échantillonnage dur le site.	<b>\$50 000</b>

Il faut noter, que les commentaires présentés dans ce chapitre réfèrent uniquement au contenu des rapports GREGI soumis au NEDEM (voir Introduction Tableau 1-1). Ces commentaires ont pour but de fournir les éclaircissements ou à apporter les nuances favorisant la compréhension des lecteurs qui utiliseront ces rapports.

Soulignons que des commentaires et des précisions de nature méthodologique transmises par l'équipe du GREGI mais qui n'apparaissent pas dans les rapports NEDEM, fournissent des éclaircissements quant aux travaux réalisés.

## **6.9 Références**

- American Public Health Association inc., 1976. Standard methods for the examination of water and wastewater. 14th ed., N.Y.
- Brierley, C.L., 1978. Bacterial leaching. CRC Critical reviews in microbiol., 5:207-262.
- Dutrizac, J.E. and MacDonald, R.J.C., 1974. Ferric iron as a leaching medium. Minerals Sci. Engng., 6: 59-100.
- Guay, R., 1993. Development of a modified MPN procedure to enumerate iron oxidizing bacteria. Final report by EnviroMine Inc., February. MEND report 1.14.2.
- Guay, R., 1994. Diversité microbiologique dans la production de drainage minier acide à la halde sud de la mine Doyon. Rapport final par Département de microbiologie, Faculté de médecine, Université Laval, Mars. MEND report 1.14.2, March, 1994.
- Harrison, A.P. Jr., 1984. The acidophilic *thiobacilli* and other acidophilic bacteria that share their habitat. Ann. Rev. Microbiol., 38:265-292.
- Hutchins, S.R., Davidson, M.S., Brierley, J.A. and Brierley, C.L., 1986. Microorganisms in reclamation of metals. Ann. Rev. Microbiol., 40:311-336.
- Johnson, D.B., Macvicar, J.H.M. and Rolfe, S., 1987. A new solid medium for the isolation and enumeration of *Thiobacillus ferrooxidans*. J. Microbiol. Methods, 7:9-18.
- Lizama, H.M. and Suzuki, I., 1989. Rate equations and kinetic parameters of the reactions involved in pyrite oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*. Appl. Environ. Microbiol., 55: 2918-2923.
- Lowson, R.T., 1982. Aqueous oxydation of pyrite by molecular oxygen. Chem. Rev., 82:461-497.
- Schippers, A., Hallmann, R., Wentzien, S. and Sand, W., 1995. Microbial diversity in uranium mine waste heaps. Appl. Environ. Microbiol. 61:2930-2935.
- Silverman, M.P., 1967. Mechanism of bacterial pyrite oxydation. J. Bacteriol., 94: 1046-1051.
- Silverman, M.P., Lundgren, D.G., 1959. Studies on the chemautotroph iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans* - an improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yield. J. Bacteriol., 77:642-647.
- Sugio, T., White, K.J., Shute, E., Choate, D. and Blake II, R.C., 1992. Existence of a hydrogen sulfide: ferric iron oxidoreductase in iron-oxidizing bacteria. Appl. Environ. Microbiol., 58: 431-433.
- Suzuki, I., Takeuchi, T.L., Yuthasastrakosol, T. D. and Oh, J.K., 1990. Ferrous iron and sulfur oxidation and ferric iron reduction activities of *Thiobacillus ferrooxidans* are affected by growth on ferrous iron, sulfur, or sulfide ore. Appl. Environ. Microbiol., 56: 1620-1626.

## 7. MODÉLISATION PRÉDICTIVE

### 7.1 Généralités

Les modèles prédictifs sont basés sur des concepts et des hypothèses sous-jacents concernant les mécanismes de la génération d'acide dans la roche stérile et ils utilisent des relations mathématiques comme représentations abstraites des importants processus physiques, géochimiques et biochimiques contrôlant la génération d'acide. Depuis 1988, le programme de Neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier (NEDEM) a supporté la recherche afin de fournir une base scientifique, technique et économique détaillée pour prédire avec confiance les exigences de la gestion à long terme des résidus miniers réactifs. Les études de modélisation prédictive à la Mine Doyon font partie de ce programme.

Les premières études ont produit deux estimations indépendantes de la durée possible du drainage minier acide (DMA) sur ce site. Celles-ci étaient basées sur (i) le bilan de chaleur (*heat balance*) et (ii) le bilan de masse des sulfates et du fer (*sulphate and iron mass balances*).

D'autres études sur le site ont produit deux modèles conceptuels qui pourraient être utilisés comme support à la modélisation prédictive du DMA:

- un modèle conceptuel de la circulation de l'air dans l'empilement a été développé sur la base de données de terrain (température, profils de gaz);
- un modèle conceptuel a été développé pour décrire les transformations minéralogiques des aluminosilicates associés à la génération d'acide et la formation de minéraux secondaires et de précipités (jarosite, gypse).

Les modèles mathématiques de prédiction du DMA peuvent se classifier en deux grands groupes: i) modèles empiriques et ii) les modèles phénoménologiques.

Les modèles empiriques sont basés sur des relations statistiques (c.-à-d. corrélation, régression) entre les constituants de la qualité de l'eau et des variables comme le temps (Morin et al, 1993). Cette approche nécessite la compilation d'une base de données chimiques provenant de données d'auscultation de terrain. Une analyse statistique est alors accomplie sur les données de terrain. Fréquemment, le but est d'établir la relation entre une seule variable maîtresse et la chimie de l'eau. On peut aussi tenter d'identifier des tendances particulières ou temporelles dans l'ensemble des données. Les prédictions basées sur les méthodes statistiques ne révèlent pas les interactions géochimiques complexes qui, en définitive, déterminent les conditions futures dans l'empilement de roches stériles, mais peuvent être utilisées pour les interpréter. Les modèles basés sur des données statistiques d'un site sont par nature, spécifique à ce site.

À la Mine Doyon, une approche empirique a été utilisée pour développer des corrélations statistiques qui ont été appliquées pour prédire les concentrations de certains composés aqueux (c.-à-d. sulfate, acidité, fer, etc.) dans les échantillons d'eau de la halde de stériles sur la base de la mesure de la conductivité et/ou du niveau des solides totaux dissous (*TDS*; *total dissolved solids*).

Les modèles phénoménologiques comprennent l'expression de la cinétique, de la thermodynamique (équilibre) et du mouvement de masse (*mass transport*) sur la base de connaissances scientifiques fondamentales (Scharer et al., 1994; Perkins and Gunter, 1994; Davis and Ritchie, 1986). La force des modèles phénoménologiques est qu'ils appliquent les principes scientifiques bien connus et prouvés de la conservation de masse, des moments (*momentum*) et de l'énergie. Ces modèles sont basés sur des équations théoriques dont la solution implique des simplifications (c.-à-d. géométrie simplifiée, propriétés uniformes, conditions initiales et frontières idéalisées) et des paramètres estimés. Le degré élevé d'abstraction appliqué à la structure d'un modèle et aux procédures d'estimation des paramètres peut résulter en une faible performance du modèle sous des conditions de terrain, spécialement quand les données adéquates ne sont pas disponibles pour la calibration du modèle. Cependant, ces modèles peuvent contribuer à l'examen des effets de différentes options de réhabilitation des haldes de stériles et à l'évaluation des exigences potentielles à long terme pour la gestion des résidus miniers réactifs.

Comme il a été mis en évidence avec justesse par un des principaux auteurs de ces études de modélisation, *"l'impact des modèles numériques phénoménologiques sur notre compréhension des processus est (fréquemment) négligé. Un modèle basé sur des principes physiques et géochimiques solides nous dit comment se comporte le système représenté par ce modèle. Ce n'est peut être pas la représentation parfaite du système actuel étudié, mais même les dérogations du modèle par rapport au comportement observé nous apprennent quelque chose à propos du vrai système. Ainsi, les modèles phénoménologiques approfondissent notre compréhension fondamentale du système à l'étude ce que ne fournissent pas les modèles empiriques malgré leur importante valeur pratique"* (Lefebvre, 1996).

Plusieurs modèles phénoménologiques différents ont été développés et appliqués à la Mine Doyon:

- la modélisation thermique détaillée a été accomplie pour évaluer la production de chaleur provenant de l'oxydation des sulfures et le transport de la chaleur à l'intérieur de la halde de stériles par conduction et advection;
- un modèle mathématique (*TOUGH AMD*) a été développé pour simuler le transport et la consommation d'oxygène et la production de sulfates reliés à l'oxydation de la pyrite. Le modèle a été appliqué afin d'acquérir une meilleure compréhension des conditions et processus courants se produisant à l'intérieur de l'empilement (*heap*) et afin d'examiner les effets (avantages) de la mise en place d'un recouvrement sur la halde.

Les sections subséquentes de ce chapitre (i) discutent des études de modélisation thermique, (ii) présentent notre évaluation des données disponibles pour la modélisation prédictive du DMA à la Mine Doyon, (iii) discutent des autres études de la Mine Doyon qui peuvent être considérées comme servant de support à la modélisation prédictive du DMA, et (iv) fournissent les commentaires détaillés de la révision du modèle *TOUGH AMD*.

## **7.2 Modélisation thermique**

### **7.2.1 Commentaires de la première révision**

La modélisation thermique est décrite dans le rapport "*Heat Transfer During Acid Mine Drainage Production in a Waste Rock Dump - La Mine Doyon, (Québec)*" (GREGI, 1993-03) et est aussi résumée au chapitre 6 du document-synthèse "*Monitoring and Modelling of Acid Mine Drainage from Waste Rock Dumps. La Mine Doyon Case Study*" (GREGI, 1994-12). Leur étude aborde le transport de l'énergie thermique et les variations de température à l'intérieur de la halde de stériles sud de la Mine Doyon. La base de données comprend approximativement deux années d'observations hebdomadaires de la température mesurée à différentes profondeurs selon six localisations à l'intérieur de l'amas de stériles. Le développement théorique suit largement les travaux antérieurs de Stallman (1965) pour les analyses de Fourier et les publications de Cathles et Apps (1975), Davis et Ritchie (1986), Pantelis et Ritchie (1991), et Jaynes et *al.* (1983) pour le développement et la solution des bilans énergétiques unidimensionnels (*one-dimensional energy balances*). L'aspect théorique a été développé et les données ont été présentées d'une façon logique.

Les auteurs ont développé des fonctions trigonométriques pour représenter les variations cycliques de la température dans la halde. De plus, les tendances à long terme ont été décrites par un terme linéaire qui est fonction du temps. La solution comprend une combinaison de termes linéaires et trigonométriques. Selon notre point de vue, la période d'échantillonnage présentée dans le rapport était beaucoup trop courte pour évaluer des tendances significatives à long terme de la température dans la halde. (*Un des auteurs a mentionné (Lefebvre, 1996) que des données thermiques subséquentes, non présentées dans ce rapport, ont confirmé la tendance à long terme identifiée dans cette étude.*)

Le bilan d'énergie thermique a été exprimé par une équation différentielle du second degré. L'équation générale comprend la conduction et la convection de la chaleur ainsi qu'un terme cinétique exprimant la chaleur de réaction générée par l'oxydation de la pyrite. Les auteurs ont utilisé une réaction cinétique simpliste du premier ordre pour exprimer l'oxydation de la pyrite. Cette approche présente plusieurs problèmes:

- la constante du taux de réaction ( $K_{OX}$ ) a été assumée comme indépendante de la température en dépit d'un volume important de données cinétiques indiquant une forte dépendance par rapport à la température;



- l'estimé du terme "source de chaleur" (GREGI, 1993-03, annexe C, équation C.4), est applicable si le transport de l'oxygène est uniquement dû à la diffusion, mais n'est pas approprié si le transport par convection est impliqué;
- la concentration en oxygène supposée dans l'équation C.4 n'est pas compatible avec les patrons de concentrations en oxygène présentés par les auteurs;
- la capacité calorifique volumétrique (*volumetric heat capacity*) de l'air humide a été assumée constante, bien que sa dépendance par rapport à la température soit bien connue, et due en grande partie à des effets latents de chaleur (*latent heat effects*).

La solution analytique du modèle contient un paramètre mesuré (le gradient de température à la base de la halde) et trois paramètres ajustés en bloc (A, B et C). Malheureusement, le paramètre mesuré et deux des trois paramètres ajustés sont spécifiques au site et à la séquence, c.-à-d. qu'ils doivent être estimés à partir des données disponibles selon une position donnée et un temps donné. Conséquemment, leur valeur comme outil prédictif est discutable. Par ailleurs, la dérivation et la validité statistique des estimations de paramètres ne sont pas spécifiées. De toute manière, les estimés paramétriques ont résulté en prévisions non réalistes des paramètres de transport, comme par exemple pour le coefficient de diffusion effectif ( $D_e$ ).

En dépit des restrictions mentionnées précédemment, l'effort de modélisation présente plusieurs aspects positifs. La solution analytique du modèle de conduction/advection est élégante et simple d'application. L'effort de modélisation soumis, s'il est appliqué correctement, peut donner une définition des paramètres de transport, lesquels pourraient nécessiter une vérification par d'autres méthodes préalablement à leur utilisation dans un modèle plus complet.

En conclusion, les modèles de température/chaleur proposés ont un rôle profitable à titre d'étape initiale d'une analyse plus complète de la génération de DMA.

Le principal auteur du rapport (Lefebvre, 1996) explique qu'une des intentions de leur étude était de mettre en évidence le potentiel des données thermiques comme outil de caractérisation et d'auscultation des haldes de stériles; *“c'est une affaire très simple d'installer des thermistors et de suivre les variations de température dans le temps.. les propriétés thermiques peuvent alors être déterminées (en suivant leur approche) et des indices des taux d'oxydation de la pyrite peuvent être obtenus. La température est aussi un très bon indicateur global de l'évolution naturel du DMA dans le temps et peut donner une information fiable sur l'impact des mesures de mitigation du DMA ” (Lefebvre, 1996).*

## 7.2.2 Commentaires de la seconde révision

Les commentaires suivants concernant les études de modélisation thermique décrites dans le rapport “*Heat Transfer During Acid Mine Drainage Production in a Waste Rock Dump, La Mine Doyon (Québec)*” (GREGI, 1993-03) proviennent de Li (1995).

