

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR

PATRICIA BOUTIN

ÉTUDE GÉOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES
À LA MINE JOE MANN, CHIBOUGAMAU, QUÉBEC.



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Le but de la maîtrise était de caractériser les eaux souterraines qui circulent dans la mine Joe Mann (à 60 kms au sud de Chibougamau). La mine exploite un gisement filonien d'or-cuivre dans des roches archéennes principalement mafiques.

Un phénomène de dilution global pour tous les sites d'échantillonnage (81 échantillons d'eau) a été révélé par les données géochimiques. Les eaux prélevées ont un total en sels dissous qui n'excède pas les 1300ppm, indépendamment de la profondeur à laquelle elles ont été prélevées. Les échantillons mettent donc en jeu deux membres-formateurs, à savoir : une composante eau saline et une autre eau météorique. Des tendances en enrichissement, notamment en strontium, pourraient traduire des échanges eau-roche plus en profondeur. Cependant, le temps de résidence des eaux souterraines est court ; ainsi, les eaux de surface infiltrées dans le massif rocheux de la mine Joe Mann ne peuvent pas s'enrichir par des interactions eau-roche. Les eaux prélevées sont le résultat d'une dilution d'eaux salines «résidentes» dans la mine par des eaux de surface. La tendance d'augmentation de la teneur en chlore des eaux avec la profondeur démontre qu'une composante eau saline est à l'origine des eaux diluées (le chlore n'est pas présent dans les eaux naturelles météoriques). Des caractéristiques similaires à celles définies pour les eaux souterraines du Bouclier canadien ressortent.

Le degré d'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines est variable. Le système hydrogéologique de la mine Joe Mann est caractérisé par la présence d'un patron de failles majeures plus ou moins abondantes au sein d'une matrice relativement imperméable. Les failles sont ubiquistes et participent à l'infiltration des eaux en profondeur.

Les différents éléments ressortis dans l'étude nous amènent à supposer le scénario suivant : l'eau du lac Norhart s'infiltrerait possiblement dans le massif rocheux via une connexion qui n'est pas directe avec la zone faillée, mais surtout, le phénomène de dilution est reconnu comme omniprésent sur le site d'échantillonnage, quelque soit la profondeur considérée. Finalement, différents types d'eaux correspondant à une évolution hydrogéochimique ont été définis selon leur position spatiale et notamment, des eaux chlorées dans les niveaux les plus profonds de la mine.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	ii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des annexes	ix
1 - INTRODUCTION	1
1.1 GÉNÉRALITÉS	2
1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	3
2 - CONTEXTE GÉOLOGIQUE	5
2.1 GÉOLOGIE RÉGIONALE	5
2.2 GÉOLOGIE DE LA MINE JOE MANN	10
2.2.1 Stratigraphie et minéralisation	10
2.2.2 Géologie structurale	14
2.2.3 Dépôts quaternaires	15
3 - ACQUISITION DES DONNÉES HYDRO-GÉOCHIMIQUES	18
3.1 ÉCHANTILLONNAGE	18
3.1.1 Procédure d'échantillonnage	18
3.1.2 Précautions	19
3.2 PROCÉDURES ANALYTIQUES	21
3.2.1 Paramètres mesurés <i>in situ</i>	21
3.2.2 Paramètres mesurés dans les 24 heures	24
3.2.2.1 Alcalinité	25
3.2.2.2 Oxygène dissous	26
3.2.3 Mesures en laboratoire	27
3.2.3.1 Le titrage des bicarbonates	27
3.2.3.2 La spectrophotocolorimétrie	28
3.2.3.3 L'absorption atomique	29
3.3.4 Limites de détection et précision	30

4 - ENVIRONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA MINE JOE MANN	31
4.1 HYDROLOGIE RÉGIONALE	31
4.1.1 Relief topographique et bassin versant	31
4.1.2 Structures hydrologiques	34
4.2 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES PERTURBÉES DANS LA MINE JOE MANN	36
4.2.1 Présentation de la mine	36
4.2.2 Le plan de la faille NE : la «faille d'eau»	37
4.2.2.1 Description	37
4.2.2.2 Rôle hydrogéologique du lac Norhart	39
4.2.2.3 Géométrie de la zone dénoyée	40
4.2.3 Types de perméabilités	41
4.2.4 Le système de pompage	42
5 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	44
5.1 VALIDITÉ DES RÉSULTATS	44
5.1.1 Équilibre ionique	44
5.1.2 Précisions sur les mesures du total en sels dissous	48
5.2 LES RÉSULTATS	50
5.2.1 Chimisme des eaux souterraines	50
5.2.1.1 Les anions	51
5.2.1.2 Les cations	53
5.2.2 Statistiques et distribution des paramètres physiques	53
5.2.4 Composition en ^{18}O et ^2H et éléments d'interprétations des analyses	54
5.3 EXPLOITATION DES DONNÉES	58
5.3.1 Matrice des corrélations	58
5.3.2 Diagramme de Piper	60
5.3.3 Cas du Total des Sels Dissous (TSD)	60
5.3.4 Présentation des graphiques binaires	64
5.3.4.1 Le chlore comme élément conservatif	64
5.3.4.2 Relations avec le total des sels dissous	65
5.3.4.3 Relations avec le magnésium	67
5.3.4.4 Relations avec le chlore	67
5.3.4.5 Relations avec le strontium	70

5.3.4.6 Relations avec les sulfates	71
5.3.4.7 Relations avec les bicarbonates	71
6 - INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS	73
6.1 CARACTÉRISATION GLOBALE DES EAUX À LA MINE JOE MANN	73
6.1.1 Identification d'un facteur de contrôle	73
6.1.2 Évolution du chimisme des eaux souterraines de la mine Joe Mann	77
6.1.2.1 Contenu en Cl	79
6.1.2.2 Contenu en Ca et Mg	80
6.1.2.3 Contenu en Na, Sr, bicarbonates et K	81
6.1.3 Contribution de l'interaction eau-roche à la chimie des eaux souterraines	83
6.2 DÉTERMINATION DE L'IMPORTANCE DES PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES À PARTIR DES OBSERVATIONS HYDROGÉOCHIMIQUES	86
6.2.1 Relativisation du rôle de la « faille d'eau » dans le phénomène de dilution	86
6.2.2 Caractéristiques des trous de forages	92
6.2.3 Éléments de conclusion sur la dilution	93
6.3 PALÉOHYDROGÉOLOGIE	94
6.3.1 Isotopie	94
6.3.2 Modélisation	95
7 - CONCLUSION	100
BIBLIOGRAPHIE	103
ANNEXES	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Principales caractéristiques géochimiques des eaux du Bouclier canadien.....	4
Figure 2.1 : Géologie générale de la région de Chibougamau-Caopatina	6
Figure 2-2 : Géologie locale du secteur de la mine Joe Mann	7
Figure 2-3 : Stratigraphie de la région de Caopatina	8
Figure 2-4 :Section transversale schématique illustrant la stratigraphie de la mine Joe Mann. Section à travers le puits de la mine.....	11
Figure 2-5 : Section longitudinale des trois zones minéralisées de la mine Joe Mann	13
Figure 2-6 : Section longitudinale montrant les secteurs d'exploitation de la Zone Principale de la mine Joe Mann	13
Figure 2.7 : Coupe lithostratigraphique composite des dépôts quaternaires de la région de Chibougamau	16
Figure 4.1 : Relief topographique autour du site de la mine Joe Mann.....	32
Figure 4.2 : Tracé approximatif du sous-bassin versant du secteur d'étude	33
Figure 4.3 : A – Carte topographique du secteur de la mine Joe Mann	35
B - Carte des dépôts quaternaires du secteur de la mine Joe Mann	
Figure 4.4 : Schématisation de la position spatiale du plan de faille en coupe longitudinale passant par le chevalement de la mine	38
Figure 4.5 : Schématisation de l'extension de la zone dénoyée dans l'éventuelle absence du lac	40
Figure 4.6 : Schématisation du contexte hydrodynamique actuel à la mine	41
Figure 5.1 : Histogramme de l'erreur d'équilibre des charges.....	45
Figure 5.2 : Mesures des bicarbonates versus les mesures de l'alcalinité.....	48
Figure 5.3 : Répartition des échantillons dans les niveaux de prélèvement.....	49
Figure 5.4 : Proportionnalité entre TSD lu et TSD calculé.....	50
Figure 5.5 : Teneurs normalisées à 100% des anions	52
A - Teneur en bicarbonates ; B - Teneur en sulfates	
Figure 5.6 : $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$	57

Figure 5.7 : Illustration de la matrice des coefficients de Pearson.....	59
Figure 5.8 : Diagramme de Piper illustrant l'évolution des eaux souterraines	61
Figure 5.9 : Matrice de corrélation de la population 1	62
Figure 5.10 : Matrice de corrélation de la population 2.....	63
Figure 5.11 : Matrice de corrélation de la population 3	63
Figure 5.12 A : TSD versus Cl (échelles arithmétiques)	65
Figure 5.123B : TSD versus Cl (échelle logarithmique en abscisse).....	66
Figure 5.13 : TSD versus Ca et Mg.....	66
Figure 5.14 : Ca versus Mg	68
Figure 5.15 : Na versus Mg.....	68
Figure 5.16 : Ca et Mg versus Cl	69
Figure 5.17 : Na versus Cl.....	69
Figure 5.18 : Corrélations avec le strontium.....	70
A - Cl versus Sr ; B - Na versus Sr	
Figure 5.19 : Sulfates versus Ca et Mg	71
Figure 5.20 : Corrélations avec les bicarbonates.....	72
A - Bicarbonates versus Mg ; B - Bicarbonates versus Cl	
Figure 6.1 : Diagrammes en trois dimensions des paramètres évolutifs caractérisant les eaux de la mine Joe Mann.....	74
Figure 6.2 : Vue en plan XY de la distribution du TSD pour tous les échantillons indépendamment de la profondeur.....	76
Figure 6.3 : Histogrammes du rapport substances analysées sur le TSD.....	78
A - selon les classes de TSD ; B - selon la profondeur	
Figure 6.4 : TSD versus les rapports K/Cl et Mg/Cl.....	85
Figure 6.5 : Modélisation du plan de faille au niveau 9 avec la trace des forages.....	87
Figure 6.6 : Modélisation des traces de forage aux niveaux 4 et 9	89
Figure 6.7 : A - Éloignement de la faille versus TSD au niveau 4 :	91
B - Éloignement de la faille versus Cl au niveau 4	
Figure 6.8 : A - Éloignement de la faille versus TSD sur plusieurs niveaux	91

B - Éloignement de la faille versus Cl sur plusieurs niveaux

Figure 6.9 : Distribution des plongées des trous de forage	92
Figure 6.10 : Distribution des longueurs des trous de forage.....	92
Figure 6.11 : Interprétation des modifications des conditions hydrogéomécaniques	96
Figure 6.12 : Coupe transversale passant par le chevalement de la mine montrant l'évolution des eaux souterraines en profondeur et la distribution du total des sels dissous	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Techniques analytiques et délais acceptables.....	21
Tableau 3.2 : Valeurs du facteur multiplicateur «A» en fonction du type d'eau.....	23
Tableau 3.3 : Techniques d'analyses et limites de détection.....	30
Tableau 4.1 : Débits mensuels moyens des eaux d'exhaure à la mine Joe Mann, selon les rapports M.E.F. (1993 à 1999).....	42
Tableau 4.2 : Caractéristiques du système de pompage.....	42
Tableau 5.1 : Statistiques descriptives des échantillons rejetés pour l'étude.....	46
Tableau 5.2 : Échantillons non pris en compte pour l'étude.....	47
Tableau 5.3 : Statistiques descriptives des mesures anioniques.....	51
Tableau 5.4 : Statistiques descriptives des mesures cationiques.....	53
Tableau 5.5 : Statistiques descriptives des mesures des paramètres physiques.....	54
Tableau 5.6 : Résultats isotopiques.....	55
Tableau 6.1 : Minéraux impliqués dans l'interaction eau-roche.....	83

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A

- Localisation des échantillons dans le système de coordonnées de la mine, profondeur du collet du forage, longueur du forage et remarques.

ANNEXE B

- Paramètres physiques (température, conductivité, Eh, pH).

ANNEXE C

- Éléments majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , K^+ , HCO_3^- , oxygène dissous et métaux) ainsi que la valeur en total des sels dissous (TSD) lue et calculée.

ANNEXE D

- Matrice de corrélation de Pearson.

ANNEXE E

- Fréquences d'apparition des éléments majeurs, mineurs et des variables physico-chimiques dans la chimie des eaux.

ANNEXE F

- Localisation des échantillons sur les niveaux de la mine.

AVANT-PROPOS

À Mamie,

*M*erci à Jacques Carignan, directeur de recherche, pour avoir élaboré le sujet de cette thèse de maîtrise. Je remercie les professeurs Alain Rouleau et Jayanta Guha, membres du comité, pour leur disponibilité et le soutien qu'ils ont manifesté à mon égard et pour le projet. Je tiens à remercier Abdel Benlahcen qui m'a accompagnée et dirigée sur le terrain. Je remercie aussi les géologues de la mine Joe Mann, Germain Maltais et Linda Desjardin pour leur disponibilité sur le terrain. Un grand merci à tout le personnel de l'Université du Québec à Chicoutimi qui a été engagé dans la réalisation de ce projet.

*J*e remercie mes parents pour leur soutien au cours de mes années universitaires. Un gros merci à Luc qui m'encourage et me soutient tant et plus et pour son réconfort à chaque obstacle rencontré.

*J*e remercie toutes les personnes que j'ai connues lors de mon séjour au Québec, les étudiants en Sciences de la Terre ainsi que les professeurs du département pour l'amitié qu'ils m'ont offerte. Tant de gens ont contribué à mon assimilation comme «maudite française»!

CHAPITRE 1

Introduction

Les écoulements des eaux souterraines dans le Bouclier Canadien en profondeur se font principalement dans des zones de failles et de fractures. Les mines, en tant qu'environnements perturbés, modifient les régimes hydrauliques lors des opérations d'excavation et de pompage des eaux de mine, ce qui a pour effet de créer des situations de non-équilibre hydrogéomécanique. Des systèmes de failles-fractures, communément verticaux, sont ainsi connectés à la surface. Souvent le cône de rabattement consécutif au pompage de la mine permet l'entrée d'eaux souterraines météoriques douces dans des zones profondes adjacentes aux failles, et favorisent la dilution progressive des eaux profondes salines. Par contre, si l'infiltration d'eau de surface se fait en grande quantité, il se peut que l'on retrouve alors les caractéristiques de l'eau de surface à certains endroits dans la mine suite à un processus important de dilution.

La composition des eaux souterraines évolue géochimiquement par le biais de phénomènes d'ordre hydrodynamique, qui contrôlent la circulation des eaux souterraines dans divers environnements. Plusieurs phénomènes hydrochimiques interviennent, notamment d'ordre minéralogique : dissolution des minéraux et libération d'éléments chimiques dans les eaux, précipitation de minéraux secondaires et remobilisation

d'éléments à partir de la solution. Les processus reliés à la physique des environnements traversés par les eaux souterraines jouent aussi un rôle non négligeable (gradients de pression, température, etc.).

1.1 Généralités

Le contenu en sels dissous des eaux souterraines augmente avec la profondeur. Ainsi, à des profondeurs de plus de 1000m dans le Bouclier Canadien, les eaux ont des salinités supérieures à 10 g/l⁻¹. Le gradient de salinité qui s'établit avec la profondeur est dû à la dilution des eaux profondes par des eaux météoritiques, ce que des études isotopiques mettent en évidence (Frape et Fritz, 1987 ; Pearson, 1987 ; Gascoyne et *al.*, 1987). L'augmentation de la salinité se fait par l'acquisition croissante d'éléments chimiques en profondeur. En surface, la chimie des eaux est contrôlée par des réactions lentes entre les aluminosilicates et l'eau ; le TDS est alors faible. En profondeur, du fait que l'équilibre thermodynamique entre les minéraux de haute température et les eaux à basse température ne peut être atteint, les éléments chimiques des minéraux de haute température sont continuellement libérés et recombinaés pour former les assemblages de minéraux stables retrouvés dans les fractures, à savoir des carbonates, des oxydes et des hydroxydes.

Plusieurs types d'eaux sont propres à un aquifère de type cristallin, soit, i) des eaux caractérisées comme étant fossiles emprisonnées sous forme d'inclusions fluides, ii) des eaux juvéniles d'origine magmatique ou des fluides métamorphiques dérivés de bassins sédimentaires et iii) des eaux météoritiques d'infiltration récentes (Farvolden et *al.*, 1988).

En ce qui concerne le contexte minier, le groupe de recherche en hydrogéologie de l'Université du Québec à Chicoutimi a élaboré des modèles sur le site de la mine Niobec, à Saint-Honoré, près de Chicoutimi. Tel que décrit par Martin (1993) et Benlahcen (1996), la création d'une zone de dépressurisation hydraulique entraîne la formation d'un cône de rabattement, ce qui dans ce cas induit plusieurs zones hydrogéochimiques :

- i) la zone d'intrusion des eaux météoriques proche de la surface,
- ii) la zone de transition plus en profondeur où a lieu un mélange entre les eaux de surface et les eaux salines,
- iii) le domaine des eaux salines (ou des saumures dans certains cas) du Bouclier canadien, retrouvé à grande profondeur.

Une compilation des données géochimiques des eaux du Bouclier canadien fourni en figure 1.1 permet de distinguer les évolutions des paramètres chimiques avec la profondeur.

1.2 Objectifs de l'étude

La présente étude s'inscrit dans un projet de caractérisation des eaux de mine et des eaux d'exhaure dans le Bouclier canadien. Plus spécifiquement, cette étude vise essentiellement à établir le contexte hydrogéologique et hydrogéochimique de la mine Joe Mann (Nord-ouest du Québec) à l'aide d'une modélisation de l'interaction chimique entre les eaux souterraines dans la mine et les eaux de surface et/ou peu profondes.

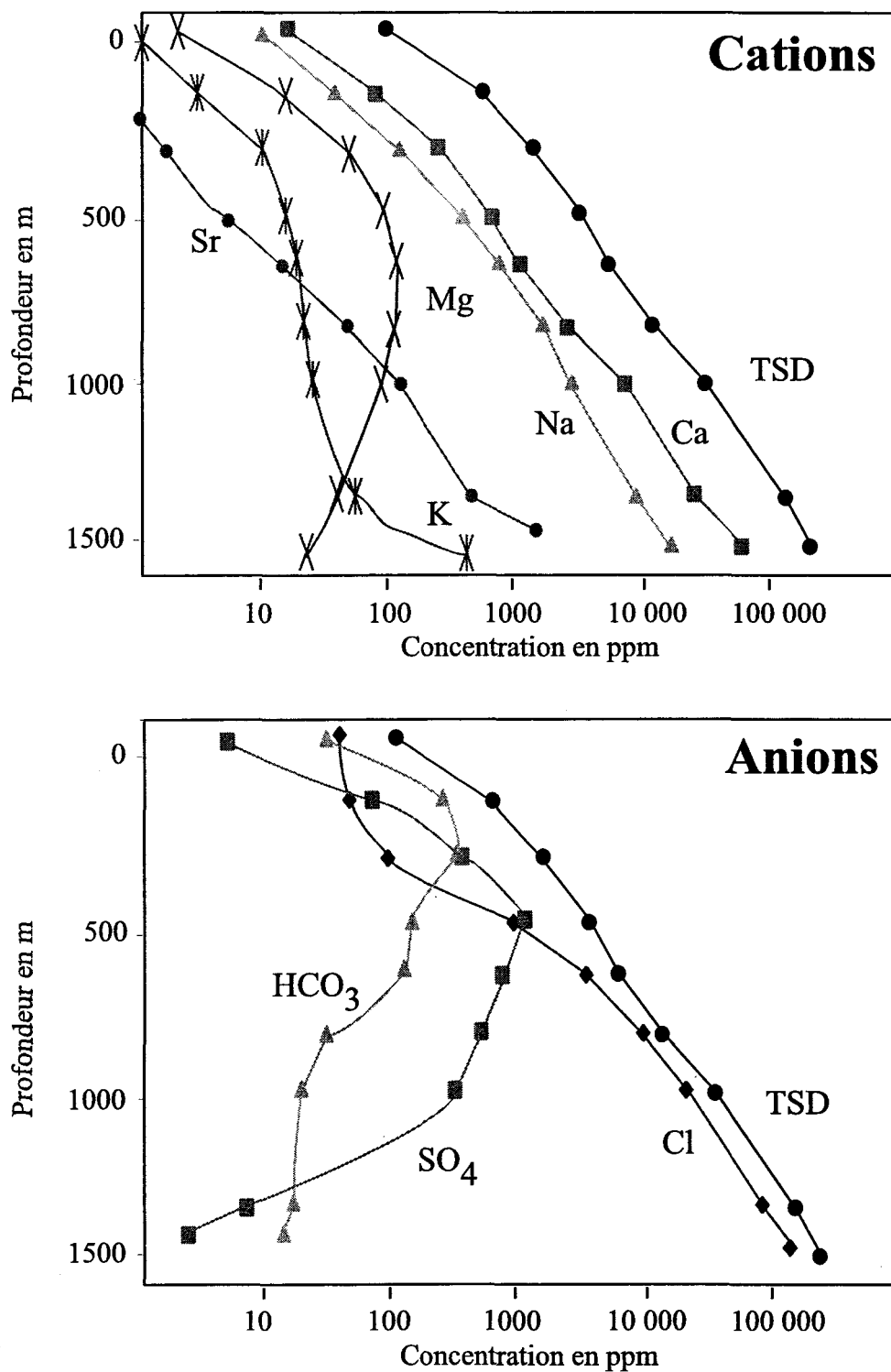


Figure 1.1 : Principales caractéristiques géochimiques des eaux du Bouclier canadien (Adapté de Farvolden et *al.*, 1988)

CHAPITRE 2

Contexte géologique

2.1 Géologie régionale

La mine Joe Mann, anciennement appelée Chibex, exploite un gisement d'or-cuivre filonien dans des roches archéennes principalement mafiques. Elle est située à environ 65 km au sud de la ville de Chibougamau, en Abitibi, dans le Nord-ouest québécois. Comme montré en figure 2.1, la mine se situe au sein de la partie est de la bande de Caopatina-Desmaraisville dans le Sillon volcano-sédimentaire archéen de Chibougamau-Matagami, plus précisément à l'intérieur du couloir de déformation Opawica-Guercheville (Schmitt et Maltais, 1998). Le sillon de Chibougamau-Matagami appartient à la Zone volcanique Nord de la Sous-province de l'Abitibi, à environ 20 km du Front de Grenville (Chown et *al.*, 1992). Les descriptions de la géologie régionale et locale (figure 2.2) sont tirées de Chown et *al.* (1995), et de Dion et Maltais (1998).

La stratigraphie régionale (figure 2.3) de la bande de Caopatina-Desmaraisville (Mueller et *al.*, 1989) comprend à sa base des gneiss tonalitiques et des plutons felsiques, cet ensemble formant des complexes plutoniques synvolcaniques. Au-dessus de cet ensemble, on retrouve les roches volcaniques mafiques de la Formation d'Obatogamau qui

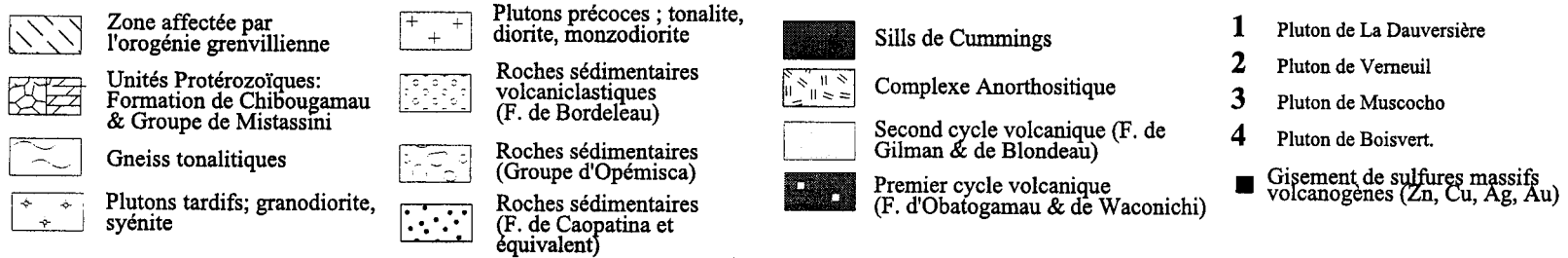
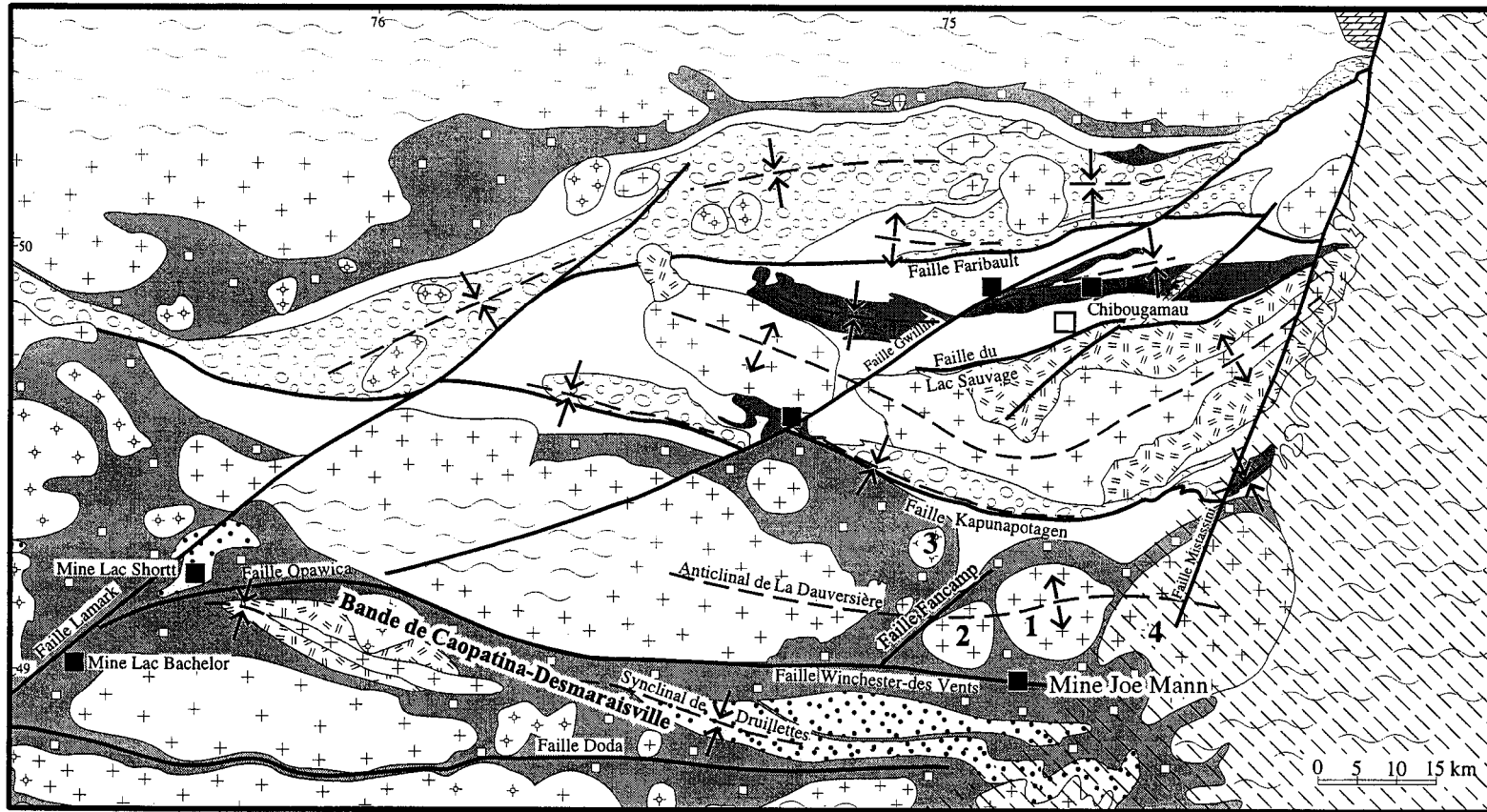
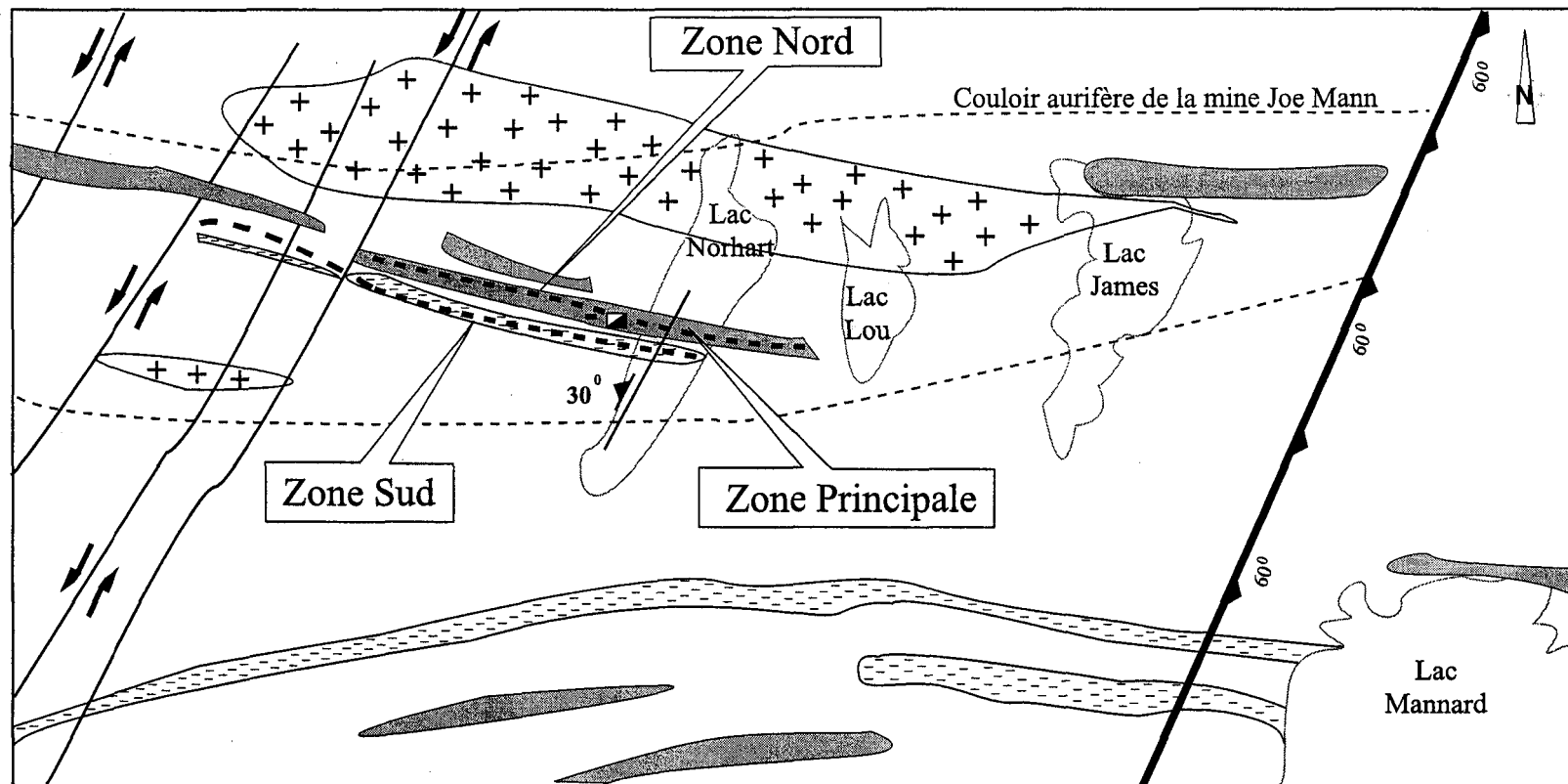









Figure 2.1 : Géologie générale de la région de Chibougamau-Caopatina (modifiée de Guha *et al.* 1990).



LÉGENDE

- | | | | |
|---|--|--|---|
|  | Gabbro |  | Faïlle |
|  | Volcaniclastite felsique à intermédiaire à mafique, localement graphitique |  | Volcanite mafique (cousinée et massive) |
|  | Tonalite |  | Structures aurifères |
| | |  | Position du chevalement |

0 0.5 1 1.5 2 km

Figure 2.2 : Géologie locale du secteur de la mine Joe Mann (modifié de Schmitt et Maltais, 1998)

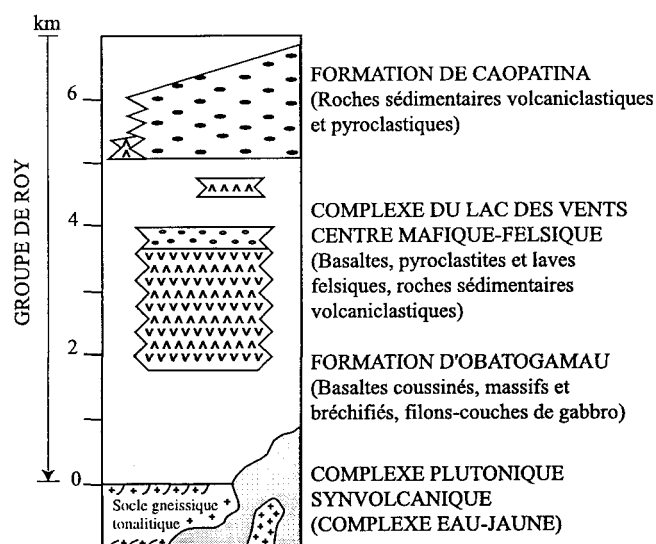


Figure 2.3 : Stratigraphie de la région de Caopatina (modifié de Mueller et al., 1989)

comprennent des basaltes coussinés, massifs et bréchifiés et des filons-couches de gabbro. Les roches volcaniques felsiques, ainsi que les sédiments volcanogènes et les basaltes qui y sont interlités, sont regroupés au sein du Complexe du Lac des Vents qui forme un centre mafique-felsique interstratifié et intercalé avec les basaltes de la Formation d'Obatogamau (Gobeil et Racicot, 1983; Sharma et al., 1987, Tait et al., 1987). Les roches d'origine épicyclastique de la Formation de Caopatina (Sharma et al., 1987), au sommet de la séquence stratigraphique, comprennent des grès, des siltstones, des argilites, des conglomérats, des grès conglomératiques et des formations de fer litées à magnétite, et ce sur une épaisseur de 1 à 2 km. Ces roches sédimentaires et les volcanites mafiques de la Formation d'Obatogamau semblent s'interstratifier près de leur contact, souvent fortement cisailé. Ce type de contact est à l'origine, notamment, de la faille Winchester-Des-Vents (ou faille de

Guercheville), qui s'étend d'est en ouest de la mine Joe Mann jusqu'au gisement du lac Shortt.