## Commentaires généraux

Le fait que les taux de production de chaleur calculés à partir de deux différents modèles - un modèle simple de conduction et un modèle de conduction et advection - concordent si bien l'un avec l'autre n'est pas rassurant. Cela indique-t-il que les deux méthodes sont suffisamment solides pour que les deux taux de production de chaleur obtenus soient acceptables ou s'agit-il simplement d'une coïncidence ? Étant donné les hypothèses rudimentaires (certaines d'entre-elles, comme l'auteur l'a mentionné, sont connues comme fausses) utilisées par les modèles, les auteurs devraient fouiller plus profondément cet aspect très important.

## Commentaires spécifiques

La lettre grecque " $\alpha$ " est utilisée pour la capacité calorifique (GREGI, 1993-03, dernière ligne de la p. 6) et pour le coefficient du cosinus à l'équation (12) et les suivantes (GREGI, 1993-03, p. 11). Cela crée une confusion; un symbole différent devrait être utilisé pour la capacité calorifique.

La lettre "q" est utilisée pour dénoter le flux de chaleur (GREGI, 1993-03, pp.7, 8, & 14) alors qu'elle est aussi utilisée pour représenter le flux du fluide à la page 14, équation (20). De plus, le flux du fluide a été indiqué précédemment par la lettre " $\mathbf{v}$ " en caractère gras [(p. 8, équation (10)]. Je suggère d'utiliser la lettre " $\mathbf{v}$ " en caractère gras pour dénoter le *flux du fluide* dans tout le rapport.

Les auteurs devraient expliquer pourquoi "*la température de base est choisie à 5 ° C ce qui est légèrement supérieur la température moyenne de l'air dans la région.*" (GREGI, 1993-03, p. 13, ligne 10). La référence de la figure 10 devrait en fait être celle de la figure 11 (GREGI, 1993-03, p. 13, ligne 11).

L'intégrale de l'équation (19) est inadéquate. La réponse adéquate est obtenue par l'intégration suivante:

$$DHc(t) = \int_0^L CvDT(z,t)dz$$

En remplaçant  $DT(z,t)$  par  $DT_0 e^{-az} \sin(2pt/t-bz)$  (p. 13) et en intégrant l'expression précédente en considérant  $t$  comme une constante, nous obtenons:

$$DHc(t) = CvDT_0 \int_0^L e^{-az} \sin(2pt/t - bz) dz$$

$$\Delta Hc(t) = Cv\Delta T_0 \left[ \frac{e^{-az}}{a^2 + b^2} [b \cos(2bpt/t - bz) - a \sin(2pt/t - bz)] \right]_0^L$$

Quand  $z = L$ ,  $e^{-az}$  est très petit et peut être négligé, alors

$$\Delta H_c(t) = C_v \Delta T_0 \frac{e^{-az}}{a^2 + b^2} [a \sin(2pt / t) - b \cos(2pt / t)] \quad (A)$$

Pour obtenir le maximum de  $DH_c(t)$  par rapport au temps  $t$ , prenons la dérivée première et donnons lui la valeur zéro,

$$\frac{\partial D H_c(t)}{\partial t} = 0$$

et en résolvant pour  $t$ , nous obtenons

$$\tan\left(\frac{2pt}{t}\right) = \frac{a}{-b}$$

$$t = \frac{t}{2p} \operatorname{atan}\left(-\frac{a}{b}\right) \quad (B)$$

Les équations (A) et (B) dérivées précédemment seront utilisées ultérieurement dans les commentaires spécifiques de l'annexe D (GREGI 1993-03, p. D2) pour faire des calculs.

En comparant à l'équation (10), le terme  $Q(x)$  est manquant à l'équation (20). Ceci suggère que l'influence de la source de chaleur est négligeable. Ce point devrait être spécifié et expliqué.

*"L'infiltration d'eau ne peut expliquer le transfert advectif de la chaleur vers le haut. ...Dans aucun cas, l'infiltration ne peut excéder les précipitations, aussi le mouvement de l'eau ne peut être la contribution principale au transfert advectif de la chaleur."* (GREGI 1993-03, p.17, ligne 9). Cette analyse contredit la suggestion d'une autre partie des rapports à l'effet qu'il y a probablement une circulation interne de l'eau à l'intérieur de la halde de stériles. Si l'eau est vaporisée dans les régions plus chaudes de la halde et s'élève vers les régions plus froides puis se condense, une chaleur significative peut être transférée des régions chaudes aux régions froides par évaporation/condensation et par transfert convectif de la chaleur de la vapeur. De plus, une telle circulation interne d'eau peut augmenter le flux d'eau au travers d'un plan donné à un niveau bien au-dessus de celui représenté par le flux annuel d'infiltration de, par exemple, 0,5 m. Ce point devrait être considéré.

Les puits #2 et #6 sont exclus du calcul de la conductivité thermique moyenne (GREGI 1993-03, p.18). Les raisons de cette exclusion devraient être fournies.

La référence à des "valeurs négative de  $Q$ " à la page 19 (ligne 6) est absente de la figure 13b (p.42) puisque la plus petite valeur de l'échelle est 0. Par cohérence, la figure 13b devrait être modifiée afin d'inclure des valeurs négatives de  $Q$ .

La signification de "b" dans l'équation (36) n'est pas expliquée dans la liste des paramètres (p. 20); "b : profondeur de la base" devrait être ajouté à la fin de la liste des paramètres.

Le fondement de l'hypothèse "si on suppose que les dimensions verticales des cellules de convection sont à peu près les mêmes que celles observées horizontalement..." (p. 23) devrait être expliqué.

La signification de la figure 12 (p. 41) nécessite des éclaircissements additionnels dans le texte.

À l'annexe A, il y a plusieurs erreurs typographiques qui rendent très difficile la lecture des équations de la page A2 (GREGI 1993-03). Les formules adéquates sont présentées plus bas, avec les corrections soulignées:

$$F(T_0, m, \mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sum_{i=1}^n [T_i - (T_0 + m t_i + \mathbf{a} C_i + \mathbf{b} S_i)]^2 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial f}{\partial T_0} = 2 \sum_{i=1}^n [(T_i - T_0 - m t_i - \mathbf{a} C_i - \mathbf{b} S_i)(-1)] = 0 \quad (\text{A.5a})$$

$$\frac{\partial f}{\partial m} = 2 \sum_{i=1}^n [(T_i - T_0 - m t_i - \mathbf{a} C_i - \mathbf{b} S_i)(-t_i)] = 0 \quad (\text{A.5b})$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{a}} = 2 \sum_{i=1}^n [(T_i - T_0 - m t_i - \mathbf{a} C_i - \mathbf{b} S_i)(-C_i)] = 0 \quad (\text{A.5c})$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{b}} = 2 \sum_{i=1}^n [(T_i - T_0 - m t_i - \mathbf{a} C_i - \mathbf{b} S_i)(-S_i)] = 0 \quad (\text{A.5d})$$

Dans la phrase suivante, la limite supérieure du symbole de la sommation devrait être "n" au lieu de "m". La formulation adéquate des équations (A.6) a-b devrait être comme suit.

$$\sum T_i = n T_0 + \underline{m} \sum t_i + \underline{\mathbf{a}} \sum C_i + \underline{\mathbf{b}} \sum S_i \quad (\text{A.6a})$$

$$\sum T_i t_i = n T_0 t_i + \underline{m} \sum t_i^2 + \underline{\mathbf{a}} \sum C_i t_i + \underline{\mathbf{b}} \sum S_i t_i \quad (\text{A.6b})$$

Un espace souligné indique que quelque chose a été effacé des équations (inadéquates). Dans les équations matricielles (A.7) et (A.8), l'élément dans le coin supérieur gauche de la première matrice est "h", non "m".

Dans les équations (A.10) et (A.11), il faudrait utiliser  $DT_0$  pour remplacer  $A$  afin d'assurer l'uniformité des symboles. La discussion sous l'équation (A.11), "*La relation A.11 pour calculer l'angle  $P$  tient quand  $a$  et  $b$  sont positifs... (paragraphe suivant)..., l'angle complémentaire  $(P+2p)$  est utilisé à la place,*" incluant le tableau entre les zones de texte, est déroutante et inutilement complexe. En considérant que  $\tan(P)$  est une fonction monotone de  $P$  dans l'intervalle fermé  $[-p/2, p/2]$  et notant que  $\tan(-p/2)=-\infty$  et  $\tan(p/2)=\infty$ , la discussion (incluant le tableau) peut être simplifiée de la façon suivante:

La relation A.11 tient toujours. Si nous limitons l'angle  $P$  à l'intervalle fermé  $[-p/2, p/2]$ , il n'y a qu'un angle  $P \in [-p/2, p/2]$  correspondant à chaque valeur de  $-a/b$ . L'angle  $P'$  désiré pour le traçage par rapport au temps peut être obtenu par  $P + np$ , où  $n = 0, 1$  ou  $2$ , et est aisément déterminé comme étant la valeur entraînant, pour chaque profondeur successive, la plus petite augmentation positive dans le déphasage  $P'$  par rapport à la profondeur précédente.

À la page A4 (deuxième paragraphe, ligne 5),  $T(T_0, m, a, b, t_i)$  devrait être remplacé par  $T_i(T_0, m, a, b, t_i)$ ; et  $T^*$  devrait être remplacé par  $T_i^*$ . Les équations (A.12) et (A.13) sont incorrectes. Elles devraient être corrigées de la façon suivante:

$$SST = \sum_{i=1}^n \left( T_i - \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{N} \right)^2 \quad (A.12)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n \left( T_i^* - \frac{\sum_{i=1}^n T_i^*}{N} \right)^2 \quad (A.13)$$

Pour faciliter la lecture, les tableaux aux pages A5-A6 devraient indiquer que "*Atten.*" est  $\ln(A/A_0)$ .

À l'équation (B.6)c de l'annexe B (GREGI 1993-03), le coefficient précédent  $\Delta T$  est  $2p/t$ , non  $2\pi/t$ .

La liste des paramètres après l'équation (C.1) de l'annexe C (GREGI, 1993-03) devrait être modifiée; il faudrait effacer "c", "r", et  $t$  de la liste puisqu'ils n'apparaissent pas dans l'équation.

Concernant l'annexe D (GREGI, 1993-03), la variation annuelle cyclique de la chaleur emmagasinée dans la halde (MJ/m<sup>2</sup>) (présentée aux pages D2-D5) a été recalculée en utilisant les équations (A) et (B) dérivées précédemment dans les commentaires sur le rapport principal (GREGI 1993-03, p. 14). Le tableau suivant compare les valeurs recalculées avec les valeurs originales présentées dans le rapport.

Puits #	DT <sub>0</sub>		a		DH <sub>c</sub> (max)		DH <sub>c</sub> (max), %	
	Recalc.	Original	Recalc.	Original	Recalc.	Original	Recalc.	Original
1	13,1	13,1	0,336	0,336	123,0	<b>77,1</b>	7,3	<b>4,6</b>
2	12,5	12,5	0,168	0,168	117,8	<b>147,2</b>	7,7	<b>9,6</b>
3	14,9	14,9	0,163	0,163	192,3	<b>180,8</b>	53,7	<b>49,9</b>
4	12,2	12,2	0,221	0,221	133,4	<b>109,2</b>	6,5	<b>5,3</b>
5	13,4	13,4	0,239	0,239	139,8	<b>110,9</b>	13,9	<b>11,0</b>
6	15,5	15,5	0,363	0,363	163,2	<b>84,5</b>	5,6	<b>2,9</b>

On peut constater que le calcul original présenté dans le rapport a résulté en erreurs importantes pour le puit #6 et le puit #1.

Les composantes suivantes sont manquantes dans les six graphiques de la température versus la profondeur à l'annexe E (GREGI, 1993-03):

- le titre de l'axe horizontal "Date";
- le titre de l'axe vertical de la température "Température, °C";
- La légende des graphiques.

### 7.3 Évaluation des données disponibles pour la modélisation du DMA

La modélisation prédictive d'évaluation du DMA nécessite une bonne base de données afin de caractériser:

- les conditions sur le site (c.-à-d. température, précipitation, évaporation, etc.);
- les propriétés de la roche stérile (c.-à-d. physique, chimique, géochimique, minéralogique, etc.);
- les caractéristiques de l'empilement (c.-à-d. méthode de construction, configuration, porosité/volume des vides, dimensions des particules rocheuses, etc.);
- le transport de l'oxygène et de l'eau (c.-à-d. perméabilité, les taux d'infiltration, gradients de température, etc.);

- les facteurs cinétiques (c.-à-d. les taux chimiques et biologiques d'oxydation des sulfures, les taux d'altération/dissolution pour les principaux minéraux-tampons);
- la qualité de l'eau à différentes localisations (telle l'eau d'infiltration, l'eau interstitielle, d'écoulement).

Des documents récents préparés pour le NEDEM (SENES, 1994a and 1994b) décrivent les exigences d'échantillonnage lors de la cueillette de données de caractérisation de roches stériles à un site donné dans le cadre de décision concernant l'auscultation, la gestion, etc. et les données requises pour la prédiction et la modélisation du DMA. Un des principaux chercheurs dans le cadre des études de la Mine Doyon (Pierre Gélinas) a contribué à l'un et l'autre des documents et dans le document de révision, La Mine Doyon est présentée comme une étude de cas (SENES, 1994a).

Les différentes exigences d'échantillonnage (catégories de données) pour les roches stériles sont résumées au tableau 7-1. Nous avons indiqué si ces données étaient disponibles dans les études de la Mine Doyon. Il est évident que le site est bien caractérisé. Des commentaires de révision additionnels sont fournis subséquemment.