La bande de roches vertes Chibougamau-Matagami est recoupée par une vaste distribution de plutons felsiques pré-tectoniques (Complexe Eau-Jaune), syn-tectoniques (La Dauversière, Verneuil) et tardi-tectoniques (Muscocho) (Racicot *et al.*, 1984 ; Tait *et al.*, 1987 ; Lauzière *et al.*, 1989). Le métamorphisme est généralement au faciès des schistes verts, sauf en bordure des plutons syntectoniques et à proximité du Front de Grenville où il peut atteindre le faciès amphibolite (Dion et Guha, 1994 ; Dion et Maltais, 1998).

Deux orientations de failles ont été reconnues dans la région. Les failles d'extension régionale les plus anciennes ont une orientation E-W (faille du lac Sauvage, faille Faribault). Ces failles de type ductile-fragile sont parallèles à la schistosité régionale. Ce système de faille E-W est recoupé par des failles N-E qui reprennent les fabriques anciennes (faille Fancamp) et des failles NNE à rejet apparent senestre probablement reliées à l'orogénie grenvillienne. Comme mentionné précédemment, le couloir de déformation Opawica-Guercheville est une structure majeure orientée E-W qui contrôle les minéralisations aurifères du Segment de Caopatina, notamment à la mine Joe Mann (Guha *et al.*, 1994 ; Dion et Maltais, 1998).

2.2 Géologie de la mine Joe Mann

2.2.1 Stratigraphie et minéralisation

Les différentes unités stratigraphiques de la région de la mine Joe Mann ont généralement une orientation est-ouest avec un pendage et une polarité stratigraphique vers le sud (Wagner, 1978). La stratigraphie à la mine (figure 2.4) est composée, du nord vers le sud et de la base vers le sommet :

- i) d'un filon - couche de gabbro, d'une épaisseur estimée à environ 300 mètres, qui constitue le type de roche prédominant à la mine. L'altération de cette unité massive de gabbro prend la forme d'un assemblage de chlorite et de carbonates, plus localement de silice et de biotite. L'altération hydrothermale dans les zones fortement cisillées se traduit par un enrichissement en potassium, rubidium, barium, soufre, cuivre et or et un appauvrissement en calcium et magnésium.
- ii) de basaltes déformés et altérés, d'une épaisseur de 30 à 50 mètres, que l'on retrouve de part et d'autre du filon-couche de gabbro.
- iii) d'un niveau de «rhyolite» ou de tufs felsiques, surmonté de nouveau par des basaltes. Cette unité de composition dacitique montre dans sa partie la plus déformée une altération hydrothermale intense en séricite et sulfures, ce qui se traduit par un enrichissement en silice, potassium, soufre, cuivre, arsenic et or, ainsi qu'un appauvrissement en magnésium, calcium, sodium et carbone total.

Ces descriptions sont basées sur les manuscrits de Dion et Guha (1994) et Dion et Maltais (1998).

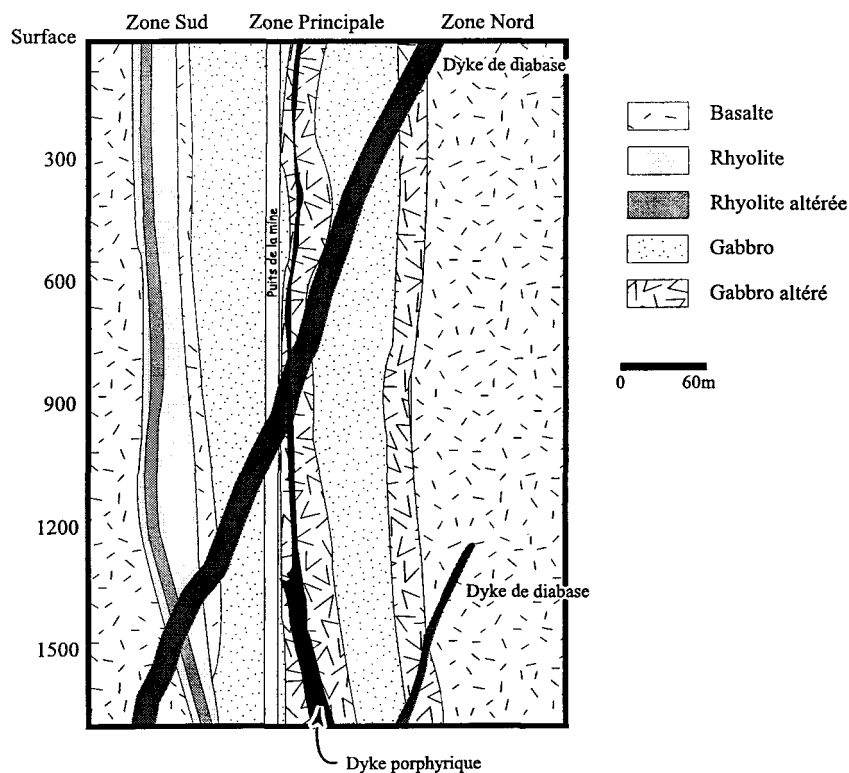


Figure 2.4 : Section transversale schématique illustrant la stratigraphie de la mine Joe Mann. Section à travers le puits de la mine (Dion et Guha, 1990).

Cette séquence, typique de la partie supérieure de la Formation d'Obatogamau, est fréquemment recoupée par différents types de dykes, généralement felsiques et d'épaisseurs métriques. L'ensemble des lithologies a été métamorphisé au faciès des schistes verts supérieurs (faciès des «amphibolites à épidote») (Dion et Guha, 1994). La minéralisation aurifère se présente sous forme de veines de quartz-sulfures-carbonates logées dans trois zones de cisaillement ductiles-fragiles d'extension E-W et à pendage de 85°N subparallèles entre elles et à la stratigraphie (figure 2.5). Des dykes felsiques porphyriques sont

fréquemment en contact avec les veines aurifères. Les trois zones de cisaillement principales sont distantes d'environ 100 mètres l'une de l'autre et définissent les trois zones d'exploitation (Nord, Principale et Sud) :

- i) la Zone Nord est une minéralisation irrégulière de type veine de quartz-carbonates dans un gabbro massif peu altéré. Les chantiers dépassent rarement 30m (100 pieds) de long. Cette veine est d'environ 60cm de large.
- ii) la Zone Principale est géologiquement semblable à la Zone Nord mais beaucoup plus continue en extension latérale et verticale (au-delà de 900m). La largeur varie entre une dizaine de cm à 2m avec un pendage sub-vertical.
- iii) la Zone Sud est une zone de cisaillement dans une rhyolite altérée avec de petites veines de quartz-carbonates très boudinées. L'extension latérale est de 900m, le pendage sub-vertical.

La Zone Principale de la mine, lorsque montrée en section longitudinale, peut être divisée schématiquement en deux secteurs (figure 2.6). Les activités minières sont différentes dans ces deux secteurs. Le secteur Est, qui comprend les chantiers exploités (roc excavé), est situé à l'est du chevalement (longitudinale Opi sur les figures), tandis que la zone Ouest, où se trouvent les futures zones d'exploitation, est localisée à l'ouest du chevalement et ne comprend que très peu de chantiers en exploitation au moment de l'échantillonnage.

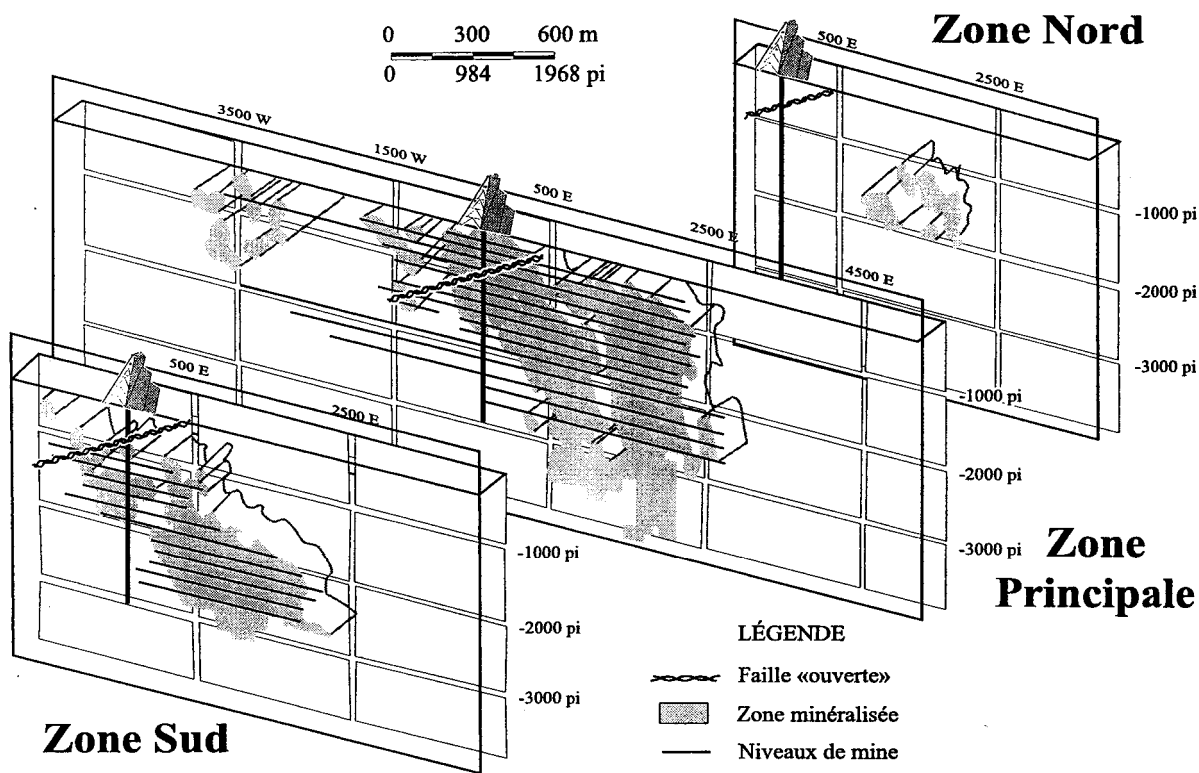


Figure 2.5 : Section longitudinale des trois zones minéralisées de la mine Joe Mann (modifié du Rapport annuel de Ressources Campbell, 1995).

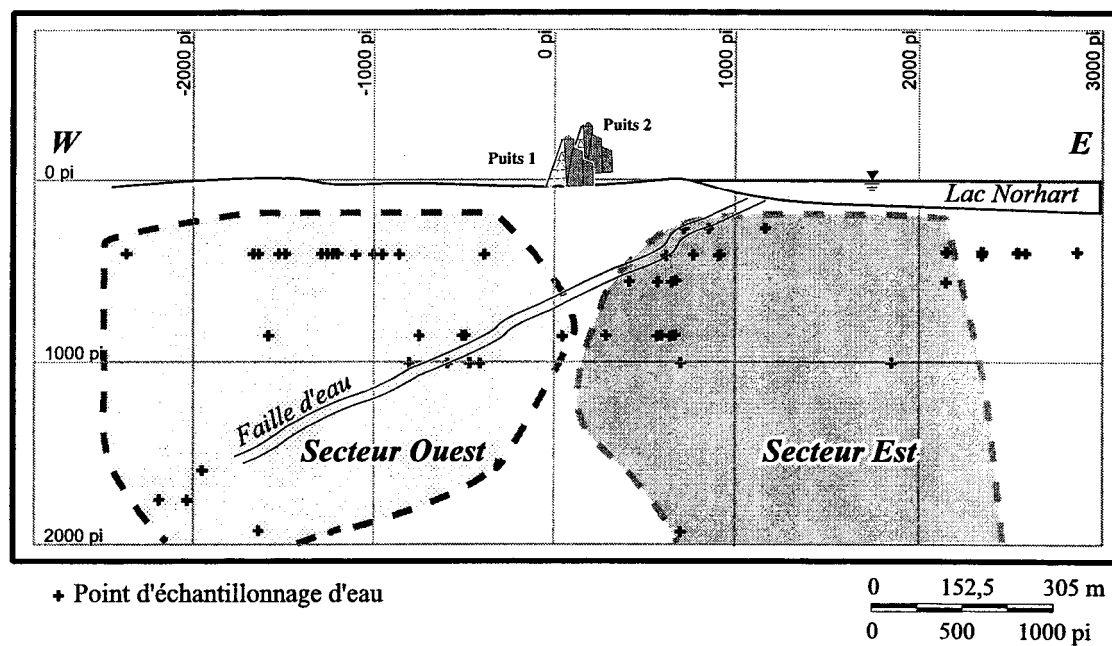


Figure 2.6 : Section longitudinale montrant les secteurs d'exploitation de la Zone Principale de la mine Joe Mann.

2.2.2 Géologie structurale

Sur le site de la mine, on retrouve deux groupes de failles cassantes d'orientation NE : celles à pendage ouest et celles à pendage est. On distingue plus facilement celles à pendage est. Ce sont les structures les plus jeunes dans la mine, et elles recoupent les zones minéralisées.

Ces failles NE participent à de forts débits d'eau et sont signalées dans les rapports de la mine, notamment dans Wagner (1978) et Dion et Guha (1994). Une faille majeure de pendage ouest est documentée à la mine et elle est représentée sur les coupes longitudinales de la Zone Principale (figures 2.5 et 2.6) ; elle est de direction NNE, de pendage 30 degrés vers l'ouest. Les géologues l'ont répertoriée sur les cartes géologiques comme «la faille d'eau». Elle apparaît comme «faille ouverte» sur la figure 2.5 et est signalée en figure 2.2. Son rôle sera discuté plus amplement dans le chapitre 4 (section 4.2.2) qui traite de l'environnement hydrodynamique de la mine Joe Mann.

Les différents rapports consultés, qui traitent de géomécanique à la mine Joe Mann, ne mentionnent pas d'étude concernant la densité de fracturation. Le massif rocheux peut être qualifié comme étant plutôt stable, dans le sens où peu de coups de toits ont été signalés à la mine Joe Mann depuis sa mise en exploitation. La densité de fracturation y est qualifiée de moyenne (Archambault, communication personnelle, avril 2000).

2.2.3 Dépôts quaternaires

Les glaciations quaternaires ont eu pour effet d'éroder intensivement les roches ignées et métamorphiques du Bouclier canadien. Les dépôts glaciaires que l'on retrouve dans le secteur de la mine Joe Mann se sont mis en place lors de la dernière glaciation wisconsinienne et de la période de déglaciation qui a suivi. La dernière glaciation wisconsinienne a érodé et remanié tous les dépôts meubles et les dépôts organiques mis en place au cours des glaciations antérieures. Durant le Quaternaire et la dernière glaciation, les calottes étaient multi-dômes et s'écoulaient radialement. Leur coalescence a formé une calotte unique. La région d'étude a les caractéristiques morphologiques de la zone de terrains fuselés, décrite par Martineau (1984), Prichonnet *et al.* (1984) et Bouchard et Martineau (1984). Les structures glaciaires montrent un allongement caractéristique dans la direction NE-SW. Grâce aux orientations relatives à différents indicateurs, tels que des stries, des allongements de drumlins, des buttes avec traînées de tills et des eskers, cinq événements glaciaires ont été répertoriés dans la région de Chibougamau. Les orientations des structures glaciaires varient entre 200 et 260° SW et traduisent des traces d'écoulement glaciaire.

Les unités de dépôts meubles identifiées sur le terrain (figure 2.7) sont tout d'abord des tills (dépôts glaciaires). Plusieurs tills sont répertoriés : le till de fond, compact, fissile

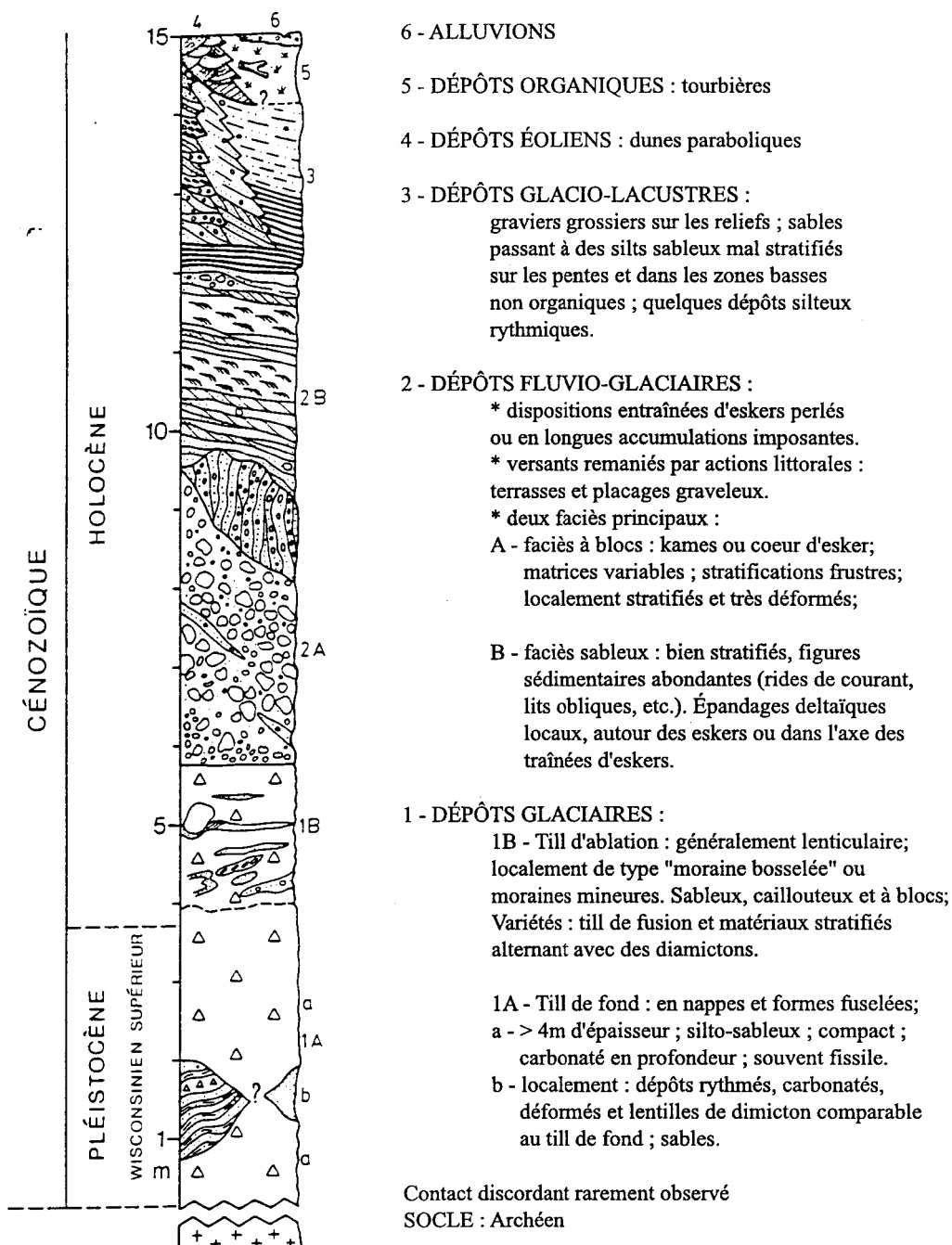


Figure 2.7 : Coupe lithostratigraphique composite des dépôts quaternaires de la région de Chibougamau (Prichonnet et al., 1984).

et légèrement carbonaté, à matrice silteuse ; le till d'ablation caillouteux, à gros blocs métriques, sans carbonates, comportant une variété de tills de fusion lâches, à petites stratifications lenticulaires. Les dépôts fluvio-glaciaires qui surplombent les tills forment sur le terrain des eskers de direction générale NE-SW à mettre en relation avec le modèle de retrait glaciaire proposé par Prest (1970). Le faciès à blocs et le faciès sableux sont décrits plus longuement sur la figure 2.7. Ces derniers dépôts sont surmontés par des sédiments glacio-lacustres, puis des sédiments éoliens, organiques et enfin fluviaux.

La répartition des types de dépôts effectivement retrouvés sur le terrain est présentée en figure 4.3 B du chapitre 4 pour le secteur avoisinant la mine Joe Mann.

D'un point de vue topographique, la région à l'étude est un terrain plat où le maximum des dénivellations atteint à peine 30 mètres sur une distance de 8 km est-ouest. Dans le chapitre 4, la figure 4.1 montre le relief topographique du secteur de la mine Joe Mann.

CHAPITRE 3

Acquisition des données hydro-géochimiques

3.1 Échantillonnage

La distribution des points d'échantillonnage dans la mine répond à une répartition verticale et horizontale de direction E-W par rapport au développement des chantiers de la mine. La technique d'échantillonnage doit permettre d'obtenir des informations sur la nature des eaux qui circulent dans la mine et de caractériser chimiquement ces eaux.

Les analyses chimiques et isotopiques entreprises pour cette étude, ainsi que la modélisation de l'équilibre géochimique, vont permettre d'identifier les processus hydrogéochimiques dominants qui contrôlent la composition des eaux souterraines qui circulent dans la mine, le long de la zone de faille et dans le massif rocheux en général. Les données géochimiques sont utilisées pour calibrer et tester les modèles de simulation hydrogéologique.

3.1.1 Procédure d'échantillonnage

Les prélèvements d'échantillons d'eau de mine se sont déroulés en période d'été, au mois d'août 1998. La plupart des échantillons proviennent de trous de forage munis de vannes ; certains ont été récoltés à la faveur de fractures dans le toit des galeries. Des

échantillons d'eau souterraine ont été prélevés partout où cela s'est avéré possible. Une visite dans les galeries les plus profondes n'a pas permis d'y récolter d'échantillons. Souvent, les trous de forage sont bouchés hermétiquement avec du ciment par les mineurs, ce qui a été la cause principale à l'absence de prélèvement dans certaines galeries. Pour une minorité des eaux, elles proviennent de «trous de mineur», c'est-à-dire de trous forés dans le but d'y placer des explosifs, des barres de soutènement. Ces trous peuvent aussi être des trous de définition pour voir si la zone minéralisée est absente à l'extérieur du chantier, mais dans tous les cas de figure, ils ont moins de dix mètres de longueur.

Les trous de forage dans lesquels ont été prélevées les eaux sont préférentiellement orientés N187 et N7 degrés perpendiculairement à la direction des zones exploitées (N^o 85); ces forages ont pour finalité l'exploration. Pour les mêmes raisons, l'extension des galeries est beaucoup moins importante en direction N-S, qu'en direction E-W le long des zones de minéralisation.

3.1.2 Précautions

Une première estimation visuelle de la qualité globale de l'eau sur place incombe à l'échantillonneur, par exemple les eaux contenant des matières en suspension doivent être rejetées. Certains trous de forage peuvent contenir des substances indésirables pour l'analyse des eaux telles que des hydrocarbures et des résidus de boues de forage. Plusieurs échantillons de la présente étude (numérotés 425, 426, 1889) ont donné une valeur de pH très basique (pH > 12) et des mesures en éléments majeurs anormalement élevées qui

résultent de la présence d'hydrocarbures dans ces eaux. Une évidence de cette contamination a été mise en évidence, après une période de repos de l'échantillon, par une irisation qui s'est développée à la surface de l'eau dans le contenant en plastique.

Lorsque l'échantillon d'eau est prélevé dans un trou de forage muni d'une vanne, il faut laisser couler l'eau durant un certain temps afin de recueillir de l'eau qui n'est pas stagnante. Un débit constant doit être atteint autant que possible. Le débit des trous de forage doit être significatif afin de permettre de récolter 2 volumes d'eau de 250 ml chacun.

Les bouteilles d'échantillonnage employées sont des flacons en polypropylène de type Nalgène translucides. Ils sont nettoyés avec l'eau du forage, puis remplies à ras bord afin de minimiser la capture d'air et de ce fait empêcher d'éventuelles réactions post-prélèvement d'oxydation par l'air. L'opérateur doit donc veiller à ce que des bulles de gaz ne soient pas emprisonnées au niveau des épaulements de la bouteille. Il faut prendre soin de les boucher hermétiquement afin d'éviter une quelconque contamination atmosphérique. Une des 2 bouteilles sera additionnée de HNO_3 (quelques gouttes) qui apporte une meilleure conservation en inhibant les réactions entre les différents composants organiques présents dans l'eau. À leur sortie de la mine, les eaux sont réfrigérées et ce jusqu'à ce que toutes les mesures soient complétées.

3.2 Procédures analytiques

Sur le terrain, on se sert d'un laboratoire portatif de marque HACH contenant une batterie d'appareils permettant les mesures décrites dans le paragraphe 3.2.1. et au tableau 3.1. Les diverses méthodes géochimiques mises en œuvre pour la détermination des ions majeurs au laboratoire de l'UQAC sont expliquées dans le paragraphe 3.3.2. Aucune filtration n'a été effectuée sur les eaux échantillonnées.

Tableau 3.1 – Techniques analytiques et délais acceptables.

Paramètre(s) analysé(s)	Types d'analyses	Lieu	Délais à respecter
Alcalinité	Titration	—	24 heures
Oxygène dissous	Titration	—	24 heures
Eh, pH, température, couleur, odeur, débit d'écoulement.	Laboratoire Hach portatif	<i>In situ</i>	24 heures
Métaux (Ni, Zn, Cu, Fe, Co) Éléments majeurs (Ca, Na, Mg, Cl, K) Si, Sr	Absorption atomique	Laboratoire UQAC	6 mois
Dosage des carbonates	Titration	Laboratoire UQAC	28 jours
Sulfates, chlorures	Spectrophotocolorimétrie	Laboratoire UQAC	28 jours
Oxygène (^{18}O), deutérium (^2H)	Spectrométrie de masse	Laboratoire Toronto	—

3.2.1 Paramètres mesurés *in situ*

Certaines caractéristiques des eaux sont notées sur place lors de leur prélèvement (Clark et Fritz, 1997 ; Wilson, 1995) :

- couleur (liée à de la turbidité, à des résidus de forage, à de la rouille), turbidité (suspension de particules telles que des colloïdes, etc.), odeur (sulfurée, azotée, etc.).
- type d'écoulement (soutenu ou non) de la vanne si l'eau provient d'un trou de forage ; cela peut être un indice pour la position du cône rabattement.
- présence de précipitation de calcite ou de tout autre minéral, si l'eau a été prélevée à la faveur d'une fracture dans le toit ou les murs de la galerie de la mine.

Évidemment, il faut effectuer une transcription précise des lieux d'échantillonnage sur les plans d'ingénierie et, de retour en surface, les trous de forages effectivement échantillonnés sont identifiés (conformément à ce qui est présenté dans les annexes A et F).

Les mesures du total des sels dissous (TSD), de la conductivité électrolytique et de la température des eaux *in situ* sont effectuées à l'aide de l'appareil de mesure HACH Modèle 44600. La conductivité électrique consiste à estimer la capacité de la solution à faire passer un courant électrique. Le courant est transporté à travers les sels inorganiques dissous (anions et cations contenus effectivement dans la solution électrolytique). Les matières organiques (alcools, sucres et huiles) ne participent pas à la conduction du courant dans la solution. On applique un certain voltage entre deux électrodes immergées dans la solution ; la chute du voltage est causée par la résistivité de la solution. L'inverse de cette valeur de résistivité donne la conductivité de la solution.

La mesure de la charge totale en sels dissous (TSD) exprime la concentration des différents ions. La mesure n'est pas sélective et prend en compte tous les ions de la solution. Comme seules les espèces ioniques contribuent à la conductivité et que la valeur de celle-ci est influencée par la concentration, la valence des ions, la mobilité et la température, une relation est établie entre la conductivité et le TSD. La charge en sels dissous est calibrée dans l'appareil comme étant une valeur résultant, à un facteur multiplicateur près, de la conductivité (CDT) de l'eau exprimée en mS/cm :

$$\text{TSD} = \text{CDT} * A \quad \text{où } A = 0,5$$

La conductivité est donc proportionnelle à la quantité de sels dissous présents dans la solution et déduite de la mesure du TSD. La constante A est interne au fonctionnement de l'appareil et fixée à 0,5 pour celui que nous utilisons. Cela a pu être vérifié ultérieurement grâce aux mesures de TSD et CDT acquises sur le terrain. Ce coefficient doit être normalement ajusté selon le type d'eau analysé (tableau 3.2).

Tableau 3.2 – Valeurs du facteur multiplicateur "A" en fonction du type d'eau

Types d'eaux	Facteur multiplicateur A
Eaux carbonatées	0,55
Eaux fortement sulfatées	0,75
Eaux fortement chlorurées	0,9

Pour la détermination du pH et du Eh, un appareillage de type titreur numérique est utilisé. Ce dispositif est muni de 2 électrodes interchangeable. Sur le terrain, seul le pH est mesuré dès le prélèvement car la mesure du Eh nécessite souvent une longue stabilisation de l'appareil. Les électrodes de pH sont tamponnées à l'aide de solutions de pH respectifs

de 4,01 et 7,00 (voire 10 selon les besoins), avant chaque période journalière d'échantillonnage. Les mesures de pH sont à considérer avec précaution parce que des changements significatifs peuvent intervenir dans les mesures de pH *in situ* dues à des variations des conditions de température ou de pression ambiantes. Il faut mentionner que l'appareil pH-mètre, suite à des incidents de mesure (notamment par rapport à la longueur inhabituelle de réponse de l'appareil), a été vérifié à l'automne 1999 et s'est avéré défectueux. Une validation des mesures a toutefois pu être faite à l'aide des mesures de pH mensuelles qui sont reportées dans les rapports M.E.F., 1993 à 1999. Les mesures de pH sont comprises entre 6.5 et 9.5, ce qui correspond aussi à la gamme de pH de nos mesures.

L'électrode de Eh ne nécessite aucun calibrage du fait qu'elle mesure une force électromotrice. Les électrodes sont conservées dans une solution de KCl et nettoyées après chaque mesure avec de l'eau déionisée.

Tous les résultats de ces paramètres sont présentés en annexe B.

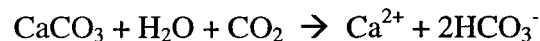
3.2.2 Paramètres mesurés dans les 24 heures

Dans les 24 heures qui suivent le prélèvement des eaux, on mesure l'alcalinité et l'oxygène dissous. Ces analyses sont effectuées sur les eaux contenues dans les bouteilles non acidifiées. Les procédures sont issues du manuel fourni avec le titrateur digital de l'appareillage HACH.

3.2.2.1 Alcalinité

Le principe est basé sur des barrières de pH : l'échantillon est titré avec de l'acide sulfurique jusqu'à des limites colorimétriques qui correspondent à des valeurs de pH. On met 25 ml de l'échantillon, mesurés avec une éprouvette graduée, dans un erlenmeyer. On verse le contenu d'un sachet de poudre blanche de phénophtaléine. À ce moment-là, une absence de coloration indique une alcalinité P nulle (P comme phénophtaléine). Si la coloration vire au rose, ce qui est caractéristique d'eaux basiques, on poursuit avec un titrage, à l'aide d'un titrateur digital, par une solution d'acide sulfurique jusqu'à décoloration. Sinon, dans le cas où l'alcalinité de phénophtaléine est nulle, on ajoute un sachet de poudre verte de méthyl-vert bromocrésol et on titre jusqu'à obtenir les virages bleu-gris, violet et rose. Le titrateur numérique donne un nombre qui, multiplié par un coefficient fonction du volume de l'échantillon utilisé et de la concentration de la solution d'acide sulfurique, donne la valeur à retenir en ppm ou mg/l de CaCO₃.

L'équation qui régit la réaction est la suivante :



Nous avons donc une mole de CaCO₃ pour deux moles de HCO₃⁻ formées. Le rapport des sommes de masse molaire des bicarbonates (produit) et de la calcite (réactif) illustre le coefficient multiplicateur d'une valeur de 1.22 utilisé dans la conversion.

$$\frac{2\text{HCO}_3^-}{\text{CaCO}_3} = \frac{2 (1.01+12.02+(3 \times 16))}{40.08+12.02+(16 \times 3)} = 1.22$$

La conversion en ppm de bicarbonates se fait comme suit : $\text{HCO}_3^- = 1.22 \times \text{CaCO}_3$ (Bédard, 2000).

3.2.2.2 Oxygène dissous

La quantité d'oxygène dissoute dans l'eau, soit la solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend notamment de la température et de la pression. La solubilité de l'oxygène augmente avec la pression hydrostatique et avec une diminution de la température. La limite de détection est 0,2 mg/l.

On remplit une fiole de 60 ml d'eau, de manière à ce que, lorsqu'on la ferme, elle soit complètement remplie, sans emmagasiner des bulles d'air. On y verse une capsule d'oxygène 1 et une d'oxygène 2. Il se forme un précipité de couleur plus ou moins orangée. On laisse ce précipitat retomber jusqu'au deux tiers du volume de la fiole (indiqué par un trait). On verse alors dans la fiole une capsule d'oxygène 3 et on agite la fiole. Cela a pour effet de dissoudre le précipitat et de transformer le tout en une solution jaune plus ou moins foncée. Il faut noter que souvent, les granules de l'oxygène 3 ne se sont pas totalement dissoutes. On verse 20 ml de la solution obtenue dans un erlenmeyer. On titre à l'aide d'un agitateur magnétique, avec du thiosulfate de sodium de concentration massique 0,2N jusqu'à décoloration complète. La conversion des résultats en ppm se fait comme indiquée à la section 3.2.2.1.

3.2.3 Mesures en laboratoire

Les échantillons ont été dosés pour une dizaine d'éléments dont les résultats sont joints en annexe C. Pour certaines méthodes d'analyse, telles que l'absorption atomique, il est possible et recommandé d'utiliser les eaux qui ont été acidifiées : l'acide utilisé (HNO_3) ne nuit pas aux résultats de l'absorption atomique alors que dans le cas des mesures des bicarbonates (HCO_3^-), les résultats seraient faussés. Le titrage et la spectrophotocolorimétrie nécessitent souvent plusieurs dilutions avant de donner des résultats acceptables. Il vaut donc mieux disposer d'un volume d'eau suffisant. Or, les eaux acidifiées n'ont pas encore été utilisées dans la chronologie des mesures suivie pour notre étude. Il est préférable d'utiliser la bouteille contenant l'eau non acidifiée pour les premières analyses afin de disposer pour les analyses ultérieures de l'eau acidifiée pour une meilleure conservation dans le temps.

3.2.3.1 Le titrage des bicarbonates

Une deuxième méthode peut être employée pour le dosage des bicarbonates. La méthode décrite dans ce paragraphe a été utilisée afin de confirmer les résultats de la première. Pour l'étude, les valeurs obtenues par le biais de cette méthode n'ont pas été retenues parce que le pH-mètre employé pour cette détermination était alors défectueux et a faussé les résultats analytiques.