Un des chercheurs (Lefebvre, 1996) commente: *"la caractérisation intégrée et approfondie de la halde sud peut fournir... à la communauté de recherche sur le DMA, un ensemble de données suffisamment complet pour supporter le développement de modèles prédictifs ... le soin pris lors du développement de la base de données de caractérisation devrait en faire une contribution durable à la recherche sur le DMA"*.

L'agencement des forages a été conçu afin de représenter les trois sous-bassins de drainage initialement existants sous la halde et les tranchées ont été placées selon plusieurs localisations, suivant le type de roches. Par conséquent le programme d'échantillonnage ne possédait pas une base statistique, mais était approprié et adéquat pour caractériser l'amas.

L'énumération d'échantillonnage géochimique dans le document synthèse *"Monitoring and Modelling of Acid Mine Drainage from Waste Rock Dumps. La Mine Doyon Case Study"* (GREGI, 1994-12, p. 5-2) est vaste et il n'y a définitivement pas de manque de données pour ce site.

Le document synthèse fournit aussi des estimés de détermination des acides-bases (*Acid-Base Accounting (ABA)*), que nous croyons être les seules données ABA et données de pourcentage minéralogique par poids (sulfures et carbonates) présentées actuellement dans tous les rapports (GREGI, 1994-12, Tableau 1.1). En effet, peu d'autres rapports montrent des résultats analytiques de caractérisation chimique de la roche stérile, autre que des analyses par diffraction des rayons-X. Savoie *et al;* (1991) ont effectué des analyses chimiques d'échantillons composites (15 à 45) de chacun des trois types de roche majeurs et ils ont calculé des statistiques sommaires (moyennes et écart-types). Cette information est présentée à l'annexe D du rapport *"Mineralogical Transformations Associated with AMD Production in a Waste Rock Dump. La Mine Doyon-South Waste Rock Dump"* (GREGI, 1994-06).



Aucune donnée provenant d'études cinétiques de laboratoire n'a été fournie (c.-à-d. aucun travail d'essai en colonnes ou de cellules humides). Le taux et l'étendue de la génération d'acide ont été examinés par des travaux d'essai par extraction sur des échantillons de forages et par installation de lysimètres à deux localisations sur le terrain. Cependant, les données lysimétriques présentées visaient l'auscultation initiale et n'ont pas été interprétées par rapport à la possible étendue de la production de DMA dans la halde.

Les auteurs ont étudié plusieurs essais différents de dureté (Los Angeles, Micro-Deval, sulfate de magnésium et célérométrie acoustique) et ils ont conclu que *"la mesure la plus pratique de la résistance de la roche, le degré d'altération et la fissuration interne est donnée par l'essai de célérométrie acoustique. Cette méthode est simple, rentable et donne des résultats favorablement comparables avec les essais plus complexes utilisant des agrégats tel Los Angeles ou l'essai au  $MgSO_4$ "* (GREGI, 1994-12, p.3-9). Bien que cette nouvelle méthode soit prometteuse, elle requiert plus de travail afin d'établir des relations entre les vitesses des ondes de compression et de cisaillement mesurées dans les roches et les superficies des surfaces existantes ou l'augmentation possible des surfaces (et ainsi les taux de réaction) résultant de l'altération et de la production de particules plus fines. Les autres essais (Los Angeles, Micro-Deval et sulfate

**Tableau 7-1**  
**Catégories d'échantillonnage de roches stériles**

<b>Catégories de données</b>	<b>Données requises pour modélisation, prédiction, ou validation (oui/non)</b>	<b>Données disponibles dans les études de la Mine Doyon (oui/non)</b>
Programme d'échantillonnage	Oui	Oui, mais pas de base statistique
Contenu en éléments	Oui	Oui, mais les analyses ne sont pas fournies
Minéralogie	Oui	Oui, bien décrite
Formes minéralogiques	Oui	Oui, excellente information
Essais statiques	Oui	Oui, quelques-uns
Essais dynamiques	Oui	Oui, lysimètres mais pas de colonnes ou de cellules humides
Dureté et altération	Oui	Oui, quatre méthodes examinées
Auscultation de l'eau	Oui	Oui, à plusieurs localisations
Eau interstitielle	Oui	Oui, deux méthodes: extraction par lavage et par pressage
Eau de percolation (Seepage)	Oui	Oui
Eau souterraine	Spécifique au site	Oui
Eau de surface	Oui	Oui, assumée disponible mais non fournie
Qualité de l'eau/analyse sur le terrain	Oui	Oui
Qualité de l'eau-analyse de laboratoire	Oui	Oui
Échantillonnage des gaz	Oui	Oui, oxygène et dioxyde de carbone
Profil de la température dans l'amas	Oui	Oui
Perméabilité à l'eau	Non	Non
Perméabilité à l'air	Oui, si contrôle par convection	Oui, mais sans succès
Diffusion de l'oxygène	Oui, si contrôle par diffusion	Non, contrôle par convection
Dimensions de particules	Oui	Oui, à plusieurs localisations
Porosité	Oui	Oui
Teneur en eau	Oui	Oui
Auscultation de l'écoulement	Oui	Oui
Auscultation de l'infiltration	Oui	Non, proposé
Auscultation biologique	Non	Oui, étude spéciale
Météorologie	Oui	Oui
Analyses thermiques	Non	Oui, levés infrarouges
Forage	Dépendant du site	Oui
Levées EM	Non	Non

de magnésium) fournissent une mesure quantitative directe des particules fines additionnelles pouvant être utilisée pour calculer l'aire additionnelle de surfaces réactives résultant de l'altération, ce qui est un important paramètre requis pour la prédiction/modélisation du DMA.

Les processus minéralogiques et géochimiques survenant dans l'empilement sont bien décrits dans le rapport "*Mineralogical Transformations Associated with AMD Production in a Waste Rock Dump. La Mine Doyon-South Waste Rock Dump*" (GREGI, 1994-06). Les échantillons de roches ont été décrits macroscopiquement et microscopiquement et les pH de la pâte, les analyses chimiques globales de roches et les analyses par diffraction aux rayons-X ont été utilisés afin de caractériser les matériaux. Cependant, les analyses chimiques totales de roches des échantillons de stériles provenant de l'empilement ne semblent pas avoir été présentées (ou discutées) dans aucun des rapports. Le rapport de 1991 "Évaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stériles; étude du site de la Mine Doyon" (GREGI, 1991-19, tableaux 3.3 et 3.4) présente une estimation de la minéralogie normalisée d'échantillons de résidus miniers et de boues de traitement (boues HDS) basée sur des analyses chimiques de ces matériaux (c.-à-d. % SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, etc.). Il n'est pas clair si les analyses chimiques de roches ont été réalisées sur des échantillons de stériles, mais une estimation de la minéralogie normalisée aurait pu être utile pour les interprétations géochimiques et la modélisation prédictive du DMA.

Les échantillons d'eau ont été recueillis à plusieurs localisations différentes en utilisant différentes méthodes: eau d'écoulement au déversoir, eau souterraine provenant de puits, eau des lysimètres, eau de lavage/extraction de rognures de forage et extraction/torsion sous pression d'échantillons de roches humides. Selon notre opinion, il y a des données adéquates de qualité de l'eau pour calibrer un modèle de DMA; cependant, un des membres de la révision secondaire (Morin, 1995a) est en désaccord à ce niveau.

L'instrumentation dans les trous de forage (piézomètres, tubes d'échantillonnage de gaz, thermistors) a été installée d'une manière très efficace. Les profils de température et de gaz indiquent que la convection thermique représente le mécanisme clé contrôlant le mouvement de l'oxygène dans la halde de stériles. Il y a des données adéquates de température et de gaz pour la modélisation du DMA.

Des mesures de pression différentielle de l'air ont été tentées mais sans succès; les auteurs ont conclu que les variations de la pression atmosphérique étaient trop faibles pour vérifier la technique qu'ils proposaient (perméabilité à l'air trop élevée). Par conséquent, ils ont planifié l'investigation de l'utilisation de systèmes d'acquisition automatisés et de cellules de pression. La convection est de toute évidence le mode de transport de l'oxygène dominant dans l'empilement.

Les travaux d'essais sur les dimensions des particules incluaient l'examen de la distribution granulométrique des particules fines (pour deux types majeurs de roches) à deux profondeurs dans l'empilement (0 et 1 m); cependant ils pourraient avoir regardé plus profondément (soit 5 m pour l'installation de lysimètres) et possiblement à des zones plus anciennes (altérées) versus de plus jeunes de l'amas. Les auteurs ont identifié que "*pour toutes les propriétés dépendant de la surface spécifique (m<sup>2</sup>/kg), la surface de la fraction 10% fine*

était approximativement 50 fois plus grande que pour les plus gros blocs. Par conséquent la teneur en eau, le degré de saturation, les taux d'oxydation et la perméabilité réactive sont dominés par l'abondance relative de la fraction fine" (GREGI, 1994-12, p.2-6). La distribution granulométrique des particules fines est importante pour la modélisation du DMA et elle est adéquatement caractérisée sur ce site.

Une évaluation hydrologique détaillée a été réalisée afin d'établir le bilan hydrique de l'empilement. Les travaux ont fourni plusieurs estimations qui sont requises pour la modélisation prédictive de la génération du DMA dans des empilements (GREGI, 1994-12, tableau 4.12). Le sommaire du bilan hydrique est présenté sur la base d'une moyenne annuelle. Ceci devrait être suffisant si les prédictions de la modélisation étaient elles aussi réalisées sur la base d'une moyenne annuelle; cependant, plusieurs modèles utilisent des incréments de temps mensuels (ou plus petits) et requièrent des estimés mensuels de l'infiltration afin de tenir compte des effets saisonniers (lesquels peuvent influencer le taux et la nature du DMA). Il semble y avoir suffisamment de données recueillies pour que les auteurs puissent estimer les débits mensuels d'infiltration (enregistrements des précipitations mensuelles, estimation des chutes de neige, ruissellement printanier, lysimètres, etc.) et quelques estimés du débit journalier moyen sont fournis (GREGI, 1994-12, p.4-34). Les observations des changements dans le volume et la qualité des débits aux déversoirs suggèrent que des estimés saisonniers (mensuels) sont nécessaires afin de mieux connaître l'empilement.

Dans la majorité des cas, le débit d'infiltration est estimé simplement en comparant les estimés des débits d'entrée (*inflow*) (c.-à-d. précipitations moins évaporation) et les débits totaux recueillis. Par conséquent l'explication de l'auteur au sujet de l'effet de l'emménagement de l'eau sur la différence entre les précipitations et le débit (GREGI 1994-12, p.4-34) est particulièrement pertinente pour réaliser des bilans hydriques sur des empilements. La teneur en eau de l'empilement a été signalée comme augmentant de 2% (initialement) à 10-12% (en volume) sur une période de dix ans à cause de l'accumulation des eaux à l'intérieur de l'empilement. Les auteurs croient que l'empilement a maintenant atteint des valeurs près de la capacité du terrain (*field capacity*); mais aussi que les processus d'altération créent graduellement plus de particules fines qui peuvent retenir encore plus d'humidité. Ceci montre qu'il est important de mesurer la teneur en eau actuelle en relation avec la capacité du terrain, afin d'estimer avec précision l'emménagement actuel et futur de l'eau et les débits d'infiltration.

L'oxydation chimique et biologique des sulfures devrait être considérée dans un modèle DMA. Plusieurs études biologiques ont été réalisées à la Mine Doyon. Des microorganismes ont été isolés à partir d'échantillons de roches recueillis pendant les programmes de forage par resuspension dans un médium liquide et à partir d'eau souterraine des piézomètres se prolongeant jusqu'à la base de l'empilement en utilisant des trappes bactériennes (*bacterial traps*). Pour la modélisation prédictive du DMA, il est habituellement suffisant de confirmer que des bactéries sulfo-oxydantes sont présentes et que la bactérie dominante est *Thiobacillus ferroxidans*, pour laquelle les taux cinétiques de croissance et l'oxydation biologique des sulfures sont bien établis. Les études biologiques ont confirmé cela. Cependant ces études suggèrent aussi que l'oxydation biologique du soufre et des sulfures dans un environnement anoxique peut aussi être important. Selon notre opinion, leurs interprétations concernant la respiration biologique anaérobie utilisant des ions ferriques

comme accepteurs d'électrons ne sont pas supportées par des évidences physiques ou chimiques fournies dans les rapports. De plus, la contribution potentielle de ce processus peut être considérée négligeable en comparaison de l'influence chimique de l'ion ferrique sur la génération à long terme du DMA.

Les auteurs ont effectué des levés infrarouges et fait de nombreuses recommandations concernant des levés aériennes de thermographie infrarouge (bien qu'il soit peu probable que quelqu'un d'autre tenterait de tels levés). Les mesures infrarouges réalisées à dix mois d'intervalle ont démontré que les distributions de température à la surface attribuées aux patrons de convection de l'air sont stables. Ceci n'est pas requis habituellement mais c'est de l'information utile pour la modélisation DMA. Les levés infrarouges permettent de soutenir le développement de leur modèle conceptuel de la circulation de l'air dans l'amas.

## **7.4 Études supportant la modélisation prédictive**

### **7.4.1 Bilan de chaleur et bilan de masse**

Un rapport du début 1991 "Évaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stériles; étude du site de la Mine Doyon" (GREGI, 1991-19), fournit un panorama de l'historique du site et l'amorce des programmes de terrain exécutés pour installer l'instrumentation et obtenir des échantillons pour la caractérisation de l'empilement (stériles et qualité de l'eau). Ce rapport du début du projet n'est pas un document NEDEM. Cependant, il décrit quelques intéressantes prédictions initiales de la production de DMA sur le site, qui ne sont pas discutées dans le document-synthèse NEDEM de 1994 "*Monitoring and Modelling of Acid Mine Drainage from Waste Rock Dumps. La Mine Doyon Case Study*" (GREGI, 1994-12).

Le rapport de 1991 présente les résultats de la modélisation préliminaire de la chaleur (*heat modelling*) utilisant un modèle simple qui ne considérait pas l'infiltration d'eau ni la convection de l'oxygène. Ce modèle simple a été utilisé pour estimer la quantité de pyrite oxydée sur la base de la génération de chaleur. Le taux d'oxydation de la pyrite a été estimé à 7 000 tonnes par année, ce qui peut se traduire par une durée théorique de 102 ans pour l'oxydation totale de la pyrite.

L'estimé précédent a été comparé à un autre estimé indépendant obtenu en réalisant des bilans de masse des concentrations de sulfates et de fer mesurées sur des lixiviats, lequel a donné des temps de 85 ans (pour les sulfates) et 92 ans (pour le fer). Les deux estimés étaient basés sur un contenu moyen en pyrite de 3,5%.

L'utilisation de deux méthodes indépendantes d'estimation du taux et de l'étendue de l'oxydation des sulfures et de la génération d'acide a fourni une plus grande confiance dans leur estimé moyen d'approximativement 100 ans. La méthode du bilan de masse est simple et peut être aisément appliquée à d'autres sites avec des données adéquates d'écoulement et un bon estimé du contenu moyen en pyrite de l'amas. L'approche du bilan de chaleur a utilisé un modèle simple, mais la procédure de calcul exposée dans le rapport de 1991 (GREGI,

1991-19, annexe D) n'est pas aussi simple et n'est par conséquent pas susceptible d'être utilisée à plusieurs autres sites.

Les auteurs mentionnent que ces estimés de temps pour l'oxydation complète de la pyrite sont seulement théoriques et que l'unique utilisation des taux calculés de production de DMA est d'indiquer l'ampleur du problème (GREGI, 1991-19, p. xiii).

Les calculs fournis dans le rapport de 1991 démontrent l'étendue possible de la génération du DMA sur le site. La modélisation thermique subséquente incluait la conduction et l'advection (GREGI, 1993 93-03) et ultérieurement la modélisation physique (*TOUGH AMD*) considérait aussi le transport par convection de la chaleur (GREGI, 1994-12).

Aucune de ces deux études de modélisation plus élaborées n'a été utilisée afin de fournir des estimés de l'étendue possible du DMA au-delà de la période de temps actuelle ou au-delà de la période utilisée pour la simulation (15 ans). Le chercheur principal (Lefebvre, 1996) explique que la modélisation subséquente était "*utilisée principalement pour interpréter les conditions présentes de la halde sud et pour évaluer des méthodes de contrôle potentielles. Davantage de caractérisation, principalement des changements de propriétés physiques dans le temps, et des raffinements ultérieurs seraient requis pour faire (le modèle TOUGH AMD) un outil prédictif plus fiable*".

Le rapport de 1991 fournit une description générale des mécanismes du DMA et une comparaison avec différentes caractéristiques des modèles de DMA existants à ce moment (GREGI, 1991-19, annexe C, Lefebvre 1991, tableau 2, p.14). Plusieurs de ces modèles DMA n'étaient pas commercialement disponibles et par conséquent ne pouvaient pas être utilisés comme point de départ pour le développement d'un modèle DMA pour des stériles. Les auteurs énumèrent les caractéristiques désirables suivantes pour un modèle DMA à la Mine Doyon:

- 1) *"Emploie un modèle de type shrinking reaction core;*
- 2) *Le taux de réaction est contrôlé uniquement par le transport de l'oxygène afin de simplifier les considérations cinétiques;*
- 3) *Considère la distribution granulométrique des stériles;*
- 4) *Fournit une description simple des composantes chimiques, nécessitant peu d'intrants. Modélisation des réactions utilisant des programmes spécialisés tel PHREEQE pouvant être utilisé pour compléter les résultats du modèle physique;*
- 5) *Utilise la diffusion et la convection comme mécanismes de transport de l'oxygène;*
- 6) *Simule la génération et le transfert de chaleur;*
- 7) *Considère l'infiltration;*

8) *Considère la géométrie de l'empilement*" (GREGI, 1991-19, annexe C, Lefebvre, 1991, p.17).

L'auteur a sélectionné un modèle numérique existant de type multiphase et multicomposante (*TOUGH2*) pour simuler la majorité des processus mentionnés précédemment et a décidé qu'un nouveau modèle devrait être ajouté pour considérer la réaction d'oxydation du sulfure. Le développement et l'application de ce modèle (*TOUGH AMD*) sont décrits dans le document synthèse de 1994 (GREGI, 1994-12). Le modèle final n'a pas été utilisé pour considérer des dimensions granulométriques variables et n'incluait pas une description simple des composantes chimiques. Les études subséquentes n'ont présenté aucune modélisation des réactions géochimiques utilisant des programmes comme PHREEQE (ou MINTEQ) pour compléter la modélisation physique de l'empilement. Quoique nous ayons été informé récemment qu'un tel travail est présentement en route (Lefebvre, 1996).

Un des membres de la révision secondaire (Morin, 1995a) a identifié une possible inconséquence concernant le bilan de masse des sulfates utilisés pour estimer le temps de "consommation" ("*burn out*") des sulfures et le bilan de masse des sulfates utilisés pour estimer la rétention des sulfates dans la halde (60% de la production annuelle). Les commentaires de la révision au sujet de la rétention des sulfates sont fournis au chapitre 5.0 à la section 5.6.3.

C'est notre opinion que leur estimé de la rétention des sulfates de 60% de la production annuelle est vraisemblablement une surestimation. L'accord entre les deux estimés indépendants du temps pour l'oxydation totale des sulfures obtenus (i) du bilan de chaleur et (ii) des bilans de masse suggère que pas plus de 10% des sulfates produits étaient retenus dans l'empilement à ce moment (1991). La rétention des sulfates pourrait très vraisemblablement avoir augmenté continuellement depuis ce temps. La forme principale d'emménagement des sulfates est assumée comme étant la jarosite. Il est invraisemblable que ce minéral soit en quantité si importante pour représenter 60% de la production annuelle de sulfates.

Un des principaux auteurs du rapport (Lefebvre, 1996) explique que "*les sulfates accumulés à l'intérieur de la halde ne sont pas seulement sous la forme minérale mais aussi dans une large part comme un lixiviat à concentration très élevée*". Il ne croit pas que leur évaluation des sulfates retenus soit surestimée puisque l'évaluation repose sur plus d'une méthode et s'harmonise avec les sulfates lixiviables déterminés à partir des rognures de forage.

Dans un document plus récent (GREGI, 1993-05), les auteurs mentionnent que "*le taux d'oxydation actuel de la pyrite est 16 443 t/an, seulement 1% de la masse initiale estimée totale de pyrite (1 471 394 t)*" (GREGI, 1993-05, p. 6). Par conséquent, si l'oxydation des sulfures se poursuivait au taux actuel, la pyrite serait complètement oxydée à l'intérieur des prochains 100 ans. La modélisation subséquente utilisant le modèle *TOUGH AMD* a fourni des estimés du taux d'oxydation des sulfures (exprimé en kg O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> j) selon différentes localisations dans l'empilement ainsi que des estimés de la fraction massique de pyrite non réagie (GREGI, 1994-12). Cependant, cette information ne semble pas avoir été utilisée pour obtenir un estimé révisé de la durée possible du DMA libéré sur ce site.

#### 7.4.2 Modèle minéralogique (conceptuel)

Un modèle conceptuel des transformations minéralogiques des aluminosilicates sous des conditions acides, est illustré dans le rapport "*Mineralogical Transformations Associated with AMD Production in a Waste Rock Dump. La Mine Doyon - South Waste Rock Dump*" (GREGI, 1994-06, Figure 11, p.30). Développer une bonne compréhension des transformations minéralogiques possibles et des réactions géochimiques associées est particulièrement important pour la modélisation prédictive du DMA dans les roches stériles.

Le rapport sur la minéralogie (GREGI, 1994-06, Section 3.2) décrit aussi leur estimation du transfert de masse minéralogique dans un trou de forage sur la base des différences de contenu en composés/élément entre des échantillons consécutifs d'eau interstitielle (exprimé sur une base sèche). Cette approche a été intéressante et dans ce cas, elle a été couronnée de succès. Cependant, nous ne sentons pas que cette approche pourrait être si aisément (et avec succès) appliquée à d'autres sites puisqu'elle dépend d'une connaissance *a priori* des minéraux spécifiques et de leur composition chimique et absence/présence confirmée le long du profil de forage, en plus d'une extraction et analyse exactes des concentrations dans l'eau interstitielle.

Les auteurs n'ont pas discuté de l'éventualité d'étendre leur examen du transfert de masse dans un trou de forage par une modélisation minéralogique et géochimique simplifiée de l'empilement en entier ou au moins d'une partie de l'empilement. Néanmoins ils ont déclaré qu'un manque de données de qualité de l'eau les ont empêchés d'accomplir la modélisation géochimique des interactions entre les phases minérales et l'eau interstitielle, bien qu'ils n'aient pas spécifié quel type de modélisation ils entendaient réaliser. Nous ne considérons pas qu'il y ait un manque de données de qualité de l'eau pour ce site. Cependant, les commentaires d'un des membres de la révision secondaire sont en désaccord à ce sujet (Morin, 1995a).

#### 7.4.3 Méthode de prédiction de la qualité de l'eau (empirique)

Les rapports "*Two Rapid Methods to Evaluate Acid Mine Drainage Composition: Total Dissolved Solids and Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy*" (GREGI, 1993-04) et "*Monitoring of Acid Mine Drainage: Chemical Data from La Mine Doyon, South Waste Rock Dump*" (GREGI, 1993-05) décrivent le développement et l'application d'une méthode pour estimer les niveaux de certains paramètres aqueux dans des lixiviats (*heap leachates*) et des eaux d'écoulement provenant de l'empilement. Les équations de corrélation ont été développées par l'analyse statistique de la base de données de la qualité de l'eau. Cette approche empirique est correcte et peut être utile pour d'autres sites, mais peut ne pas être appropriée pour d'autres sites avec un DMA moins bien établi et une plus petite base de données de qualité de l'eau. Ceci a été discuté au chapitre 5.0, section 5.6.4.

Les auteurs ont développé une matrice de corrélation pour treize paramètres de qualité de l'eau, bien qu'ils ne spécifient pas comment cette matrice de corrélation a été générée (présument, le coefficient de corrélation



Pearson) (GREGI, 1993-04, tableau 1). D'autres opérateurs de mine pourraient aisément accomplir une évaluation similaire avec les données de leur site, mais devraient avoir besoin de conseils additionnels.

Les équations de corrélation ont été développées pour prédire les niveaux d'acidité, d'aluminium, de fer total, de magnésium et de sulfates sur la base de la mesure des solides totaux dissous (*TDS*) et/ou de la conductivité (GREGI, 1993-04, tableau 2). Les relations pour calculer la composition chimique des échantillons d'eau ont été appliquées aux:

- échantillons d'eau souterraine provenant des puits d'observation;
- échantillons d'eau d'écoulement recueillis dans les fossés;
- échantillons de lixiviation des lysimètres;
- échantillons d'eau interstitielle provenant de la lixiviation (extraction) d'échantillons du forage de la halde.

Une révision des valeurs calculées et présentées dans différents rapports montre que l'utilisation d'équations pour calculer quelques paramètres était acceptable pour les échantillons d'eau recueillis des puits d'observation et des fossés collecteurs, mais n'était pas très fructueuse pour l'estimation de l'acidité ou des niveaux de fer dans l'eau d'écoulement provenant des lysimètres. Ceci n'a pas été noté dans le rapport d'auscultation (GREGI, 1993-05).

Les auteurs déclarent que *"ces corrélations sont significatives pour expliquer les processus de génération d'acide dans la halde. Les résultats indiquent que les échantillons de lixiviation provenant de la base de la halde et des fossés peuvent être vus comme une solution unique, montrant plus ou moins de dilution. Il est ainsi possible d'établir des relations pour le calcul de la concentration des constituants ayant une contribution majeure, comme Fe, SO<sub>4</sub>, Al, Mg et l'acidité sur la base des mesures de paramètres simples tels TDS et conductivité"* (GREGI, 1993-05, p.3). Cet énoncé de qualification est très important pour l'application de cette méthode empirique à d'autres sites. Un essai de similitude entre les données de trou de forage/puits et données d'écoulement et possiblement d'autres données de qualité de l'eau, semble nécessaire pour appliquer cette approche à d'autres sites (c.-à-d. est-ce que la dilution explique les différences dans les niveaux de concentration?). Une telle analyse serait utile comme préparation à la modélisation prédictive du DMA.

La corrélation développée à partir des données de 1991 (printemps, été) a été appliquée pour l'auscultation effectuée en 1992 (printemps, été, automne) et semble avoir été acceptable. Il serait intéressant de déterminer si la même corrélation peut encore être appliquée en 1993 et 1994. Puisque moins d'échantillons d'analyse seront mesurés dans les années subséquentes, il n'y aura pas une grande quantité de données additionnelles pour la mise à jour de la corrélation.

Leur méthode empirique a été développée comme un moyen de réduire les exigences d'analyses chimiques (c.-à-d. les coûts) et a été fructueuse à cet égard. Cependant, la corrélation développée se fie sur la mesure du *TDS* et/ou de la conductivité et par conséquent ne peut être étendue afin de prédire la qualité future de l'eau.

Une révision de la matrice de corrélation présentée au tableau 1 (GREGI, 1993-04, p. 3) montre qu'il y avait aussi une bonne corrélation entre le sulfate et les autres paramètres de l'eau. Ceci suggère que des équations similaires auraient pu être développées pour prédire les niveaux d'autres paramètres sur la base de la concentration en sulfate. Ces types d'équations pourraient possiblement être plus utiles comme support à la modélisation prédictive du DMA, laquelle implique typiquement le calcul de la libération du sulfate provenant de l'oxydation des sulfures.

## **7.5 Le modèle TOUGH AMD**

### **7.5.1 Commentaires de la révision**

Le rapport d'auscultation et de modélisation (GREGI, 1994-12, *Chapter 7: "Numerical Model of AMD Production in Waste Rocks"*) présente le développement du modèle *TOUGH AMD*. Les auteurs reconnaissent que: de nombreux processus physiques et géochimiques sont impliqués dans la production de DMA, que la majorité de ces processus sont associés, et que la modélisation numérique permet une représentation quantitative simultanée de la majorité de ces processus. Cependant, le centre de leur travail était de parvenir à une meilleure compréhension des processus physiques impliqués dans le DMA. (Les processus géochimiques n'étaient pas représentés dans le modèle de DMA qui a été développé).