La procédure suivie est dictée par la norme ASTM D 3875 – 80. On dose le volume d'acide nécessaire pour neutraliser les ions hydroxydes et bicarbonates. Par rapport aux

valeurs obtenues dans les différentes étapes du titrage, la plupart des échantillons de l'étude ne contiennent que des bicarbonates (HCO_3^-), très peu d'entre eux donnent des valeurs pour les carbonates (CO_3^{2-}) et aucun ne contient d'hydroxydes (OH^-), notamment des hydroxydes de Fe.

Les relations utilisées pour déterminer les concentrations en carbonates et bicarbonates sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{HCO}_3^- &= (A \times N \times 61 \times 1000) \div 1000 \\ \text{CO}_3^{2-} &= (A \times N \times 30 \times 1000) \div 1000 \end{aligned}$$

où A est le volume en ml d'acide, N la normalité de l'acide et M le volume en ml d'échantillon. Les nombres 61 et 30 g/mol qui interviennent dans les équations sont respectivement les masses molaires de HCO_3^- et CO_3^{2-} .

3.2.3.2 La spectrophotocolorimétrie

On mesure l'absorption de la lumière dans le domaine des longueurs d'onde du visible. C'est une méthode rapide, qui passe par la préparation d'échantillons dilués, dont la précision relative est d'environ 1% (1% de la valeur supérieure qui peut être détectée) (Rouessac et Rouessac, 1995). Les tubes utilisés sont des tubes de Nessler et la détection se fait par cellule photoélectrique. Le blanc ou témoin correspond au solvant seul (il ne contient pas le composé à doser).

Pour les chlorures, la limite de détection est de 0,14 mg/l de chlorures. En ajoutant du thiocyanate de mercure, on libère l'ion thiocyanate qui réagit avec les ions ferriques pour former un complexe orange ferrique de thiocyanate. C'est ce complexe que l'on dose par photométrie dans les analyseurs automatiques.

Pour les sulfates, la limite de détection est de 1mg/l. Les ions sulfates réagissent avec le barium dans le composé «sulfate de barium» et forment un précipité de sulfate et de barium insoluble turbidif dont la quantité est proportionnelle à la concentration de sulfates présents dans la solution.

3.2.3.3 L'absorption atomique

De nombreuses normes s'appliquent pour l'absorption atomique, notamment la norme ASTM D 4691 – 87.

Le principe de cette méthode consiste à ramener les échantillons à l'état d'atomes libres. La température entre 2000 et 3000 degrés fait passer les échantillons de l'état gazeux à l'état atomique. Le brûleur est alimenté par un combustible spécifique (argon en général). Les mesures sont faites à des longueurs d'onde fixes, choisies en fonction des éléments recherchés. Les métaux lourds sont recherchés par cette méthode.

3.3.4 Limites de détection et précision

Le tableau 3.3 présente les limites de détection des appareils utilisés. Pour certaines mesures, des dilutions ont été nécessaires et cela amène une source supplémentaire d'imprécisions.

Tableau 3.3 – Techniques d'analyse et limites de détection.

Éléments	Technique	Limite de détection
Sr	Absorption atomique	0.12 ppm
Zn	Absorption atomique	0.018 ppm
Ni	Absorption atomique	0.15 ppm
Co	Absorption atomique	0.15 ppm
Fe	Absorption atomique	0.12 ppm
Mg	Absorption atomique	0.007 ppm
Na	Absorption atomique	0.015 ppm
Ca	Absorption atomique	0.08 ppm
K	Absorption atomique	0.04 ppm
Si	Absorption atomique	1.8 ppm
Sulfates	Spectrophotocolorimétrie	
Chlore	Spectrophotocolorimétrie	0.14 ppm
Alcalinité	Titration	
Oxygène dissous	Titration	
Dosage des carbonates	Titration	

CHAPITRE 4

Environnement hydrodynamique de la mine Joe Mann

4.1 Hydrologie régionale

4.1.1 Relief topographique et bassin versant

Le modelé topographique de la région d'étude est généralement à faible relief (figure 4.1). Les gradients hydrauliques engendrés ne seront donc que de faible importance. Le faible dénivelé fait en sorte que les lacs ne sont pas perchés et pris dans des réseaux d'écoulement localement divisés (Winter, 1976). La nappe phréatique a probablement un modelé relativement plat. Cependant, les lacs Lou et James se déchargent dans le lac Norhart, du fait de la position de ce dernier en basse partie du réseau hydrographique. Le bassin versant est incliné légèrement vers l'est au voisinage de la mine Joe Mann (figure 4.1). D'un point de vue régional, le sous-bassin versant auquel appartient la propriété Meston est orienté nord-ouest : l'eau du lac Norhart se déverse successivement dans le lac Obatogamau, le lac Muscocho, le lac à l'Eau Jaune, le lac de la Presqu'Île, pour se jeter en dernier lieu dans la rivière Obatogamau (figure 4.2). Le point de déversement final du bassin hydrographique est la Baie James. Le site de l'étude se situe en bordure sud-est du bassin versant de la Baie James, à la limite du bassin versant du Lac Saint-Jean.

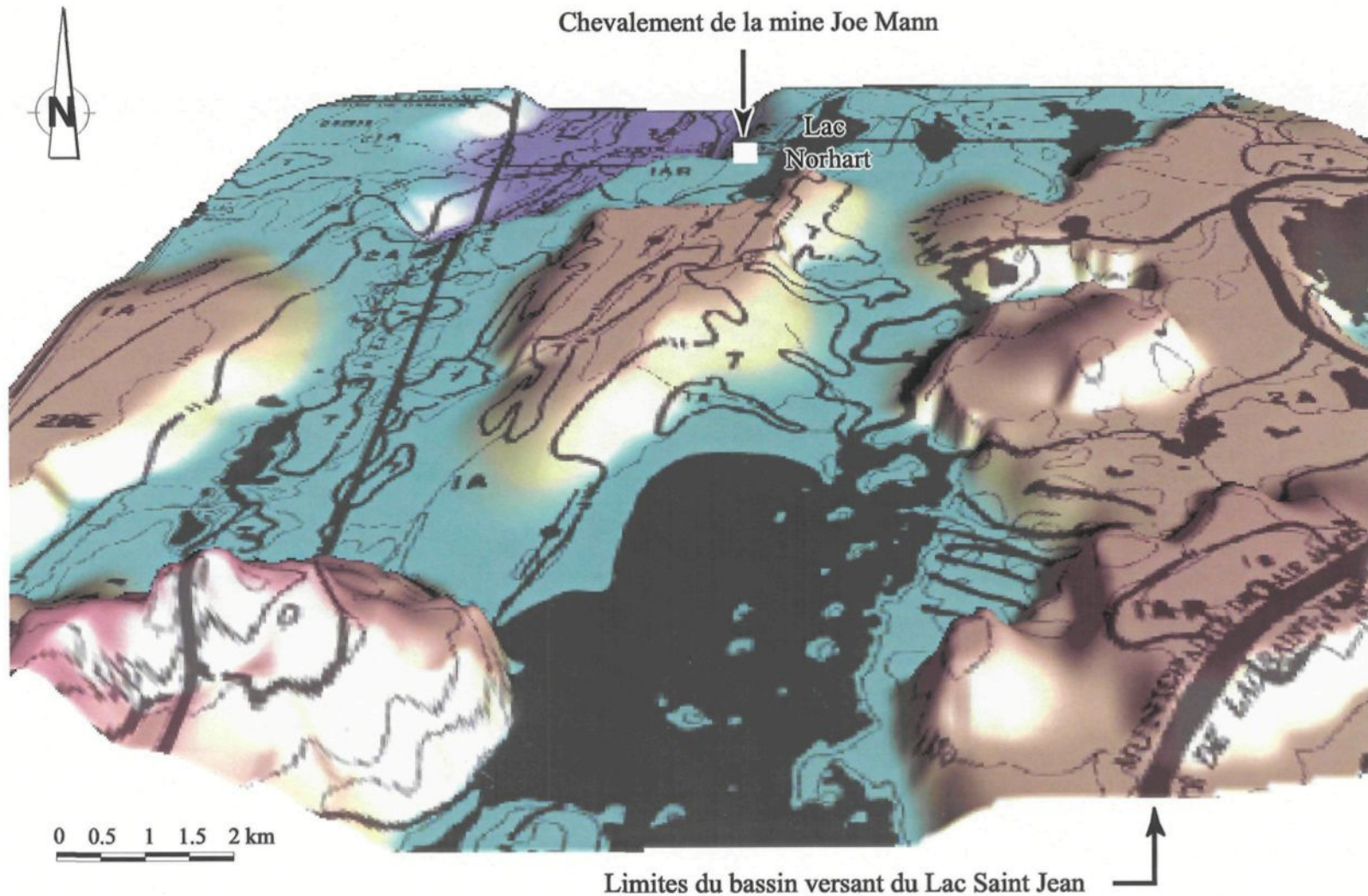


Figure 4.1 : Relief topographique autour du site de la mine Joe Mann. L'exagération verticale est multipliée par 2. La couleur rouge correspond aux sommets alors que la couleur bleue indique des creux.

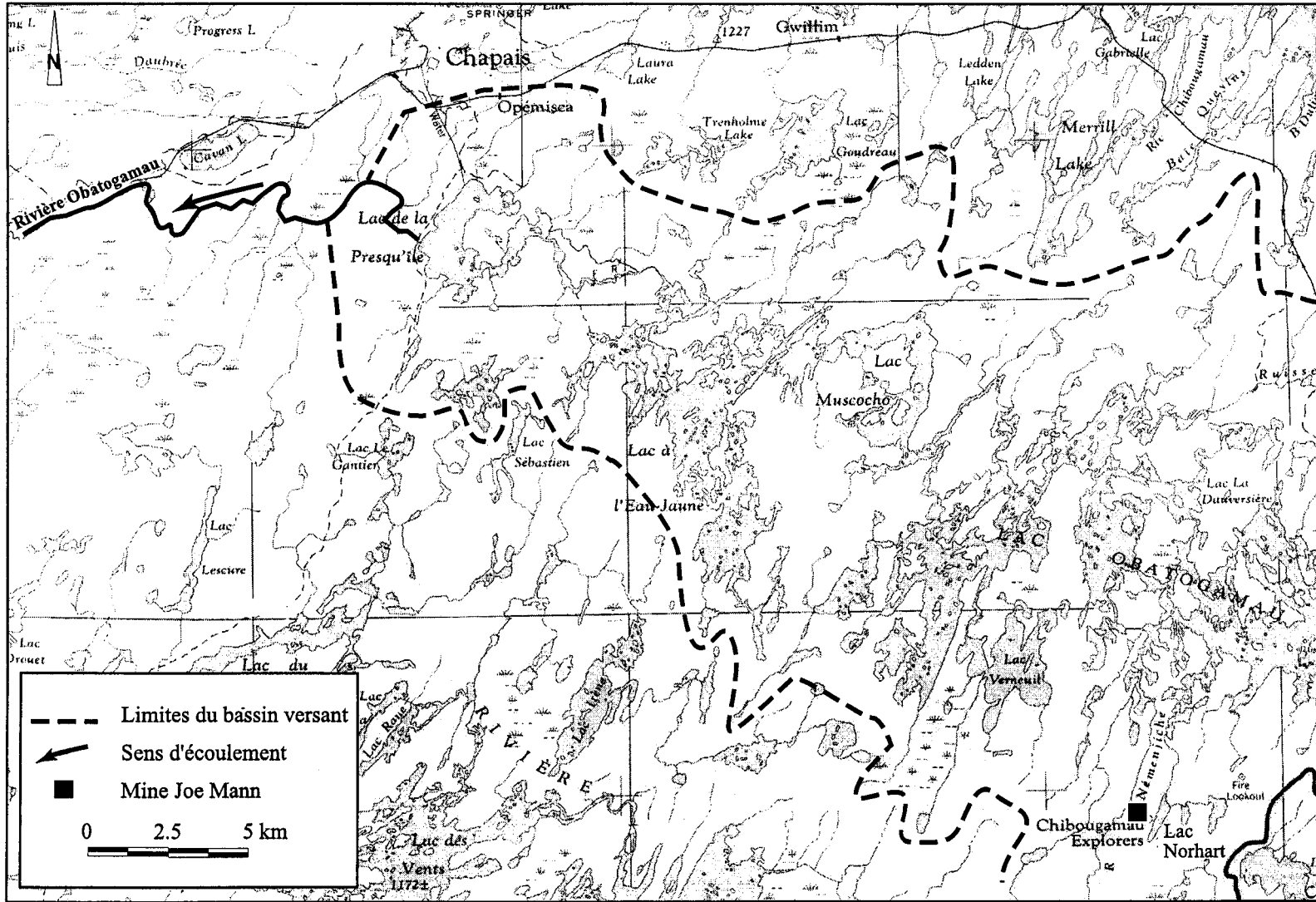


Figure 4.2 : Tracé approximatif du sous-bassin versant du secteur d'étude (modifié de M.E., 1965).

4.1.2 Structures hydrologiques

La présence de nombreux lacs, marécages et tourbières démontre une bonne capacité de recharge des aquifères par les eaux de surface dans le voisinage de la mine. De plus, la présence de zones humides démontre un faible drainage et un équilibre entre les entrées d'eaux (précipitations, eaux de surface et eaux souterraines) et les sorties d'eaux (évapotranspiration et lent drainage des eaux de surface), (Farvolden et *al.*, 1988).

Sur la carte des dépôts de surface de la région de Chibougamau (figures 4.3A et B), une bonne corrélation existe entre les structures associées aux dépôts meubles et le réseau hydrographique ; l'allongement des eskers et des lacs correspond à la même orientation préférentielle NNE. Les dépôts glaciaires ont comblé les structures dépressionnaires NNE qui correspondent à des accidents tectoniques, comme de nombreuses failles qui parsèment la région (voir les figures 2.1 et 2.2). La figure 4.3B met en évidence la présence de dépôts fluvio-glaciaires dans les bas topographiques signalés en figure 4.3A.

À une échelle plus locale, le lac Norhart est à environ 150 mètres du chevalement de la mine et repose sur des dépôts composés principalement de tills indifférenciés d'une épaisseur variant de 25 centimètres à 1 mètre.

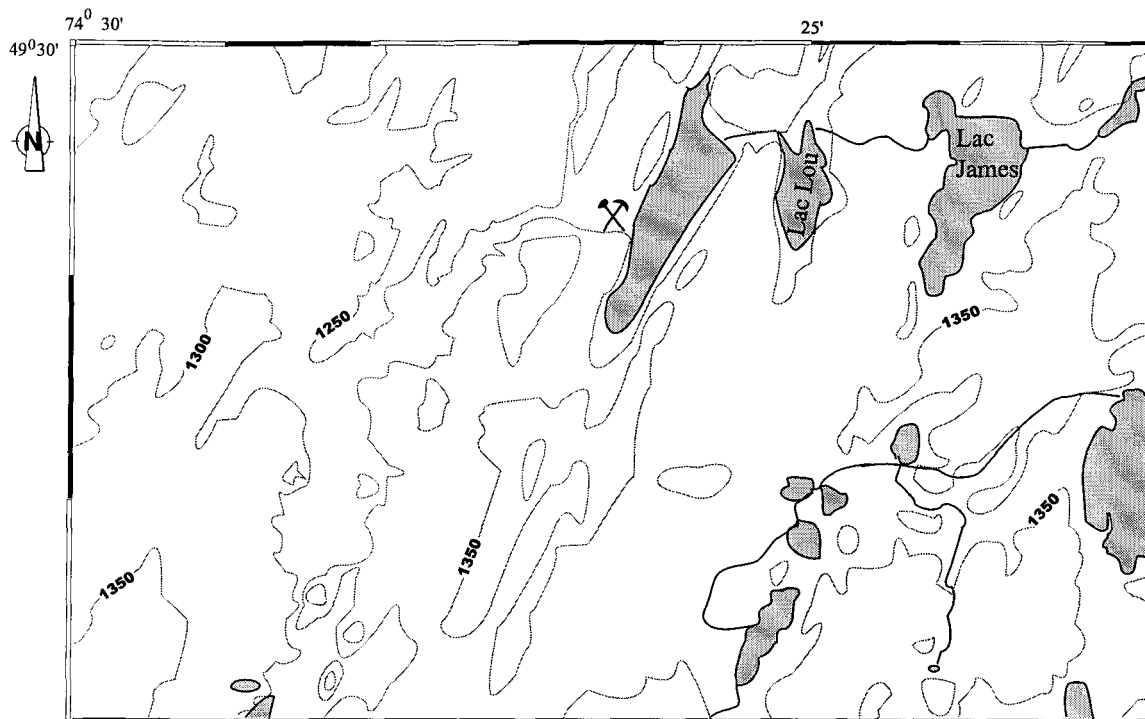
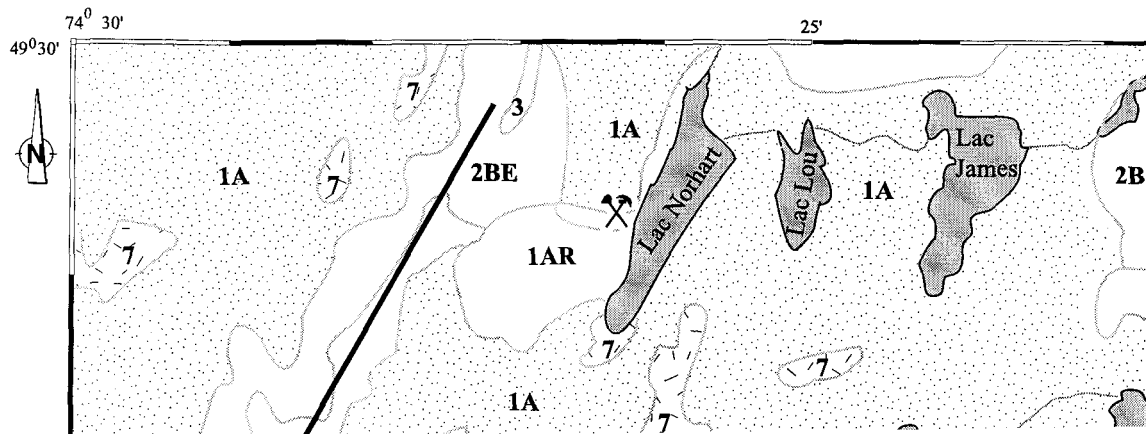


Figure 4.3A : Carte topographique du secteur de la mine Joe Mann (modifiée de M.E.R., 1991).



4.2 Conditions hydrogéologiques perturbées dans la mine Joe Mann

La perturbation conséquente aux infrastructures (chantiers et galeries) d'une mine souterraine affecte notamment les eaux souterraines. La localisation et la dimension des excavations minières, ainsi que les structures majeures particulières du massif rocheux seront avancées comme autant de facteurs de contrôle sur l'écoulement des eaux souterraines dans l'environnement de la mine Joe Mann.

D'autre part, les propriétés structurales du socle rocheux constituent le contrôle dominant sur l'écoulement souterrain régional. De façon générale, dans un milieu peu perméable comme celui des roches cristallines, la circulation des fluides se concentre préférentiellement dans les zones de déformation cassantes, ductiles et de fracturation qui existent au sein de la formation rocheuse.

4.2.1 Présentation de la mine

Les trois zones minéralisées et exploitées à la mine Joe Mann (Nord, Principale et Sud) sont encaissées dans des zones de cisaillement, comme cela est montré en figure 2.5. Les excavations minières consistent en des chantiers et des galeries pratiqués sur une étendue latérale d'environ 1000m le long des trois zones minéralisées orientées N085° et espacées l'une de l'autre de 100m dans la direction N-S. De façon générale, les ouvertures minières fragilisent le massif rocheux, permettent de relâcher les contraintes et augmentent la perméabilité du-dit massif rocheux.

4.2.2 Le plan de la faille NE : la «faille d'eau»

4.2.2.1 Description

Une des particularités structurales de la mine résulte de la présence d'une zone de faille NNE à pendage de 30^0 vers l'ouest qui coupe le chevalement et se retrouve sur plusieurs niveaux. Cette faille affleure en surface dans une dépression occupée par le lac Norhart. La figure 4.4 schématise la relation spatiale entre le plan de faille considéré et les niveaux d'exploitation.

Il peut d'ores et déjà être affirmé que la géométrie et la dimension de la zone de faille affectent les paramètres hydrauliques et hydrogéologiques. Dans certaines zones de la mine, il a été constaté que de l'eau coule abondamment le long des parois des galeries ; notamment au niveau 4, dans un chantier côté est (figure 2.6) où le plan de la faille «ouverte» NE coïncide avec le mur de la galerie. Cela témoigne de l'importance, en terme de volume d'eau, de l'infiltration de l'eau de surface en profondeur dans le massif rocheux. Suite à la pénétration d'une grande quantité d'eau météorique par le biais de systèmes naturels actifs, il se crée une perturbation du chimisme des eaux qui résident dans les roches cristallines en profondeur.

Des commentaires émis par les techniciens de la mine avant notre période d'échantillonnage n'ont pu être validés : il nous avait été signalé qu'au sud, l'eau est jaunâtre, alors qu'au nord elle semble se teinter un certain temps après avoir été prélevée

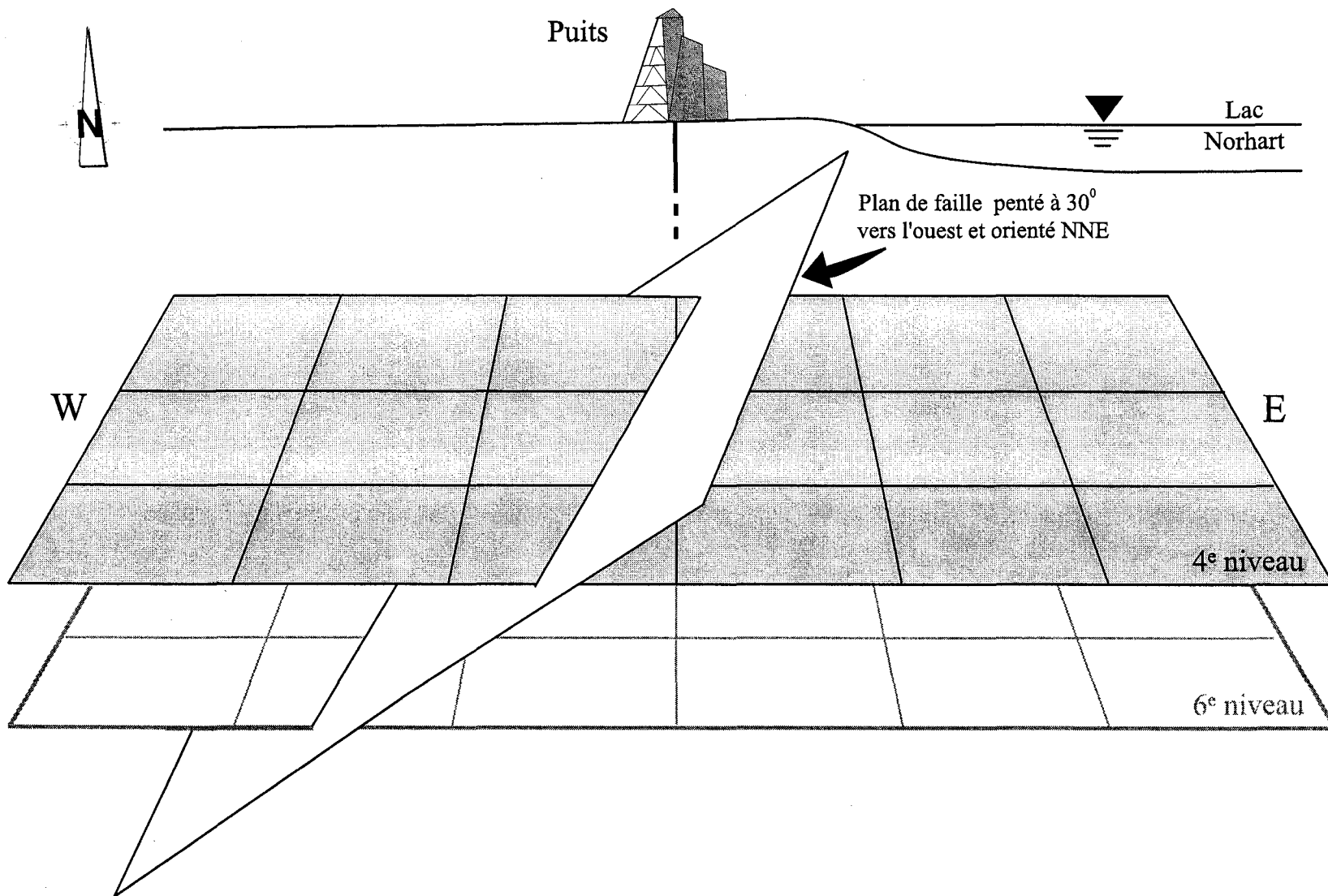


Figure 4.4 : Schématisation de la position spatiale du plan de faille en coupe longitudinale passant par le chevalement de la mine.

sans toutefois devenir turbide. De plus, des problèmes de corrosion de la tuyauterie ont été signalés.

4.2.2.2 Rôle hydrogéologique du lac Norhart

Le lac Norhart qui a été évoqué précédemment, vu sa proximité au chevalement, sera envisagé comme étant le point de recharge des eaux souterraines. Il ne faut pas négliger les relations hydrauliques qui ont lieu entre le lac Norhart, principal réservoir d'eau de surface et les eaux souterraines dans la mine. Ainsi, la faille NNE évoquée précédemment (section 2.2.2) constitue une voie de pénétration des eaux de surface, en particulier de celles du lac, dans le massif rocheux.

La zone faillée NNE à pendage vers l'ouest de 30^0 (paragraphe 2.2.2), recoupant les chantiers et galeries de la mine Joe Mann, devrait contrôler de façon importante l'écoulement des eaux souterraines.

De multiples essais d'injection d'air ou de colorants dans la faille ont été effectués par les techniciens de la mine dans les années 90 afin d'établir la possible connexion entre le lac Norhart et la faille d'eau. Cependant, ces essais sont restés vains jusqu'à ce jour (Maltais, communication personnelle, août 1998). De plus, le faible pendage de cette faille (usuellement plus fort dans le région de l'Abitibi) soulève un questionnement quant à sa participation à la remontée des saumures profondes. Dans le chapitre 6, après interprétation des résultats isotopiques, le rôle de cette faille importante sera abordé.

4.2.2.3 Géométrie de la zone dénoyée

Nous présentons en figure 4.5 un schéma de l'extension de la zone dénoyée dans le cas où le lac ne serait pas présent mais qu'un pompage aurait lieu dans la mine. La zone dénoyée englobe alors les galeries dans celle-ci.

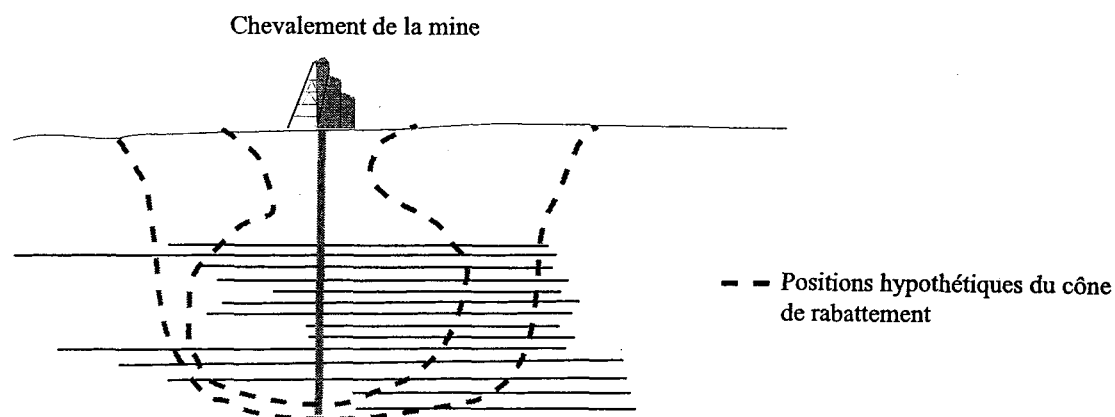


Figure 4.5 : Schématisation de l'extension de la zone dénoyée dans l'éventuelle absence du lac.

Nous ne disposons pas d'évidences quant à la formation d'un cône de rabattement dans les environs immédiats de la mine ; une plus grande proportion de forages asséchés dans les niveaux supérieurs de la mine n'a pas été notée lors de l'échantillonnage. Cela suggère que le lac Norhart au sein de ce système perturbé, est une zone de charge constante. La conséquence en est la formation d'un cône de rabattement restreint (figure 4.6).

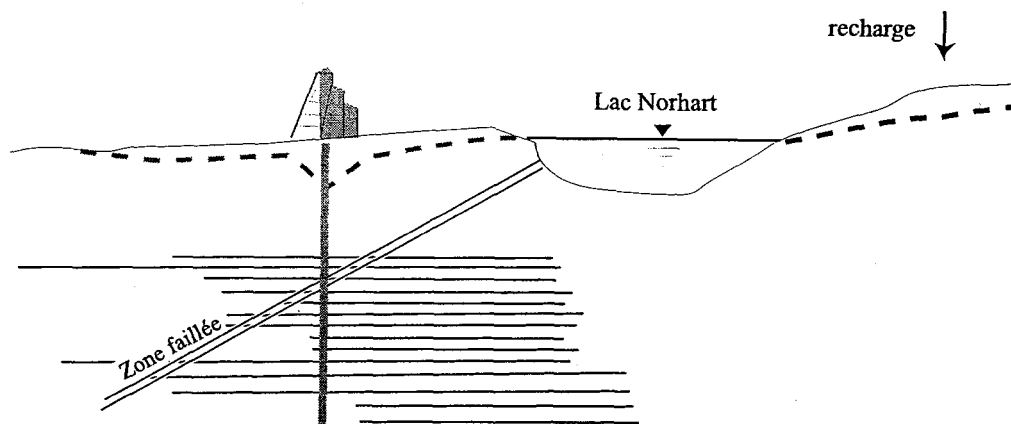


Figure 4.6 : Schématisation du contexte hydrodynamique actuel à la mine.

4.2.3 Types de perméabilités

Les formations rocheuses décrites à la mine Joe Mann (gabbro, basalte, rhyolite et andésite) sont considérées à grande échelle comme un complexe à faible perméabilité primaire naturelle. À l'échelle locale, l'évolution géologique du secteur à travers les différentes phases tectoniques, notamment les structures cassantes associées aux phases tardi-tectoniques (Chown et *al.*, 1992 ; Dion et Guha, 1990), a amené le développement d'une perméabilité hétérogène significative que nous qualifierons de secondaire. Cette perméabilité secondaire est subséquente à la fissuration, à la fracturation, au cisaillement, ainsi qu'à l'altération ayant affecté ces formations rocheuses. Certaines de ces failles sont cependant colmatées par des matériaux imperméables (en général par de l'argile) ou bien par des produits de précipitation.

4.2.4 Le système de pompage

À l'échelle de l'Abitibi, l'industrie minière est responsable d'environ 53% de l'extraction journalière d'eau souterraine (Rouleau et *al.*, 1999). À la mine Joe Mann, les volumes extraits par le système de pompage de la mine sont considérables (tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Débits mensuels moyens des eaux d'exhaure à la mine Joe Mann, selon les rapports M.E.F. (1993 à 1999).

Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1991	6912	6221	5918	6350	7690	7330	7214	7142	7430	7488	7272	7646
1992	7128	7387	6898	6725	6725	6725	6725	6725	7667	7502	7002	6350
1993	6426	6624	5636	5191	6563	6287	4468	7108	5792	6649	5800	4910
1994	4619	5324	5579	5980	7108	7334	5454	6039	7646	6934	6235	-
1995	-	-	-	-	-	-	1800	864	5520	4680	2688	-
1996	20736	2160	1872	10080	7200	6840	6720	7920	8160	3744	43200	-
1997	3355	5040	7675	9115	9360	7200	5760	6120	6336	4795	4795	-

Les débits sont en m³/j. Les tirets indiquent une absence de données pour le mois considéré.

Des informations sur la capacité des pompes sont données dans le tableau 4.2. Le pompage des eaux dans la mine inclut aussi bien les eaux d'infiltration naturelles que l'eau employée dans les activités minières pour la réalisation des forages notamment.

Tableau 4.2 : Caractéristiques du système de pompage.

Localisation des pompes	Capacité
Du niveau 2350 au 1650 pieds	0.050m ³ /s
Du niveau 1650 au 1000 pieds	0.075m ³ /s
Du niveau 1000 pieds à la surface	0.100m ³ /s
Du niveau 650 pieds à la surface	0.050m ³ /s

La mine Joe Mann se classe parmi les mines où le débit des eaux d'exhaure est le plus élevé. Ainsi, la moyenne des débits sur sept années, de 1991 à 1997, notés sur les

rapports M.E.F. (1993 à 1999), s'élève à 6240 m³/j. Le pompage a lieu à débit relativement constant toute l'année (tableau 4.1). Les données de 1996 présentent plusieurs valeurs apparemment erratiques que nous n'arrivons pas à expliquer. Les auteurs de ces rapports précisent que les valeurs de débit indiquent la moyenne des mesures effectuées durant le mois considéré. L'estimation du débit mensuel moyen a été effectuée en tenant compte des périodes pendant lesquelles aucun écoulement n'a eu lieu (M.E.F., 1999).