Leur approche globale était d'étudier les processus physiques de chaleur/température et le transport et la consommation d'oxygène en relation avec l'oxydation de la pyrite.

Ce travail représente une entreprise considérable qui a été bien planifiée et bien présentée et qui a fourni une bonne compréhension des conditions actuelles à l'intérieur de la halde sud. Toutefois, nous ne considérons pas qu'une telle approche soit appropriée pour la prédiction du DMA dans d'autres sites pour plusieurs raisons:

- un programme intensif de terrain est requis pour des données de température et d'oxygène (ils recommandent au moins une année d'auscultation). Bien qu'une base de données étendue soit désirable pour soutenir la modélisation prédictive, la cueillette de profils de température et d'oxygène nécessite un programme de forage qui pourrait ne pas être techniquement faisable sur certains sites;
- aucune information sur les processus géochimiques en cours dans l'empilement n'a été utilisée dans la modélisation. Par conséquent aucune interprétation ou conclusion ne peut être faite concernant la qualité de l'eau et les produits d'oxydation emmagasinés. Leur approche était d'étudier en premier les comportements physiques de base du système. Nous croyons que le comportement géochimique devrait être examiné simultanément aux processus physiques;

- il y a plusieurs problèmes inhérents aux hypothèses sous-jacentes à leur approche et ceux-ci sont exposés plus bas.

Les auteurs identifient la nécessité de considérer les phases gazeuse, liquide et solide; cependant ils ont choisi de sous-estimer l'importance de la phase solide. "*Si nous supposons que les propriétés des solides doivent être traitées globalement, il n'est pas nécessaire d'inclure spécifiquement une phase solide et ses composantes dans le système*" (GREGI, 1994-12, p.7.2). Alors que ceci est compréhensible puisqu'ils se concentrent sur le transfert de chaleur et de gaz, une telle approche ne serait pas acceptable pour des applications géochimiques.

Comme il apparaissait le plus adéquat pour représenter le DMA et parce qu'il représentait déjà les "processus physiques" impliqués dans le DMA, les auteurs ont sélectionné un modèle hydrogéologique existant (*TOUGH2*). Ils font référence à une revue de littérature par Mangold et Tsang (1991), laquelle considérait les modèles souterrains hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Incidemment, une revue antérieure des modèles disponibles sur le DMA a été réalisée par Lefebvre (1991) et elle est présentée dans le Rapport GREGI, 91-19 (Annexe C).

Le modèle *TOUGH AMD* emploie le *shrinking reaction core model*. Les hypothèses inhérentes sont:

- particules sphériques de dimension uniforme;
- pyrite essentiellement "libre" et complètement oxydable;
- particules restent de la même dimension, seulement le noyau de la pyrite est consommé.

Selon notre opinion, le *shrinking reaction core model* décrit à la section 7.2 et illustré à la figure 7.1 (GREGI, 1994-12) est actuellement plus adéquat pour simuler les particules fines comme les résidus miniers (*tailings*).

Les études réalisées à la Mine Doyon incluaient l'observation sur le terrain de la distribution granulométrique, l'examen minéralogique de la géométrie des particules pour les principaux types de roches et l'estimation de la superficie de la surface réactive de la pyrite en utilisant plusieurs méthodes différentes. Par conséquent, il y avait une grande quantité d'information disponible pour décrire la géométrie des particules et l'aire de la surface réactive. Cependant, aucune de ces études n'a été discutée dans leur description du modèle *TOUGH AMD*. Par exemple, la section 3.7 (GREGI, 1994-12) affirme qu'une "*description géométrique est nécessaire pour les modèles de type "shrinking-core reaction" et il a été montré que différents types de roches brisent selon différentes formes qui peuvent être assimilées à des cubes, des plaques et des disques*" (GREGI, 1994-12, p.3.9). Les chercheurs n'expliquent pas pourquoi ils ont décidé d'utiliser une sphère pour leur modèle de type *shrinking reaction core*. De plus, la dimension des particules reste difficilement constante dans un environnement acide.

Dans un rapport précédent (GREGI, 1991-19), les auteurs notent que "*l'oxydation de la pyrite dans les schistes est un phénomène de plus courte durée que pour d'autres unités où l'altération est contrôlée par la diffusion*"

de l'oxygène (*shrinking core models*) à travers de larges blocs solides " (GREGI, 1991-19, p.x). Ceci est intéressant puisque le modèle plus récent *TOUGH AMD* (GREGI, 1994-12) était basé sur le *shrinking core model* et ne faisait pas la distinction entre les schistes à séricite plus réactifs et les autres types de roche.

Les auteurs n'ont pas fait de distinction entre l'oxydation chimique et biologique des sulfures et ils n'ont pas considéré l'effet du pH. L'oxygène est considéré comme le seul oxydant des sulfures, évitant la nécessité de la différenciation des composantes du lixiviat (c.-à-d. ion ferrique). *"De plus, le taux d'oxydation volumétrique est supposé indépendant des conditions géochimiques dans le lixiviat, tels le pH, le Eh et la concentration en ion. Cette même hypothèse a été posée par Cathles et Schlitt (1980), en plus de Pantellis et Ritchie (1991), pour éviter d'accomplir des calculs de différenciation des composantes comme pour le modèle développé par Jaynes (1983)"* (GREGI, 1994-12, p.7.5). L'effet du pH sur le taux d'oxydation des sulfures est significatif et leur omission de l'effet du pH ne peut être justifié que sous les conditions spécifiques rencontrées à la Mine Doyon où le pH du lixiviat s'est acidifié rapidement et est resté inférieur à 3. Ceux qui tentent de modéliser un empilement sur d'autres sites doivent être prévenus contre l'omission des effets du changement de pH et des conditions géochimiques à mesure que les empilements deviennent (graduellement) générateurs d'acide.

Un des principaux chercheurs (Lefebvre, 1996) est d'accord avec ce point et commente *"le modèle numérique n'est pas universellement applicable, mais dans les sites où la convection domine ..., c'est le processus physique qui détermine le taux d'oxydation global... . Dans de tels cas, qui sont vraisemblablement nombreux considérant les propriétés physiques normales des roches stériles, ... une approche telle que la nôtre (chercheurs), avec les améliorations appropriées, pourrait grandement accroître la capacité de l'industrie à prédire la production de DMA et à gérer les haldes de stériles actuelles et futures"*.

Le modèle *TOUGH AMD* tient compte de l'air et de l'oxygène, mais l'effet (chimique) du dioxyde de carbone n'est pas considéré. Ceci est particulièrement important par rapport à l'oxydation biologique des sulfures.

La dépendance du taux d'oxydation à la température a été incorporée en employant un facteur de température plutôt qu'en utilisant des relations bien établies, c.-à-d. relation d'Arrhénius. Ceci est curieux considérant que le modèle *TOUGH* comprend actuellement une option pour l'emploi de la relation d'Arrhénius (GREGI, 1994-12, p.7.15).

Le modèle du noyau de réaction employé fournit une relation qui est utilisée pour exprimer le taux d'oxydation volumétrique comme il est montré à l'équation 7.1 (GREGI, 1994-12, p.7.6). Il y a plusieurs questions qui peuvent être soulevées par rapport à cette approche.

- la constante cinétique volumétrique globale  $K_{ox}$  est fonction de la constante cinétique de premier ordre  $k_{ox}$  et de quelques paramètres physiques ou géométriques, c.-à-d. l'aire de la surface de pyrite par unité de volume ( $a_{Py}^{rock}$ ), le rayon des particules de roches ( $R$ ), l'épaisseur de la couche où l'oxydation de la pyrite est active; nous assumons qu'il s'agit de la couche "b" à la figure 7. Incidemment, la valeur numérique de " $R$ " (rayon des particules de roches) n'est pas mentionnée nulle part dans le rapport.

- "la constante cinétique de premier ordre  $k_{ox}$  (m/s) représente le taux de consommation d'oxygène pendant la réaction d'oxydation de surface de la pyrite et possède une valeur relativement constante et bien définie (Otwinski 1993)" (GREGI, 1994-12, p.7.6).
- la valeur de  $k_{ox}$  est relativement constante, à un pH et à une température donnés. Donc  $K_{ox}$  (constante cinétique volumétrique globale) est essentiellement constante et déterminée par des paramètres physiques ou géométriques, un de ceux-ci ( $a_{Py}^{rock}$ ) n'est pas bien caractérisé. Les méthodes chimiques et visuelles utilisées pour caractériser l'aire de la surface réactive de la pyrite n'ont pas fourni d'estimés appropriés (voir discussion au chapitre 5, section 5.3.2).
- l'équation 7.1 (GREGI, 1994-12, p.7.6) contient trois éléments,  $X_T$  (température),  $f(X)$  and  $X_{wo}$ , auxquels ont été assignés des valeurs entre 0 et 1. Nous avons déjà commenté l'utilisation qui a été faite du facteur de température.
- l'élément  $X_{wo}$  est défini comme la densité partielle de l'oxygène dans le facteur cinétique de la phase liquide. Cette définition est quelque peu ambiguë et donc sans signification.
- la figure 7.3 (GREGI, 1994-12, p.7.8) suggère que  $X_T = 1$  pour des températures inférieures à 65 °C, ce qui signifie qu'il n'y a pas de réduction dans les taux pour des températures plus froides. La figure 7.3 suggère que la fraction massique de l'oxygène dans l'air atteint 0,02(?), ce maximum devrait être 0,20. De plus, comment on a tenu compte de la non linéarité apparente des profils  $X_T$  et  $X_{wo}$ , dans leur modèle n'est pas claire.

Le facteur le plus important semble être  $f(X)$ , lequel est décrit à l'équation 7.3 (GREGI, 1994-12, p.7.7). Alors que la formulation générale de cette équation semble être correcte, il n'y a pas d'équations intermédiaires fournies pour montrer comment l'équation 7.3 a été développée. Quelques questions additionnelles peuvent s'ajouter:

- la figure 7.2 (GREGI, 1994-12, p.7.7) montre les profils de  $f(X)$  versus  $(1-X)$ ; nous assumons que les lignes pour un rapport constant ( $t_d/t_c$ ) devraient être en réalité ( $\tau_d/\tau_c$ ).
- les termes  $\tau_d$  et  $\tau_c$  dépendent de la dimension initiale des particules, cependant la dimension initiale des particules n'est pas spécifiée dans le rapport.

Les termes  $\tau_d$  et  $\tau_c$  ne peuvent s'additionner. Les deux processus ont lieu simultanément. L'idée d'ajouter ces termes provient de Cathles, qui a depuis révisé son approche. La combinaison additive ne peut être faite que si un terme, c.-à-d. soit  $\tau_d$  ou  $\tau_c$ , domine; la figure 7.3 montre clairement que ce n'est pas le cas.

Le tableau 7.1 (GREGI, 1994-12, p.7.13) présente les phases et les composantes du système. La composante air devrait être scindée en oxygène et autres gaz. La composante chaleur est absente. La phase solide devrait aussi être incluse pour tenir compte de la conduction de chaleur présenté dans l'équation 7.16 (GREGI, 1994-12, p.7.11).

L'équation 7.15 (GREGI, 1994-12, p.7.11) contient un terme pour le flux de diffusion de la composante K dans la phase gazeuse,  $f_K^g$ . Ce terme est basé sur un gradient de concentration locale à la limite de la surface; ceci ne peut être estimé avec précision à partir du volume des bilans de masse moyens comme il est montré dans l'équation 7.12 (GREGI, 1994-12, p. 7.10).

"Le flux massique advectif de phases (liquide ou gaz) est déterminé par la forme générale de la loi de Darcy pour un écoulement multiphase multiplié par la densité de la phase:" (GREGI, 1994-12, p.7-11 et l'équation 7.17),

$$F_b = K \frac{K_{rb}}{m_b} r_b (P_b - r_b g) \quad \text{où } P_b = P_{\text{reference}} + P_{c\beta}$$

Il y a plusieurs problèmes avec l'équation précédente:

- l'équation est incorrecte au plan conceptuel et dimensionnel;
- $r_b$  n'est pas un terme de flux, c.-à-d. les unités ne sont pas  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;
- le terme  $r_b$  n'est pas un terme de pression ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ );
- le terme  $\Delta$  est absent, sauf si  $r_b = \nabla$  ;
- le terme  $r_b$  n'est pas défini;
- il semble que le terme de distance ( $\Delta$ ) soit manquant.

"Le flux massique de diffusion est proportionnel au gradient dans la densité partielle de la composante de la phase gazeuse  $r_k$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )" (p.7.12, GREGI, 1994-12). Le gradient devrait être exprimé comme suit et non comme il est montré dans l'équation 7.18 (GREGI, 1994-12, p.7.12).

$$\frac{\nabla r_k}{\nabla x}$$

De plus, les unités de  $f_k^g$  dans l'équation 7.18 ne correspondent pas à un flux [c.-à-d. ne sont pas en  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ].

La méthode d'obtention du facteur de conversion  $F_h$  (-12,58 MJ/kg  $\text{O}_2$ ) de l'équation 7.19b n'est pas mentionnée (GREGI, 1994-12, p.7.12). Nous assumons qu'il a été calculé de l'enthalpie de la réaction.

De façon générale, il y a un problème récurrent avec la terminologie comme il est démontré par les exemples qui suivent.