CHAPITRE 5

Présentation des résultats

5.1 Validité des résultats

5.1.1 Équilibre ionique

Le calcul de l'erreur d'équilibre des charges permet de tester la validité des résultats, en se basant sur le principe de neutralité de l'eau. L'erreur d'équilibre des charges exprimée en pourcentage correspond à l'écart des résultats entre les analyses des cations et des anions par rapport à la valeur de référence déduite de l'équation d'électro-neutralité :

$$\begin{aligned}\sum cations &= \sum anions \\ \sum zm_c &= \sum zm_a\end{aligned}$$

où z est la valence des ions et m la molalité de ces mêmes ions. À partir de ces considérations, la formule qui est habituellement utilisée pour le calcul de l'erreur

d'équilibre des charges (E) est la suivante :
$$E = \frac{\sum zm_c - \sum zm_a}{\sum zm_c + \sum zm_a} \times 100.$$

Pour des concentrations en TSD de l'ordre de 200 mg/l, il est admis que l'erreur de balance des charges E peut fluctuer à plus ou moins 5%, alors que, pour des eaux dont la charge en sels dissous dépasse les 1000 mg/l, E peut s'en éloigner à plus ou moins 3% (Faure, 1991). Vu les erreurs d'analyses qui sont apparues dans cette étude (et qui seront évoquées ultérieurement), la limite de validité a été fixée à plus ou moins 10 %. Comme le montre la figure 5.1, nos résultats sont centrés sur -15%, ce qui traduit un excès de charges

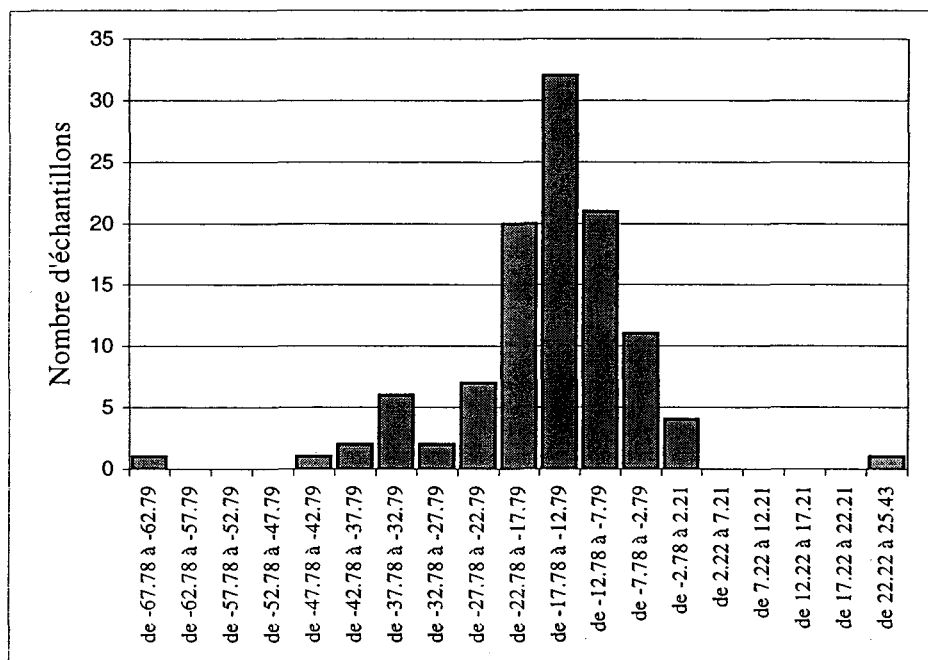


Figure 5.1 : Histogramme de l'erreur d'équilibre des charges.

négatives ou un total des anions trop élevé dans les résultats des analyses effectuées. Plusieurs échantillons de notre étude dépassent le critère d'erreur admissible de plus ou moins 10%. La plupart de ces échantillons proviennent des sites d'échantillonnages les plus profonds, soit les niveaux 1825 et 2000. Les statistiques descriptives sommaires de ces échantillons sont données dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 – Statistiques descriptives des échantillons rejetés pour l'étude.

		Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
Eh		132.7	-9.8	204	141
PH		8.1	6.76	13.2	7.57
Température	°C	8.55	4.9	19.2	8.7
Conductivité	mS/cm	1.41	4.70E-02	10.48	0.94
Cl	R é s u l t a t s e n p p m	241.69	0.8	1005	135
Sulfates		154.3	1.6	692.2	104.2
Sr		3.25	0	20.8	2.65
Oxygène dissous		5.7	2.4	10.4	5.15
Mg		21.0	0	88	18.1
Na		63.9	0	310	42
Ca		116	6	500	95
K		19.7	1.4	396	3.5
Fe		1.5	3.00E-02	13.6	0.29
Si		3.7	0	6	4
Bicarbonates		283.3	4.88	3430.6	113.9
TSD calculé		914.0	29.23	4697.7	745.5

Dans le tableau 5.2, les éléments entrant en ligne de compte pour le calcul de l'équilibre ionique (somme des cations et des anions) sont présentés pour les échantillons qui ont été rejetés de l'étude. Leur disparité s'étale entre - 68% et +25%.

Ce sont surtout des excès en anions qui sont responsables du rejet de ces échantillons. Les causes d'erreur peuvent intervenir à deux étapes : au moment de l'échantillonnage ou lors des analyses.

Nous pouvons supposer que les procédures analytiques sont à remettre en question ou encore que les cations importants n'ont pas tous été décelés lors des analyses, ce qui est fort improbable.

Tableau 5.2 : Échantillons non pris en compte pour l'étude

Référence de l'échantillon	Somme des cations (méq/l)	Somme des anions (méq/l)	Erreur d'équilibre des charges (%)
20106	6.62	34.45	-67.78
1888	4.19	11.57	-46.77
1887	4.32	10.12	-40.20
1894	6.99	16.31	-40.03
18100	6.82	14.98	-37.44
1895	6.57	13.71	-35.22
1893	5.08	10.55	-35.03
1890	11.94	24.54	-34.54
1896	4.28	8.75	-34.34
20103	6.59	13.34	-33.86
1663	6.54	12.45	-31.14
1891	8.70	16.54	-31.06
1889	17.96	30.93	-26.53
408	2.67	4.54	-25.90
1666	8.99	14.60	-23.79
426	4.71	7.47	-22.71
1665	36.29	57.34	-22.48
425	8.27	12.51	-20.41
1059	2.01	2.22	-5.00
420	6.23	6.86	-4.75
427	3.38	3.69	-4.41
L109	0.38	0.38	0.17
20107	8.27	8.09	1.15
404	2.90	2.82	1.25
406	3.29	3.17	1.92
682	4.27	2.54	25.43

La détermination des bicarbonates s'est faite de deux façons, mais la méthode retenue sera celle de l'alcalinité (section 3.2.2.1). La méthode de titrage des bicarbonates utilise un pH-mètre et ce dernier ne fonctionnait pas correctement dans notre cas. Du fait de cette erreur systématique, les valeurs en bicarbonates dépassaient fréquemment la mesure du total en sels dissous et elles ont été rejetées. Toutefois, une mise en graphique (figure 5.2) de la concentration des bicarbonates versus l'alcalinité démontre que, pour les résultats pris en compte dans l'étude, les mesures sont proportionnelles dans une grande majorité.

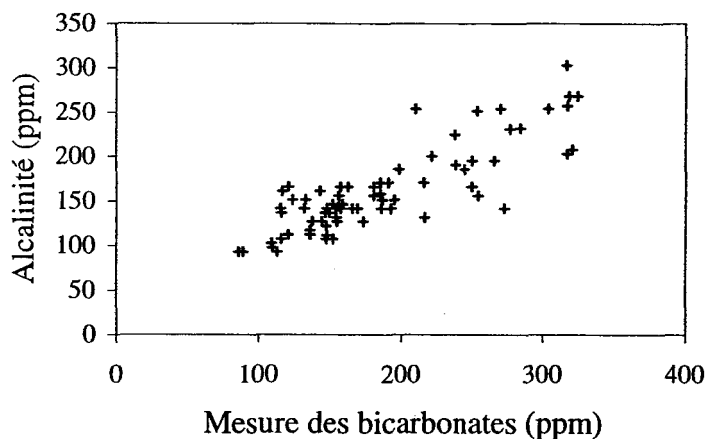
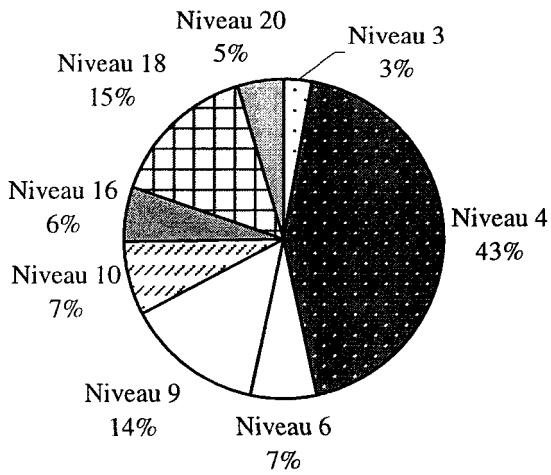


Figure 5.2 : Mesures de l'alcalinité versus les mesures des bicarbonates.

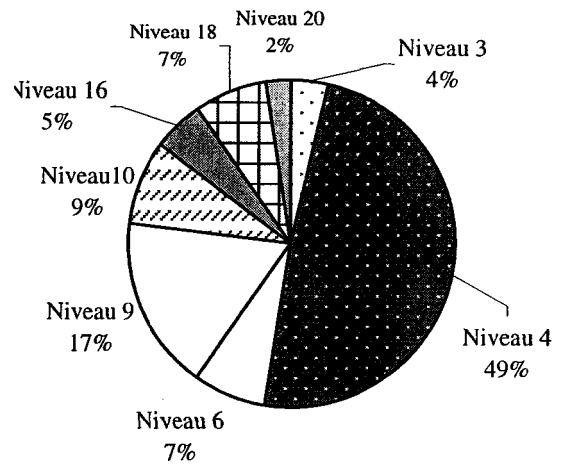
Nous avons donc considéré pour cette étude 81 échantillons valables qui sont tous caractérisés par un excès anionique. Le pourcentage d'échantillons prélevés dans les différents niveaux ainsi que le pourcentage qu'ils représentent sur l'ensemble est montré en figure 5.3, avec mention des échantillons rejetés après l'évaluation de l'erreur d'équilibre des charges.

5.1.2 Précisions sur les mesures du total en sels dissous

Pour la plupart des échantillons, la valeur du TSD estimé sur le terrain à partir de la conductivité électrique (TSD «lu») est inférieure à la valeur obtenue en additionnant les divers résultats analytiques des ions majeurs et mineurs (TSD calculé). La mesure du total en sels dissous qui est considérée comme la plus juste est celle obtenue en additionnant les résultats analytiques et elle est nommée TSD calculé dans les autres chapitres par opposition au TSD «lu» par le biais de l'appareil HACH sur le terrain. Cependant, la figure 5.4 illustre la proportionnalité qui existe entre les deux courbes, d'une part la valeur lue et



Répartition de tous les échantillons.



Répartition des échantillons pris en compte pour l'étude dans les différents niveaux de la mine.

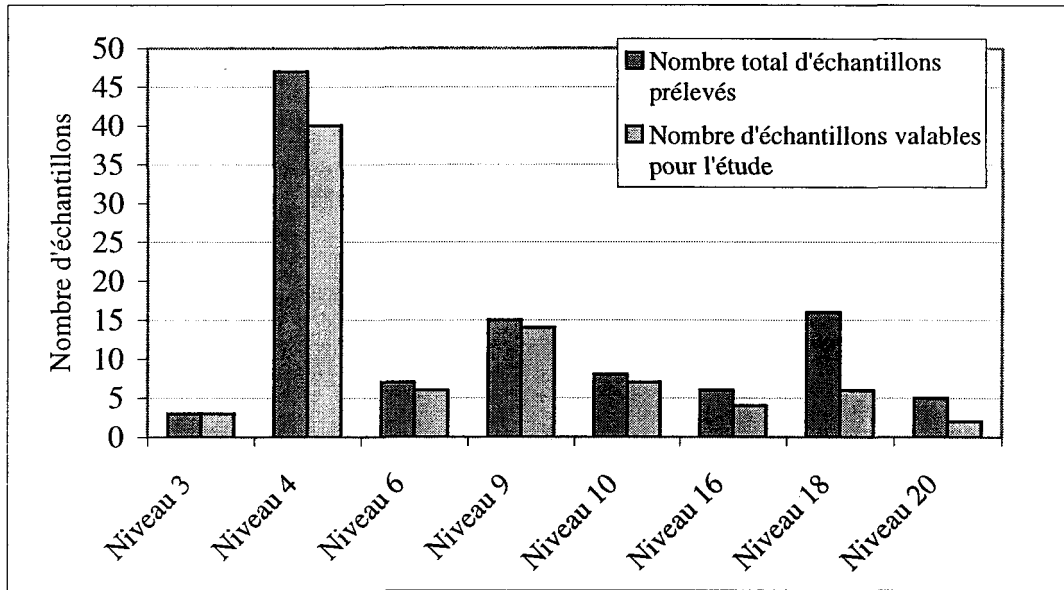


Figure 5.3 : Répartition des échantillons dans les niveaux de prélèvement.

d'autre part la valeur calculée. Une des explications de l'écart observé pourrait être reliée au fait que lors des analyses effectuées sur les eaux qui contiennent de l'acide, certaines substances aient pu être mises en solution par cette adjonction d'acide. Avant cela, ces substances ne pouvaient pas être détectées notamment lors de la mesure *in situ* de la charge en sels dissous (TSD).

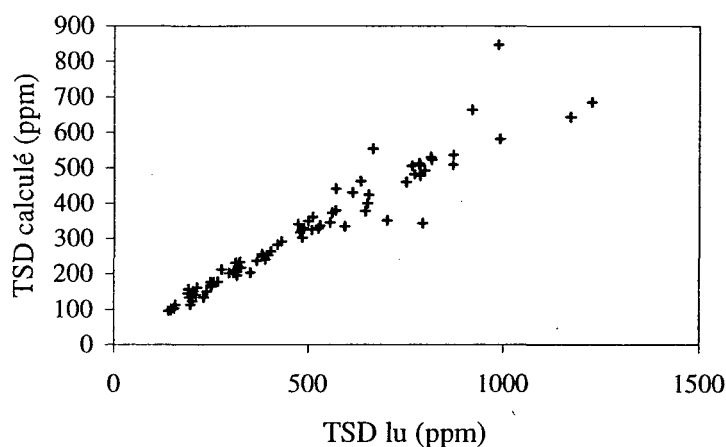


Figure 5.4 : Proportionnalité entre TSD lu et TSD calculé.

5.2 Les résultats

Les résultats des analyses géochimiques sont présentés en annexes B et C. Les statistiques descriptives de ces paramètres ont été réalisées à l'aide des logiciels WinSTAT (1994) et EXCEL.

5.2.1 Chimisme des eaux souterraines

Dans les études de caractérisation des eaux souterraines dans les mines, les auteurs procèdent le plus souvent à une classification des eaux selon leur salinité, c'est-à-dire selon leur teneur en sels dissous (Fetter, 1994 ; Frappe et Fritz, 1987 ; Fritz, 1997 ; Fritz et Frappe,

1982 ; Gascoyne et *al.*, 1987 ; Geological Survey of Canada, 1967). Les eaux les plus profondes sont généralement les plus chargées en substances dissoutes. Nous n'avons pas réussi à définir de façon précise des types d'eau distincts parmi les échantillons à notre disposition, seulement des tendances plus ou moins nettes. De fait, nous n'avons pas reconnu d'eau à caractéristiques propres des eaux salines dans les eaux prélevées à la mine Joe Mann.

5.2.1.1 Les anions

Les anions majeurs sont les sulfates et les bicarbonates (tableau 5.3). Le chlore et l'oxygène dissous sont présents en concentration beaucoup plus faible et sont des anions secondaires. La mesure des bicarbonates finalement retenue pour l'interprétation est celle obtenue dans les 24 heures après l'échantillonnage par conversion de la mesure en CaCO_3 (appelée alcalinité dans le chapitre 3).

Tableau 5.3 – Statistiques descriptives des mesures anioniques.

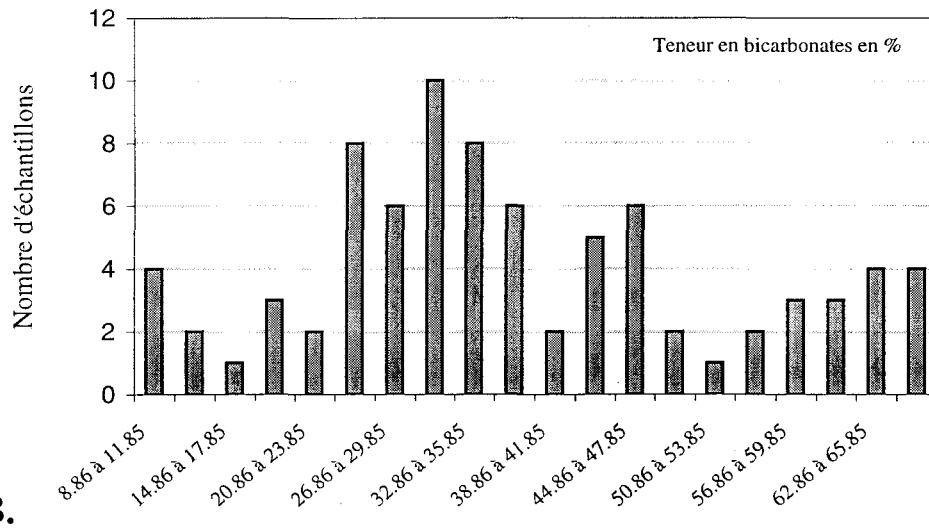
	Sulfates	Bicarbonates	Cl	Oxygène dissous
Nombre d'échantillons	81	81	81	81
Moyenne	159.1	155.4	38.0	7.3
Variance	18780	2506.3	7319.74	4.4
Minimum	0.43	29.28	1	2.5
Maximum	745.8	302.56	440	11.4
Médiane	145.5	141.5	8.2	7.6

Les résultats sont exprimés en ppm.

Pour construire les histogrammes de fréquence de la figure 5.5, les teneurs sont normalisées à 100% des anions. Pour une vingtaine d'échantillons, la mesure en bicarbonates représente plus de 50% du TSD ramené à 100%. La moyenne de la somme

des analyses de bicarbonates et des sulfates pour tous les échantillons est élevée de l'ordre de 64.7%. Il signifie que sur une teneur en sels dissous normalisée, les mesures en sulfates et en bicarbonates sont les plus élevées.

A.



B.