- "thermodynamic equilibrium conditions are assumed locally" (p.7-3 et aussi p.7-13, GREGI 1994-12). L'équilibre thermodynamique exclurait toute réaction net; nous assumons qu'ils voulaient dire en réalité des conditions à l'équilibre ou près de l'équilibre.
- "in waste rock dumps, pyrite is contained in rock **blocks** and surrounded by other minerals ... pyrite oxidation proceeds from the surface of waste rock **blocks** ... a zonation appears within the waste rock **blocks** ... the rate of oxygen diffusion in the **blocks** ..." (p.7-4, GREGI 1994-12). Nous assumons que l'utilisation du terme *block* voulait dire en réalité les particules de stériles puisque ce terme a une connotation beaucoup plus large telle une zone ou possiblement un empilement.
- leur utilisation des termes "primary variable", "second primary variables", "secondary parameters depending on the primary variables" est déroutante. Il serait préférable d'utiliser des termes tels que variables indépendantes, variables dépendantes et paramètres calculés.

En général, il est difficile de distinguer entre les variables dépendantes, indépendantes et prédites. Les variables dépendantes semblent inclure: la température, la fraction massique de l'oxygène, le débit d'air (*air flow rate*) et le taux d'oxydation. Les autres variables prédites semblent être déterminées par association de ces variables dépendantes.

Le tableau 7.2 (GREGI 1994-12, p.7.17) fait une liste des propriétés physiques (ou intrants) utilisées pour la simulation du cas de base. Quelques uns de ces paramètres ne sont pas conventionnels et n'ont pas été définis comme il est montré par les exemples qui suivent.

- la constante d'oxydation volumétrique  $K_{ox} = 0,75 \times 10^{-6} (s^{-1})$  a été définie précédemment à l'équation 7.1 comme étant la constante cinétique volumétrique globale. Il aurait été intéressant de connaître quelles valeurs ont été utilisées pour  $k_{ox}$ ,  $a_{py}^{rock}$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  afin de calculer  $K_{ox}$  dans l'équation 7.2 (GREGI 1994-12, p.7.6).
- le ratio des temps totaux diffusion/chimique (*diffusive/chemical total times*),  $t_d/t_c = 2,5$ , est assumé comme référant réellement à  $\tau_d/\tau_c$ . La raison du choix d'une valeur de 2,5 pour le cas de base n'est pas claire alors que ce ratio est présenté précédemment comme étant situé entre 0 et 3 aux figures 7.2 et 7.4 (GREGI 1994-12, p.7.8 et 7.9).
- le coefficient de diffusion standard  $D_o = 2,13 \times 10^{-5} m^2/s$  est assumé comme celui de l'oxygène dans l'air.
- le coefficient de diffusion de la température  $\theta = 1,80$  n'a pas de signification s'il n'a pas de dimensions. Ça ne peut pas être le facteur cinétique de température  $X_T$  (lui aussi mal défini) car il a une valeur entre 0 et 1.
- les facteurs van Genuchten "m" (0,23) et " $\alpha$ " ( $0,504 Pa^{-1}$ ) n'ont pas été définis.

La simulation du cas de base compte pour quinze ans incluant les neuf années où la halde a été en place. Il aurait été utile si les auteurs avaient présenté des données de terrain pour démontrer la calibration du modèle et la précision des prédictions.

Nous sommes en désaccord avec l'affirmation à l'effet que *"il serait irréaliste de modéliser le comportement de la halde pour une période plus longue étant donné l'incertitude dans notre (leur) connaissance du site et en particulier l'absence de données sur l'évolution des propriétés physiques dans le temps, lesquelles pourraient affecter de façon significative le comportement de la halde "* (GREGI 1994-12, p.7-16). Un des principaux objectifs de la modélisation est de prédire ce qui pourrait arriver dans l'avenir. Si le modèle peut montrer (i) qu'il simule avec précision les conditions actuelles (observées) et (ii) présente des réponses correctes (prévues ou compréhensibles) aux changements dans la valeur des paramètres, alors nous devrions avoir une certaine confiance dans les prédictions futures.

Les résultats présentés dans ce rapport n'ont pas montré s'ils étaient ou non en accord avec les mesures de terrain. Cependant, nous pouvons voir que le modèle a recréé quelques-unes des tendances décrites et pourrait être utilisé pour examiner les effets de changements dans les paramètres avec un certain succès. Il serait peut être nécessaire de présenter un rapport séparé, soit un sommaire/résumé de la thèse de doctorat (Lefebvre, 1994) afin de décrire leur travail de modélisation, incluant: les bases théoriques du modèle montrant le développement d'équations étape par étape, la description des méthodes utilisées pour estimer les paramètres importants; la calibration par rapport aux données de terrain, la simulation de différents scénarios pour faire l'examen de l'effet des changements au niveau des paramètres (physiques) et la discussion sur l'application potentielle à d'autres sites.

Finalement, un des réviseurs présente les commentaires additionnels suivants. *"le mouvement de l'air, de l'eau et des solides partout dans la halde est vraisemblablement contrôlé par la stratigraphie des types de roches dans la halde, incluant la continuité et la pente des couches et la granulométrie in-situ. Il est intéressant de constater que la stratigraphie n'est pas discutée de façon raisonnablement détaillée dans ce rapport, seulement des mentions occasionnelles sont trouvées comme "Dans le puit #5, la roche stérile comprend du mort-terrain de granulométrie fine " (GREGI, 1994-12, p. 6.11). Donc, un contrôle fondamental sur les distributions observées d'eau, des gaz et des solides est absent. Ceci soulève une question sur la valeur de la modélisation de la section 7 qui tente "d'identifier les paramètres ayant le plus grand impact sur le comportement du système" (GREGI, 1994-12, p. 7.16)" (Morin, 1995b).*

## **7.5.2 Commentaires concernant l'application du modèle TOUGH AMD**

Les résultats des simulations accomplies avec le modèle TOUGH AMD sont présentés à la section 7.5 du rapport *"Monitoring and Modelling of Acid Mine Drainage from Waste Rock Dumps. La Mine Doyon Case Study"* (GREGI, 1994-12). Les illustrations des conditions prédites (c.-à-d. la concentration en oxygène, la température, la vitesse de l'air, etc.) à des localisations spécifiques dans l'empilement sont assez efficaces pour supporter leur interprétation des processus physiques qui ont lieu.



Seulement des exemples sélectionnés de l'application du modèle sont présentés dans le document synthèse (GREGI, 1994-12). Selon toute évidence, du travail additionnel a été effectué mais il n'est pas spécifiquement décrit. Le lecteur est référé à Lefebvre (1994) pour un exposé plus détaillé du travail de modélisation.

À partir de la section 7.5.3 et de la figure 7.7 (GREGI, 1994-12, p.7.21), nous pouvons conclure que le processus de transfert par advection de la vapeur d'eau est responsable de la redistribution de l'eau dans la halde et résulte dans une teneur en eau plus uniforme dans l'empilement. De plus, l'évaporation entraîne la précipitation de sels dans l'empilement. Les auteurs notent que la vapeur d'eau condense dans les zones plus froides près de la surface ce qui contribue à une plus grande infiltration. Ils signalent des variations de la saturation en eau dans la halde de 37,5% à 41,5%. Cette petite variation indique une assez grande uniformité quand à l'humidité de l'environnement.

À partir de la section 7.5.4 et de la figure 7.8 (GREGI, 1994-12, p.7.23), on peut voir que leur modèle a prédit qu'environ 30% de la pyrite a été consommé, mais une très faible quantité de pyrite a été oxydée dans le noyau de l'empilement (GREGI, 1994-12, figure 7.6c, p. 7.19). Les auteurs mentionnent que "*dans une halde possédant une étendue latérale plus petite, il resterait beaucoup moins de pyrite*" (GREGI, 1994-12, p.7-22). L'information concernant l'impact de la dimension de la halde sur l'oxydation globale de la pyrite est fournie dans Lefebvre (1994).

Les concentrations en sulfate montrées à la figure 7.8c (GREGI, 1994-12, p.7.23) sont très élevées (>200 g/L) parce que leur modèle n'inclut pas la précipitation du sulfate (comme gypse ou jarosite). Des concentrations en sulfate aussi élevées que 150 g/L dans l'eau interstitielle ont été signalées ailleurs dans le document et ils auraient pu montrer une courbe additionnelle pour les concentrations moyennes en sulfate mesurées pendant cette période de temps pour fins de comparaisons avec les valeurs prédites de la figure 7.8c.

La section 7.5.5 et la figure 7.9 (GREGI, 1994-12, p.7.25) montrent l'effet des changements de perméabilité sur les prédictions du modèle; bien que les auteurs ne donnent pas d'instructions au lecteur pour établir visuellement une comparaison des figures 7.9 (cas perméable/anisotropique) et 7.6 (cas de base). Les auteurs mentionnent que cela illustre la nécessité d'une caractérisation consciencieuse des haldes de stériles afin de prédire leur comportement et ils recommandent le développement de méthodes de terrain pour déterminer l'anisotropie de la perméabilité. Ils concluent que la perméabilité est le paramètre clé déterminant la convection. Ce qui est supporté par les résultats présentés.

La section 7.5.6 et les figures 7.10 à 7.12 (GREGI, 1994-12, pp.7.27 to 7.29) présentent une étude de modélisation de l'effet d'une membrane de bordure (c.-à d. une couverture pour prévenir l'entrée latérale de l'air par les côtés de la halde). Les figures 7.10a et 7.11a décrivent la formation d'un patron de cellules de recirculation (*eddy flow pattern*) à l'intérieur de l'empilement en présence d'une membrane. Ceci est vraisemblablement un artéfact de la définition des frontières et/ou les méthodes numériques utilisées dans le modèle. Quelques autres groupes de modélisation ont initialement signalé des prédictions similaires de patrons

de recirculation (*eddy pattern*), mais les ont éliminés après avoir corrigé leur(s) modèle(s). La formation de recirculation n'a pas été observée à grande échelle dans les études de terrain à la Mine Doyon et n'a pas été observée à d'autres sites. La figure 7.12 montre leur simulation de l'installation d'une membrane de bordures, comparativement au cas de base. Le taux de consommation d'oxygène et la fraction massique de l'oxygène sont prédits pour s'abaisser rapidement, la température est prédite pour diminuer graduellement mais le sulfate est prédit pour baisser très lentement à cause d'une infiltration plus faible (c.-à-d. dilution) et d'une lente libération du DMA emmagasiné. Nous pouvons conclure que leur modèle de DMA prédit correctement les effets (prévus) et serait utile pour l'examen d'autres options (similaires) de fermeture pour l'empilement.

Les auteurs discutent du besoin éventuel de neutralisation interne (c.-à-d. addition alcaline) (GREGI, 1994-12, p.7.26). Cependant, leur modèle ne peut être utilisé pour évaluer le besoin de neutralisation du DMA emmagasiné. Des considérations géochimiques devront être ajoutées au modèle pour considérer l'emmagasinement et la libération du DMA ainsi que la dissolution des minéraux tampons. Sous des conditions de faible écoulement résultant d'une couverture sur l'amas, la dissolution des minéraux tampons peut changer de façon significative la nature de l'eau de percolation. Typiquement, ces minéraux tampons fournissent trop lentement leur capacité de neutralisation dans des conditions normales (plus élevées) d'infiltration.

La section 7.5.7 (GREGI, 1994-12) commente brièvement les limitations du modèle *TOUGH AMD* et la recherche future. Les auteurs expliquent que "*les différences entre les prédictions du modèle et les observations de terrains mettent en évidence les limitations du modèle numérique et, en général, la (leur) connaissance de certains des processus clés reliés à la production de DMA*". (GREGI, 1994-12, p.7.30). Nous aurions préféré voir quelques comparaisons entre les prédictions du modèle et les observations de terrain.

Les auteurs concluent que leur connaissance générale des processus clés reliés au DMA est limitée. Nous ne considérons pas que leur connaissance soit limitée; une partie des connaissances acquises dans d'autres études sur le site n'a simplement pas été appliquée au développement de leur modèle (les études minéralogiques, l'aire de la surface réactive, les caractéristiques d'altération, la base de données de la chimie de l'eau, etc.).

## **7.6 Nouvelles connaissances**

Les sections précédentes présentent nos commentaires détaillés provenant de la révision des études effectuées à la Mine Doyon. Les points suivants résument nos commentaires concernant les principales "nouvelles connaissances" provenant de ces études:

- les études à la Mine Doyon représentent un bel exemple de la façon d'accomplir l'échantillonnage et l'examen de stériles pour recueillir les informations nécessaires à la modélisation et à la prédiction du DMA.

- les modèles thermiques développés pour ce site peuvent fournir une définition des paramètres de transport qui peuvent être utilisés dans une modélisation subséquente du DMA, bien que ces paramètres devraient être vérifiés par d'autres méthodes avant leur utilisation.
- les essais de dureté (c.-à-d. Los Angeles, Micro-Deval et sulfate de magnésium) ont montré qu'ils pouvaient fournir une mesure quantitative directe des particules fines additionnelles qui peuvent être produites comme résultat des processus d'altération. Cette information peut être utilisée pour calculer l'aire additionnelle de surface réactive résultant de l'altération, laquelle est un important paramètre requis pour la modélisation/prédiction du DMA.
- il a été montré que l'emmagasinement d'eau dans l'empilement est important et influencé par les processus d'altération qui créent graduellement plus de particules fines pouvant à leur tour retenir encore plus d'humidité. Leur travail montre qu'il est important de mesurer la teneur en eau actuelle en relation avec la capacité du terrain afin d'estimer avec précision l'emmagasinement d'eau actuel et futur et le flux d'infiltration.
- le processus de transfert de la vapeur d'eau par advection est responsable de la redistribution de l'eau à l'intérieur de la halde, ce qui résulte en une teneur en eau plus uniforme. De plus, l'évaporation entraîne la précipitation de sels à l'intérieur de l'empilement et la condensation de la vapeur d'eau dans les zones plus froides près de la surface contribue à augmenter l'infiltration.
- deux estimés indépendants de la durée possible du DMA sur ce site ont été préparés sur la base de (i) le bilan de chaleur et (ii) le bilan de masse du sulfate et du fer. L'utilisation de deux méthodes indépendantes fournit une plus grande confiance dans leur estimé moyen d'approximativement 100 ans bien que l'approche du bilan de masse n'ait pas permis de considérer l'acidité emmagasinée dans la halde. La méthode du bilan de masse est simple et peut être appliquée à d'autres sites. Cependant, la procédure de calcul pour le bilan de chaleur n'est pas simple et requiert un programme étendu d'auscultation de la température pour estimer les paramètres de chaleur.

*"L'estimé de 100 ans est basé sur une production continue de DMA selon le taux actuel et est (un estimé) utilisé seulement afin de mettre en perspective la grande quantité potentiel de DMA restant à produire sur le site. Le temps réel qui sera requis pour produire tout ce DMA potentiel sera beaucoup plus long puisque le taux de production est prévu pour décroître avec le temps (les données thermiques indiquent que cela se produit actuellement)" (Lefebvre, 1996).*

- les études minéralogiques ont produit un modèle conceptuel de transformations minéralogiques des aluminosilicates sous des conditions acides. Le développement d'une bonne compréhension des transformations minéralogiques possibles et des réactions géochimiques associées est particulièrement important pour la modélisation prédictive du DMA dans les stériles.
- les chercheurs ont utilisé une approche empirique pour développer des équations de corrélation afin de prédire les niveaux d'acidité, d'aluminium, de fer (total), de magnésium et de sulfates sur la base des mesures de solides totaux dissous (TDS) et/ou de conductivité. Cette méthode empirique leur a permis de réduire les exigences d'analyses chimiques et les coûts. Cependant, la corrélation développée est

basée sur la mesure du TDS et/ou de la conductivité et donc ne peut pas être prolongée pour prédire la qualité future de l'eau.

- la modélisation physique utilisant le modèle *TOUGH AMD* développé pour ce site a montré que le modèle recrée quelques-unes des tendances décrites pour la circulation de l'air dans l'empilement et pourrait être utilisé pour examiner les effets de changements sur les paramètres, avec un certain succès.

## **7.7 Études futures et coûts associés**

### **7.7.1 Études sur le terrain et en laboratoire**

Les études sur le terrain et en laboratoire suivantes ont été suggérées par les chercheurs dans le document synthèse "*Monitoring and Modelling of Acid Mine Drainage from Waste Rock Dumps. La Mine Doyon Case Study*" (GREGI, 1994-12, section 7.5.7):

- étude additionnelle de l'infiltration d'eau dans un matériel poreux grossier et hétérogène;
- étude additionnelle du transport massique dans la zone non saturée;
- étude additionnelle du comportement géochimique du lixiviat, c.-à-d. interaction avec les roches et la précipitation des minéraux;
- plus de caractérisation de sites avec des programmes d'auscultation intégrés et de modélisation;
- développement de méthodes afin de mieux caractériser la perméabilité (infiltration de l'eau et convection des gaz);
- caractérisation des changements dans les propriétés physiques des stériles avec le temps, plus particulièrement l'effet de la précipitation minéralogique sur la perméabilité.

\* see next page for missing paragraph

Au sujet des estimés d'infiltration, les auteurs notent que "*des sujets importants comme la vitesse d'écoulement (seepage velocity) ou le temps de résidence moyen dans la halde ne peuvent être analysés avec les données actuelles*" (GREGI, 1994-12, p. 4-35). Ils recommandent des essais d'infiltration contrôlée utilisant des pluies simulées et des essais avec traceurs et des techniques spéciales d'échantillonnage pour la zone non saturée (sondes à neutrons, lysimètres par succion). Considérant que les lysimètres sont déjà en place, le programme de terrain proposé fournirait vraisemblablement des informations intéressantes. Cependant, un éventail de vitesse d'écoulement peut être estimé des débits mensuels d'infiltration et le temps de résidence moyen peut

A partir de la révision de tous les documents décrivant les études réalisées sur ce site, nous pouvons conclure qu'il y a actuellement suffisamment de données pour entreprendre les travaux cités plus haut et alors réévaluer si des études de terrain/laboratoire sont réellement requises. Donc, les coûts associés pour ces études futures représenteraient les coûts de main-d'oeuvre pour l'évaluation additionnelle des données existantes.

être caractérisé en utilisant une distribution basée sur l'ensemble des estimés préparés pour caractériser l'emmagasinement de l'eau dans l'empilement. Les auteurs mentionnent aussi que l'évaporation devrait être évaluée en utilisant le bilan énergétique et la technique du transfert massique (transfert turbulent de la vapeur d'eau par vortex (*eddy motion*)). Selon notre opinion, les études sur la chaleur (température) et les gaz réalisées sur la halde devraient avoir fourni suffisamment de données pour des évaluations (préliminaires) de l'évaporation. Par conséquent ces études additionnelles représenteraient tout au plus deux à trois semaines de temps technique.

### **7.7.2 Évaluation technique des données existantes**

Selon notre opinion, la quantité et la qualité des données et informations disponibles provenant des études réalisées à la Mine Doyon sont vastes et imposantes. Il devrait être noté que notre critique technique n'a pas considéré qu'il y avait peut être eu des contraintes de temps et possiblement de budget qui pourraient avoir influencé de façon significative la portée et la direction des programmes de recherche et possiblement restreindre l'habileté des chercheurs à compléter leurs tâches d'évaluation et d'intégration de cette vaste quantité d'information avant la soumission des documents. Cet aspect explique probablement la majorité des commentaires provenant de notre critique technique détaillée de ces études. Par conséquent, nos recommandations pour des études additionnelles sont essentiellement pour une évaluation technique additionnelle de la base de données existantes.

Nous considérons qu'il est approprié de fournir aux chercheurs originaux l'opportunité de compléter leur évaluation du site. Il y a eu l'avantage du temps (examen rétrospectif) pour reconsidérer les données et les informations recueillies par les études. Il y a maintenant une révision détaillée des études à la Mine Doyon qui fournit une vision additionnelle (et un certain recul).

Nous avons identifié plusieurs domaines où une évaluation technique additionnelle pourrait être effectuée afin de supporter la modélisation du DMA: soit des essais d'extraction ou lixiviation des lysimètres et la neutralisation par les aluminosilicates.

### **Essais de lixiviation/extraction**

Les travaux d'essais de lixiviation effectués avec les échantillons de forage semblent être rapides et faciles à appliquer sur un grand nombre d'échantillons (c.-à-d. ils ont été effectués sur 150 échantillons) et pourraient être utiles afin de caractériser des échantillons d'eau interstitielle/roche à d'autres sites. Cependant une interprétation additionnelle est requise pour supporter l'utilisation de cette information dans le modélisation/prédiction du DMA. Les données de qualité de l'eau obtenues de la resuspension des précipités formés sur les échantillons de roches provenant du forage à l'air ne sont pas exactement des données de qualité de l'eau interstitielle, considérant que certains composés étaient en fait peut-être présents comme minéraux secondaires précipités avant le forage/échantillonnage. Par ailleurs, les données de qualité de l'eau provenant de l'extraction des rognures de forage n'indiquent pas quels minéraux/précipités sont présents ou la quantité possible des minéraux/précipités. Les échantillons de forage (roches) nécessiteraient d'être analysés chimiquement et/ou la minéralogie devrait être décrite en utilisant la pétrographie ou des analyses *XRD* pour obtenir cette information. Par conséquent une évaluation additionnelle devrait être effectuée pour:

- (i) comparer la qualité de l'eau interstitielle extraite (resuspension) à la qualité de l'eau interstitielle "réelle" obtenue en utilisant une presse à pression [c.-à-d. les valeurs correspondantes dans les tableaux 5.6 à 5.9 avec le tableau 5.10, (GREGI 1994-12)];
- (ii) comparer les analyses de roches correspondantes des échantillons de forages et la qualité de l'eau extraite à différentes localisations/profondeurs dans la halde (ceci pourrait inclure l'utilisation de modèle de différenciation des composantes tel MINTEQ ou PHREEQE).

Les données existent déjà. Par conséquent cette évaluation additionnelle représenterait un minimum d'effort et de coûts additionnels, peut-être deux à trois semaines de temps techniques.

### **Étude avec lysimètre**

Les rapports fournissent quelques données initiales provenant des lysimètres de terrain (c.-à-d. du 11 août 1992 au 7 juillet 1993). En assumant que l'auscultation des lysimètres s'est poursuivi sur une base régulière, une évaluation en profondeur de l'information des lysimètres devrait être effectuée pour:

- évaluer la performance opérationnelle associée avec l'installation d'une série de lysimètres à différents niveaux dans l'amas;
- examiner le développement de la qualité de l'eau (mesurée) en relation avec les caractéristiques observées des roches (c.-à-d. minéralogie, granulométrie, etc.);
- déterminer si les résultats des études avec lysimètres peuvent être extrapolés pour estimer l'étendue possible de la génération de DMA de l'amas.

Cette évaluation additionnelle requièrerait deux à trois semaines de temps technique, en assumant que l'auscultation des lysimètres s'est poursuivi et que les données disponibles sont adéquates pour une telle évaluation en profondeur.

### **Le tamponnage (*Buffering*) par les aluminosilicates**

Des travaux futurs pour évaluer le potentiel de neutralisation et l'impact possible des aluminosilicates sur la qualité de l'eau seraient dignes d'un grand intérêt. De telles expériences pourraient déterminer quand la neutralisation débute réellement, ainsi que le taux auquel ces minéraux peuvent se dissoudre pour fournir un effet tampon. Des études provenant de la littérature publiée décrivent les taux de dissolution de certains de ces minéraux (comme la séricite et la biotite) et la dépendance par rapport au pH, mais l'espèce minérale et par conséquent la réactivité des aluminosilicates, tendent à être quelque chose de spécifique à chaque site. N'importe quelle méthode expérimentale ou travaux d'essais développés afin d'évaluer les variations possibles d'altération et de neutralisation fournies par les aluminosilicates serait applicable à d'autres sites et très utile pour prédire le DMA.

Lefebvre (1996) indique que quelques-uns des domaines mentionnés précédemment par cette révision comme travaux additionnels, pourraient être abordés dans le cadre d'études doctorales (Ph.D.) réalisées sur "*la géochimie de la halde, incluant la modélisation géochimique, une évaluation additionnelle de la composition de l'eau interstitielle extraite ainsi que des échantillons provenant de lysimètres par gravité (ceux discutés dans les rapports) en plus des lysimètres par succion (installations plus récentes non discutées dans les rapports)*".



### 7.7.3 Développement additionnel du modèle

Les recommandations des auteurs pour des travaux additionnels (Section 7.5.7 GREGI, 1994-12) sont essentiellement orientées vers une meilleure caractérisation des processus physiques déterminant le DMA. La nouvelle information serait vraisemblablement utilisée pour raffiner le modèle *TOUGH AMD* qui est essentiellement un modèle physique. Selon notre opinion, des raffinements importants ne sont pas nécessaires puisque le modèle a déjà montré son utilité pour l'examen des effets physiques de différentes options de couverture. À notre avis, l'information la plus significative qui pourrait être incorporée dans leur modèle est déjà disponible par les études minéralogiques, géochimiques et de qualité de l'eau effectuées sur le site.

Sur la base de notre révision de leur travail de modélisation dans le document synthèse (GREGI, 1994-12), les étapes suivantes pourraient être suivies pour améliorer les capacités du modèle (physique) *TOUGH AMD* actuel.

1. Examiner et réviser les couches frontières ou les méthodes numériques résultant par la prédiction de cellules de recirculation (*eddy formation*) dans l'empilement. Ce phénomène n'a pas été observé.
2. Développer une alternative au *reaction core model* pour décrire l'aire de la surface réactive de la pyrite qui comprend le type de roches, les résultats des études d'altération physique (dureté), les études minéralogiques et les observations visuelles. La présence et la création de particules fines a été montrée comme ayant un effet significatif sur le taux d'oxydation des sulfures, la teneur en humidité, la perméabilité, etc., et devraient être considérées dans leur modèle.
3. Valider le modèle en comparant les prédictions aux données de terrain.

Lefebvre (1996) considère qu'un "*raffinement de la maille du modèle près de la surface améliorerait la représentation des échanges (air, gaz et humidité) qui ont lieu à la surface*", et que des capacités additionnelles pourraient aisément être appliquées pour le *reaction core model*. Cependant, la capacité à représenter l'effet de la création de fines particules serait la plus importante. Cette capacité particulière est actuellement en développement pour *TOUGH2*, par des chercheurs (collaborateurs) du *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Lefebvre (1996) est d'accord avec le besoin de validation additionnelle du modèle *TOUGH AMD*.

Les étapes additionnelles qui suivent seraient requises si, à une date ultérieure, il était décidé qu'il serait utile d'incorporer les processus géochimiques et minéralogiques dans le modèle *TOUGH AMD*.

- déterminer la clé contrôlant les minéraux, les réactions et les limites de la réactivité/solubilité. Ceci pourrait requérir des travaux additionnels d'essais en laboratoire conçus pour évaluer ces réactions.

- la qualité de l'eau (écoulement, eau souterraine) de ce site a été uniforme pour une longue période de temps, par conséquent, il devrait être relativement simple de caractériser et simuler les effets des minéraux déterminants.
- incorporer des algorithmes de différenciation des composantes chimique simple dans le modèle ou alternativement, évaluer si l'approche empirique utilisée pour développer des corrélations de prédiction des paramètres de qualité de l'eau sur la base des solides dissous totaux ou de la conductivité peut être utilisée pour prédire d'autres paramètres basés sur la concentration en sulfate. Ces équations pourraient alors être ajoutées dans leur modèle pour fournir des prédictions "approximatives" de la qualité de l'eau lors de simulations à court terme.
- incorporer l'influence de la température et du pH pour les termes décrivant la cinétique de l'oxydation des sulfures.
- ajouter de nouvelles phases solides au modèle: pyrite, minéraux de sulfates précipités (gypse et jarosite, possiblement à titre de phase sulfate solide unique) et des minéraux tampons (la séricite, la muscovite et la chlorite).
- calibrer le modèle en comparant les estimés de modélisation de la pyrite résiduelle, de la séricite résiduelle et des minéraux de sulfates précipités aux niveaux mesurés provenant des analyses d'échantillons de trous de forage et de tranchées, de l'oxygène et la température prédites aux niveaux mesurés dans les programmes de terrain et les prédictions de qualité de l'eau interstitielle et d'écoulement du modèle aux valeurs mesurées.

Les étapes précédentes amélioreraient les capacités prédictives du modèle *TOUGH AMD* et permettraient l'examen des changements possibles dans la qualité de l'eau d'écoulement résultant de différentes options de fermeture. Le modèle amélioré du DMA nécessiterait d'être suffisamment versatile ou rigoureux pour s'appliquer directement à d'autres sites, quoiqu'il serait plus approprié pour une utilisation à des sites possédant une minéralogie similaire (c.-à-d. pyrite associée avec des schistes à séricite sans carbonates).

Un des principaux chercheurs considère que la principale "amélioration au modèle numérique serait l'ajout de capacités de base permettant de représenter la neutralisation du lixiviat et la précipitation de minéraux" (Lefebvre, 1996).

## **7.8      Résumé**

### **7.8.1      Synthèse**

En conclusion, plusieurs modèles phénoménologiques, empiriques et conceptuels différents ont été développés et appliqués à la Mine Doyon.

- La modélisation hydrologique a été effectuée et utilisée pour préparer un bilan hydrique détaillé de l'empilement. Ce travail a fourni plusieurs des estimés requis pour la modélisation prédictive du DMA.
- Un modèle conceptuel du mouvement de l'air dans la halde sud a été développé à partir des données de terrain (température, profils des gaz). La modélisation thermique et physique détaillée de l'empilement a permis de raffiner le modèle conceptuel. Les modèles thermiques développés pour ce site peuvent fournir une définition des paramètres de transport qui peuvent être utilisés pour une modélisation subséquente du DMA, bien que ces paramètres devraient être vérifiés par d'autres méthodes avant leur utilisation.
- Les estimés de prédiction basés sur (i) le bilan de chaleur et (ii) les bilans de masse du sulfate et du fer indiquent l'un et l'autre que la présence du DMA pourrait persister pour les prochains 100 ans. L'utilisation de deux méthodes indépendantes fournit une plus grande confiance dans leur estimé moyen d'approximativement 100 ans bien que l'approche du bilan de masse n'ait pas permis de considérer l'acidité emmagasinée dans la halde. La méthode du bilan de masse est simple et peut être appliquée à d'autres sites. Cependant, la procédure de calcul pour le bilan de chaleur n'est pas simple et requière un programme étendu d'auscultation de la température pour estimer les paramètres de chaleur.
- Les chercheurs ont utilisé une approche empirique pour développer des équations de corrélation afin de prédire les niveaux d'acidité, d'aluminium, de fer (total), de magnésium et de sulfates sur la base des mesures de solides totaux dissous (*TDS*) et/ou de conductivité. Cette méthode empirique leur a permis de réduire les exigences d'analyses chimiques et les coûts. Cependant, la corrélation développée est basée sur la mesure du *TDS* et/ou de la conductivité et donc ne peut pas être prolongée pour prédire la qualité future de l'eau.
- Les études minéralogiques ont produit un modèle conceptuel des transformations minéralogiques des aluminosilicates et ont clairement démontré l'importance des aluminosilicates dans un système acide. Le développement d'une bonne compréhension des transformations minéralogiques possibles et des réactions géochimiques associées est particulièrement important pour la modélisation prédictive du DMA dans les stériles.
- La modélisation physique utilisant le modèle *TOUGH AMD* développé pour ce site a montré que le modèle recrée quelques-unes des tendances décrites pour la circulation de l'air dans l'empilement et pourrait être utilisé pour examiner les effets de changements sur les paramètres, avec un certain succès.
- Le modèle *TOUGH AMD* peut être utilisé pour examiner une variété d'options de couverture. Les simulations d'une membrane de bordure ont montré que les concentrations de sulfates resteront élevées à long terme. Ce résultat attendu est dû à la lente libération du sulfate emmagasiné dans l'empilement sous forme de gypse et de jarosite.

Tous les efforts cités précédemment ont fourni une bonne compréhension des processus intervenant dans l'empilement et de l'étendue possible de la génération du DMA. Ces études ont indiqué quelles options de gestion présentent un potentiel de succès et ont fourni des estimés pour évaluer les exigences d'un traitement à

long terme. Selon notre opinion, les études de ce site sont essentiellement complétées. Des recommandations pour des études additionnelles de terrain ont été discutées, mais nous ne considérons pas que des données additionnelles soient nécessaires. Plusieurs évaluations techniques additionnelles pourraient être effectuées en utilisant les informations disponibles.

### 7.8.2 Modèle *TOUGH AMD*

Les points suivants résument le modèle *TOUGH AMD*:

- prend en considération les processus physiques de chaleur/température et oxygène/transport dans l'empilement de stériles;
- estime le taux de réaction de la pyrite;
- joint la consommation d'oxygène (dûe à l'oxydation de la pyrite) et la production de sulfates au modèle hydrologique existant *TOUGH2*;
- prend en considération le transport de l'eau, de l'oxygène, des gaz et de l'énergie;
- peut utiliser soit des conditions physiques uniformes (telles la porosité, la granulométrie) ou des propriétés hétérogènes;
- emploie le modèle *shrinking reactive core*;
- assume que la géométrie de l'empilement est uniforme;
- fournit la vitesse des gaz, le flux d'oxygène, les taux d'oxydation, le flux de chaleur, le flux de l'eau et le flux de sulfates à différents endroits dans l'empilement;
- peut être utilisé pour des études théoriques;
- peut être utilisé pour examiner les effets de l'installation d'une couverture (ou d'autres mesures de mitigation) sur l'empilement.

Les points suivants résument notre critique du modèle *TOUGH AMD*.

- c'est un modèle physique qui ne prend pas en considération les processus géochimiques.
- un programme de terrain de grande envergure (température, mesures de l'oxygène) est requis pour caractériser les conditions à plusieurs endroits dans l'empilement.
- il y a plusieurs problèmes inhérents à leur approche conceptuelle:
  - assume des particules sphériques de dimension uniforme, ce qui n'est peut être pas réaliste pour du stérile;
  - la pyrite est "libre" et complètement oxydable;

- les particules restent de la même dimension;
- ne prend pas en considération l'altération (création de plus de particules fines);
- l'oxygène est le seul oxydant;
- le taux de réaction est indépendant du pH et les ions de l'eau;
- les effets de la température sont sursimplifiés;
- l'activité bactérienne n'est pas considérée;
- la différenciation des composantes chimiques n'est pas incluse;
- plusieurs paramètres de départ ne sont pas définis adéquatement;
- les équations décrivant les bases théoriques présentent plusieurs problèmes avec les dimensions/unités;
- il y a un problème évident avec l'assignation des couches ou avec la méthode numérique (c.-à-d. la prédiction de courants de recirculation (*eddy currents*) n'est pas réaliste);
- le modèle n'a pas été totalement validé en comparant les prédictions avec des données mesurées sur le terrain.

Les points suivants résument nos recommandations afin d'améliorer les capacités de l'actuel modèle (physique) *TOUGH AMD*.

- Examiner et réviser l'assignation des couches ou les méthodes numériques résultant en prédiction de cellules de recirculation (*eddy formation*) dans l'empilement. Ce phénomène n'a pas été observé.
- Développer un concept alternatif au *reaction core model* pour décrire l'aire de la surface réactive de la pyrite afin de tenir compte du type de roche et des résultats des essais d'altération physique (dureté), des études minéralogiques et des observations visuelles. Il a été démontré que la présence et la création de fines particules a un effet significatif sur le taux d'oxydation des sulfures, la teneur en eau, la perméabilité, etc., et cela devrait être considéré dans leur modèle.
- Valider le modèle en comparant ses prédictions avec des données de terrain.

Nous avons aussi fourni des recommandations concernant les étapes qui pourraient être suivies afin d'incorporer les processus géochimiques et minéralogiques dans le modèle *TOUGH AMD*.

## 7.9 Références

- Cathles, L.M. et Apps, J.A., 1975. A model of dump leaching process that incorporates oxygen balance, heat balance, and air convection. *Metal. Trans. B*, vol. 6B, p. 617-624.
- Davis, G.B. et Ritchie, A.I.M., 1986. A model of oxidation in pyritic mine wastes: Part 1, equations and approximate solutions. *Applied Math. Modelling*, 10: 314-322.
- GREGI, 1991-19 (Gélinas, P., Choquette, M.P., Lefebvre, R., Isabel, D., Leroueil, S., Locat, J., Bérubé, M., Theriault, D. et Masson, A.). Évaluation du drainage minier acide et des barrières sèches pour les haldes de stériles: Étude du site de la Mine Doyon. Rapport GREGI 91-19, Juillet.
- GREGI, 1993-03 (Lefebvre, R., Gélinas, P. and Isabel, D.). Heat transfer during acid mine drainage production in a waste rock dump, la Mine Doyon (Québec). Rapport GREGI 93-03, mars. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.
- GREGI, 1993-04 (Choquette, M., Gélinas, P. and Isabel, D.). Two rapid methods to evaluate acid mine drainage composition: Total dissolved solids and energy dispersive X-Ray fluorescence spectroscopy. Rapport GREGI 93-04, mars, révisé décembre 1993. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.
- GREGI, 1993-05 (Choquette, M., Gélinas, P. and Isabel, D.). Monitoring of acid mine drainage: Chemical data from la Mine Doyon - south waste rock dump. Rapport GREGI 93-05, mars, révisé décembre 1993. Rapport NEDEM 1.14.2, mars, 1994.
- GREGI, 1994-06 (Choquette, M. and Gélinas, P.). Mineralogical transformations associated with AMD production in a waste rock dump, la Mine Doyon - south waste rock dump. Rapport GREGI 1994-06, mars. Rapport NEDEM 1.14.2f, mars, 1994.
- GREGI, 1994-12 (Gélinas, P., Lefebvre, R., Choquette, M., Isabel, D., Locat, J. and Guay, R.). Monitoring and modelling of acid mine drainage from waste rock dumps, la Mine Doyon case study. Rapport GREGI 1994-12, août, révisé septembre 1994. Rapport NEDEM 1.14.2g, juin, 1994.
- Jaynes, D.B., Rogowski, A.S., Pionke, H.B. and Jacoby, E.L., 1983. Atmospheric and temperature changes within a reclaimed coal strip mine. *Soil Science*, septembre, vol. 136, no. 3, p. 164-177.
- Lefebvre, R., 1991. Revue du drainage minier acide des haldes de stériles. Département de géologie, Université Laval. juin.
- Lefebvre, R., 1994. Caractérisation et modélisation numérique du drainage minier acide dans les haldes de stériles. Thèse de doctorat, Université Laval.
- Lefebvre, R., 1996. "Reply to Chapter 7.0 Predictive Modelling." Professeur, INRS-Géoresources, Mars.
- Li, M., 1995. Noranda Technology Centre. Additional comments. Mine Doyon Peer Review Project octobre.
- Mangold, D.C. and Tsang, C.F., 1991. A summary of subsurface hydrological and hydrochemical models *Reviews of Geophysics*, 29, No. 1, pp. 51-79.

- Morin, K.A., 1995a. Personal communication to Les MacPhie, Geocon novembre.
- Morin, K.A., 1995b. Personal communication to Les MacPhie, Geocon juillet.
- Morin, K.A., Hutt, N.M., and McArthur, R., 1993. The use of routine monitoring data for assessment and prediction of water chemistry. Proceedings of the 17th Annual Mine Reclamation Symposium, Port Hardy, BC, 4-7 May, p. 191-201. Mining Assoc. of British Columbia.
- Pantelis, G. and Ritchie, A.I.M., 1991. Macroscopic transport mechanisms as rate-limiting factor in dump leaching of pyrite ores. *Appl. Math. Modelling*, vol. 15, mars, p. 136-143.
- Perkins, E.H. and W.D. Gunter, 1994. Critical review of geochemical models adaptable for prediction of acidic rock drainage from waste rock. Draft report for the MEND Prediction Subcommittee.
- Savoie, A., Trudel, P., Sauvé, P., Hoy, L., and Kheang, L., 1991. Géologie de la Mine Doyon (région de Cadillac). Rapport ET 90-05. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.
- Scharer, J.M., Pettit, C.M., Chambers, D.B. and Kwong, E.C., 1994. Mathematical simulation of a waste rock heap. Proc. of the International Land Reclamation and Acid Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acid Drainage, Pittsburgh, PA, USA, 24-29 avril, Volume 1, pp. 30-39.
- SENES, 1994a. Review of waste rock sampling techniques. Rapport NEDEM 4.5.1. In Association with Golder Associés Ltée and Laval University. Juin.
- SENES, 1994b. Handbook of waste rock sampling techniques. Rapport NEDEM 4.5.1. Juin.
- Stallman, R.W., 1965. Steady one-dimensional fluid flow on a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature. *Jour. of Geoph. Res.*, v. 70, p. 2821-2827.

## **8. CONCLUSIONS**

De façon générale, la révision par les pairs conclut, par rapport aux approches techniques d'investigation et d'analyse de la halde sud de la Mine Doyon, que des techniques innovatrices et dernier cri ont été utilisées et que le cas de la Mine Doyon a approfondi notre compréhension de certaines questions techniques spécifiques. De plus, le travail effectué représente un cas approfondi et exceptionnellement bien documenté.

Par rapport à la présentation et aux détails techniques, la révision par les pairs conclut de façon générale que les dix rapports NEDEM contiennent un nombre d'inconsistances et d'erreurs qui devraient être corrigées afin que ces rapports représentent un registre plus fidèle de l'étude de la Mine Doyon. Les contraintes budgétaires et de temps ont apparemment contribué à la situation mentionnée précédemment.

Les conclusions spécifiques relatives aux cinq composantes techniques (hydrologie, géotechnique et hydrogéologie, géochimie, microbiologie et modélisation prédictive) identifiées pour la révision par les pairs sont présentées dans le résumé à la fin des chapitres 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 et 7.0 respectivement.