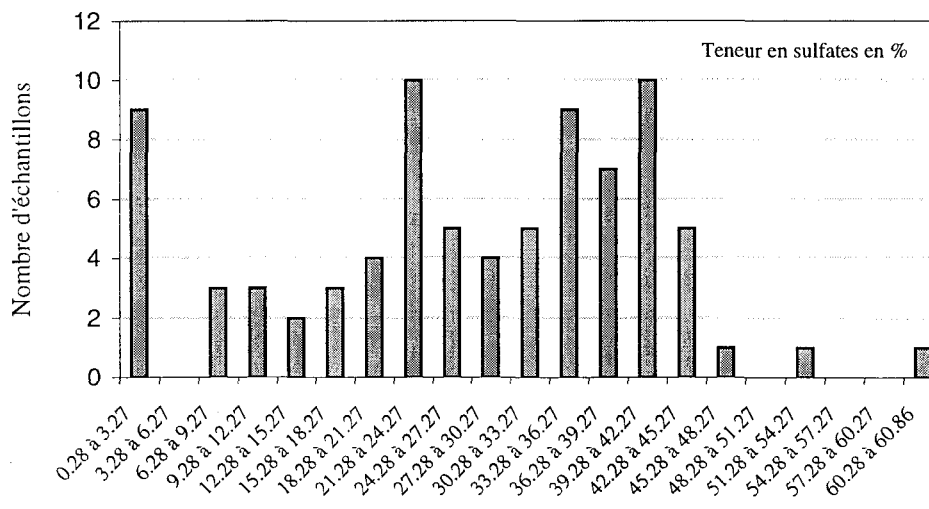


Figure 5.5 : Teneurs normalisées à 100% des anions.
A - Teneurs en bicarbonates ; B - Teneurs en sulfates.

5.1.2.2 Les cations

Les cations majeurs sont, par ordre d'importance, le calcium, le magnésium et le sodium (tableau 5.4). Le potassium est un cation secondaire, plus présent néanmoins que le strontium. Les métaux (Zn, Fe) ne sont que très peu présents dans les échantillons ; le cuivre et le nickel ne sont pas mentionnés dans les rapports d'analyses en annexe C étant donné que leurs valeurs sont toujours en dessous du seuil de détection de l'appareil d'absorption atomique.

Tableau 5.4 : Statistiques descriptives des mesures cationiques.

	Ca	Mg	Na	Si	K	Sr	Zn	Fe
Nombre d'échantillons	81	81	81	81	81	81	5	70
Moyenne	85.6	25.4	16.5	3.6	2.9	0.8	4.4	0.95
Variance	1879.2	233.5	640.5	1.6	4.4	1.3	96.5	3.0
Minimum	10	2.6	2	1	0.6	0.1	0.02	0.01
Maximum	200	74	140	9	14.6	5.8	22	9.8
Médiane	82	20.6	8	4	2.4	0.4	0.1	0.4

Les résultats sont exprimés en ppm.

5.2.2 Statistiques et distribution des paramètres physiques

Les statistiques descriptives pour le total des sels dissous, le Eh, le pH et la température sont présentées dans le tableau 5.5. Il faut noter que le pH moyen se situe près de la neutralité. Aucune des eaux souterraines échantillonnées ne s'est vraiment révélée basique ou acide, les valeurs étant comprises entre 6.56 et 9.23. Dans une telle gamme de pH, les bicarbonates sont des ions dominants parmi les alcali (Tardat-Henry, 1992) . La gamme de pH peut être confirmée comme étant correcte, malgré le pH-mètre défectueux, au vu des résultats fournis par le service environnemental de la mine Joe Mann sur

plusieurs années dans les rapports M.E.F. (1993 à 1999). Les relevés hebdomadaires du pH dans la mine donnent des pH compris entre 6.5 et 9.5, ce qui constitue la gamme de valeurs acceptable pour les rejets des eaux d'exhaure.

La température des eaux est un paramètre important puisqu'il permet de différencier les eaux tempérées d'infiltration récente des eaux profondes résidentes. Les températures mesurées varient entre 4.8 et 11.3.

Les valeurs en TSD calculé se retrouvent dans un intervalle allant de environ 167 à 1264 ppm.

Tableau 5.5 : Statistiques descriptives des mesures des paramètres physiques.

	TSD lu	TSD calculé	Eh	pH	Température
Nombre d'échantillons	81	81	81	81	81
Moyenne	320.9	525.0	157.9	7.5	7.3
Variance	26347.4	68384.8	703.8	0.14	2.3
Minimum	94	166.5	85	6.56	4.8
Maximum	847	1264.6	208	9.23	11.3
Médiane	317	507.1	163.8	7.53	7.6

Les résultats concernant le TSD sont exprimés en ppm. Eh et pH sans unité. La température est donnée en degrés Celsius.

5.2.4 Composition en ^{18}O et ^2H et éléments d'interprétations des

analyses

Les analyses isotopiques, pour ^{18}O et ^2H (communément appelé deutérium D) ont été effectuées au laboratoire isotopique du département de Sciences de la Terre de l'Université de Waterloo par l'entremise de la professeure B. Sherwood-Lollar de

l'Université de Toronto. Trois échantillons d'eau ont été prélevés au printemps 99, un dans le lac Norhart (répertorié sous L112), un au niveau 450 (numéro 4110) et un autre au niveau 2500 (numéro 25111). Les mesures en deutérium et ^{18}O se font par rapport à un étalon, ce ne sont pas des valeurs absolues, ce qui justifie l'absence de données sur les marges d'erreur. La précision des appareils est de 2 ou 3 décimales.

Tableau 5.6 : Résultats isotopiques.

Référence de l'échantillon	Résultats ^{18}O			Résultats ^2H		
	Répétition	Moyenne		Répétition	Moyenne	
L112	-13.94	-14.1	-14.02	-101.4	-102.8	-102.1
4110	-13.15	-13.48	-13.315	-94.34		-94.34
25111	-13.7	-13.24	-13.47	-100.3		-100.3

Pour ^2H et ^{18}O , la référence est le «Standard Mean Ocean Water» (SMOW). Si on met en graphique $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$, on a une ligne droite qui passe au mieux par le nuage de points et cette droite est la «Local Meteoric Water Line» (LMWL) ; la position de cette ligne varie localement à cause de petites variations dans la pente et l'intercept. Il est important d'établir pour chaque aire d'étude cette LMWL du fait qu'une déviation par rapport à celle-ci indique des processus secondaires, tels que l'évaporation ou des interactions eau-roche qui ont affectées la composition isotopique des eaux souterraines.

Les rapports isotopiques sont reportés comme des différences par rapport à un standard arbitraire connu tel que le SMOW (Standard Mean Ocean Water) et sont exprimés en unités δ pour mille (parties pour mille ou ‰) par rapport à la référence. Les valeurs δ sont déterminées à partir de l'équation :

$$\delta = \left[\frac{(R - R_{std})}{R_{std}} \right] * 1000$$

où R et $R_{standard}$ sont les rapports isotopiques dans l'échantillon et dans le standard, respectivement. Une valeur négative de δ indique que le rapport isotopique de l'échantillon est appauvri par rapport à l'isotope lourd en comparaison à l'isotope lourd dans le standard ou inversement, une valeur positive de δ indique que l'échantillon est enrichi par rapport au standard. La relation entre δD et $\delta^{18}O$ est définie comme étant la ligne d'eau météorique et est déterminée par l'équation :

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + d$$

où d est l'excès de D. La valeur globale moyenne pour d dans les eaux douces est de 10. La valeur pour d peut-être différente dépendant de la situation du site et de l'ère géologique. Chaque changement dans la valeur de d, qu'il soit petit ou grand va seulement déplacer la ligne d'eau météorique de l'autre côté de la ligne d'eau météorique globale moyenne (GMWL). La ligne d'eau météorique nord-américaine a classiquement une valeur de d égale à 6 (Mason et Kipp, 1997).

Les échantillons prélevés pour l'étude isotopique sont mis en graphique en figure 5.6. Les résultats isotopiques sont donnés pour les isotopes stables de deutérium et oxygène 18 : i) δ^2H est la différence relative en pour mille entre le rapport isotopique de 2H sur 1H dans un échantillon et le rapport dans un échantillon référencé par rapport au SMOW, calculée comme suit : $\left[\left(\left(\frac{^2H}{^1H} \right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{^2H}{^1H} \right)_{\text{standard}} \right) / \left(\frac{^2H}{^1H} \right)_{\text{standard}} \right] * 1000$; ii) $\delta^{18}O$ est la différence relative en pour mille entre le rapport isotopique de ^{18}O sur ^{16}O dans un

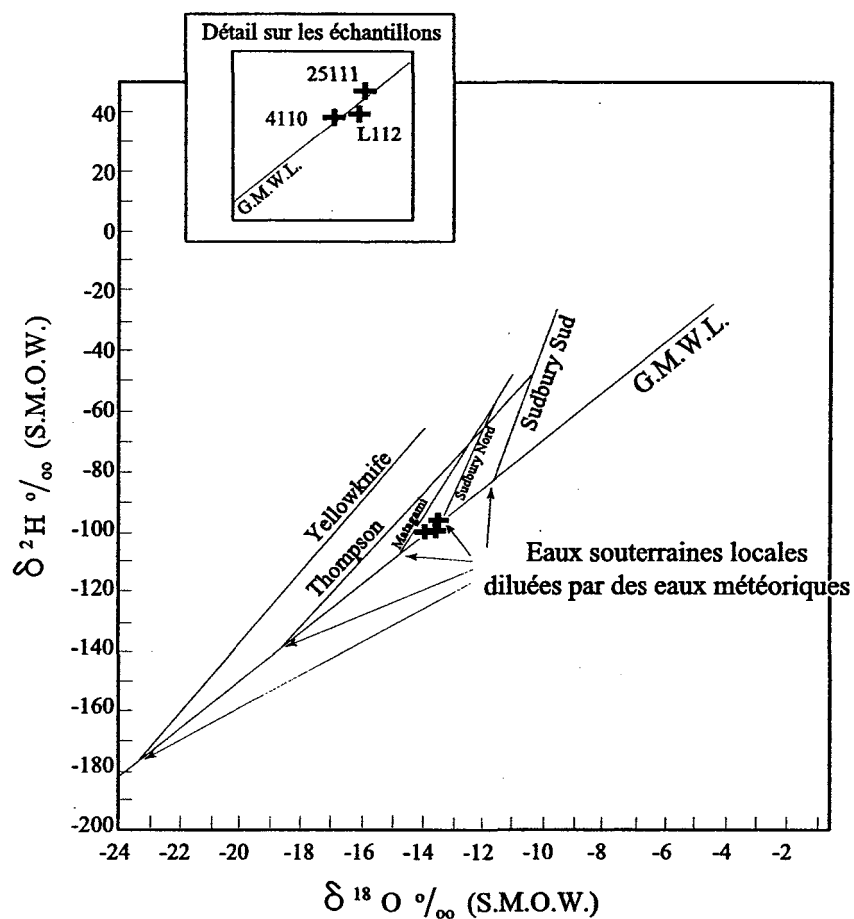


Figure 5.6 : $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (modifiée de Frapé et Fritz, 1987).

échantillon et le rapport dans un échantillon référencé par rapport au SMOW, calculée

comme suit : $\left[\left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} - \left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \right] / \left(\frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \times 1000$.

Dans notre cas, les eaux analysées ne sont pas suffisamment riches en éléments dissous pour subir un traitement de dessalinisation :

L112 0.033g/l soit 33ppm

4110 0.831g/l soit 831ppm

25111 0.604g/l soit 604ppm

5.3 Exploitation des données

5.3.1 Matrice des corrélations

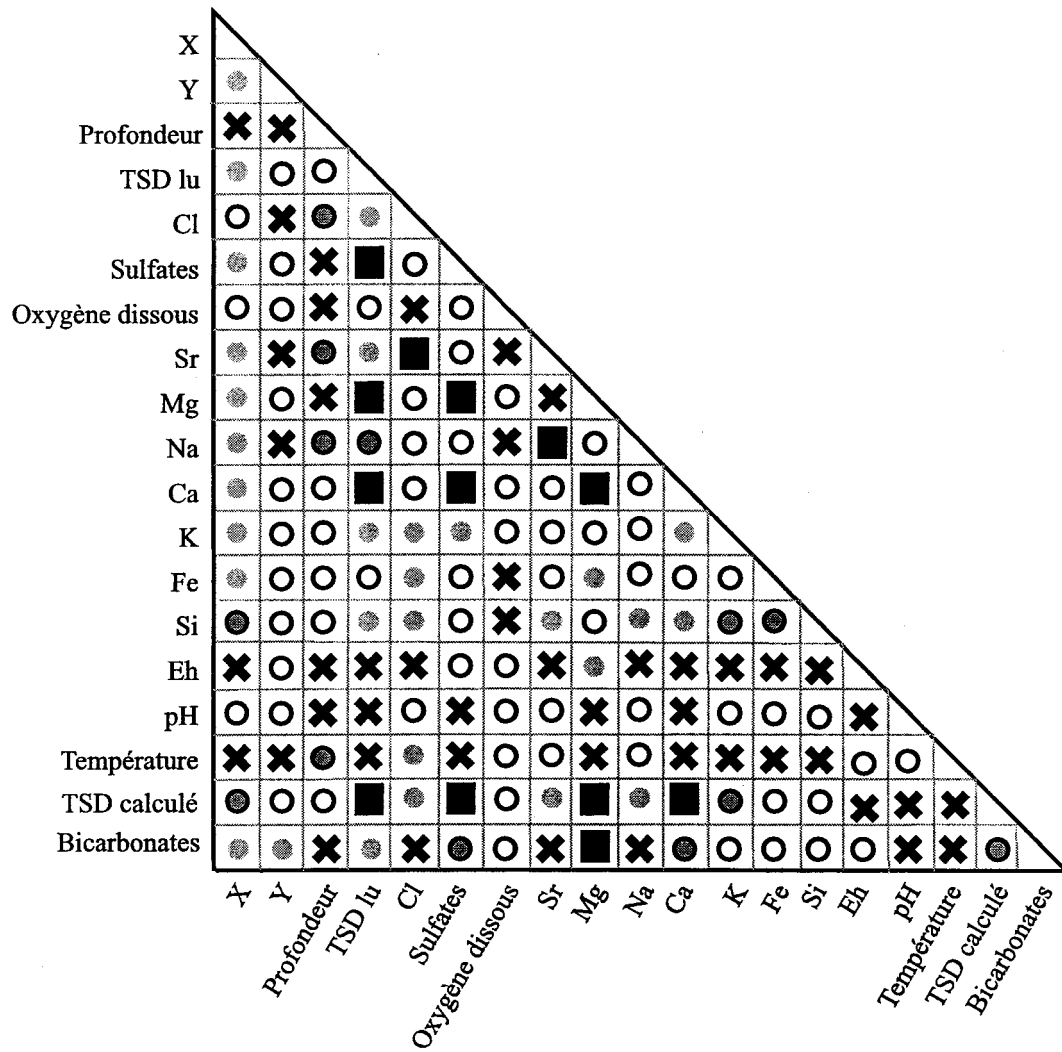
Les coefficients de corrélation de la matrice de Pearson ont été calculés par le programme WinSTAT et sont présentés en figure 5.7. Les résultats numériques sont en annexe D. Un coefficient proche de la valeur 1 indique une forte corrélation positive entre les deux paramètres considérés.

La température des eaux ainsi que le contenu en chlore, strontium et sodium montrent une forte corrélation avec la profondeur (reprise sous le sigle Z).

Le total des sels dissous ne semble pas avoir une bonne corrélation avec la profondeur mais plutôt avec des composantes majeures, telles que le calcium, les bicarbonates, les sulfates et le magnésium.

Les sulfates ont une bonne corrélation avec le TSD, le calcium et le magnésium.

Les autres corrélations intéressantes qui ressortent entre les éléments analysés sont celles du magnésium et des sulfates, du calcium et des sulfates, du calcium et du magnésium et surtout le strontium avec le chlore.



Coefficient de corrélation de Pearson

- Légende :
- ✕ négatif
 - inférieur à 0.3
 - entre 0.3 et 0.6
 - supérieur à 0.6
 - supérieur à 0.75

Figure 5.7 : Illustration de la matrice des coefficients de Pearson.

5.3.2 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper en figure 5.8 a été construit avec le programme PIPER issu du logiciel Rockware Scientific Software ; il montre la concentration relative des différents ions à partir des échantillons d'eau individuels. Les flèches tracées en surimpression sur les points d'échantillonnage interprètent les possibles évolutions des eaux lors de leur infiltration en profondeur.

Deux groupes d'eau se distinguent par rapport à leur profondeur de prélèvement. Les eaux des niveaux les moins profonds contiennent beaucoup de bicarbonates. Les eaux souterraines les plus profondes sont plus enrichies en chlore. La qualité des eaux change du type $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ via un type $\text{Ca} - \text{Na} - \text{HCO}_3 - \text{SO}_4$ vers le type $\text{Na} - \text{Ca} - \text{Cl} - \text{SO}_4$.

5.3.3 Cas du Total des Sels Dissous (TSD)

Comme précisé dans la section 5.1.2, dans l'analyse qui suit nous considérons les valeurs de TSD obtenues en additionnant les différents résultats analytiques des éléments, et non pas les valeurs du TSD lues sur le terrain avec l'appareil de mesure de conductivité électrique.

L'annexe D présente les fréquences d'apparition des valeurs de TSD sous forme d'histogrammes par classes : la courbe cumulative des pourcentages adjointe montre que près de 95% des échantillons ont une mesure de TSD inférieure à 1000 mg.l⁻¹. La moyenne est d'environ 525 mg/l avec une valeur maximale de 1264,55 mg/l.

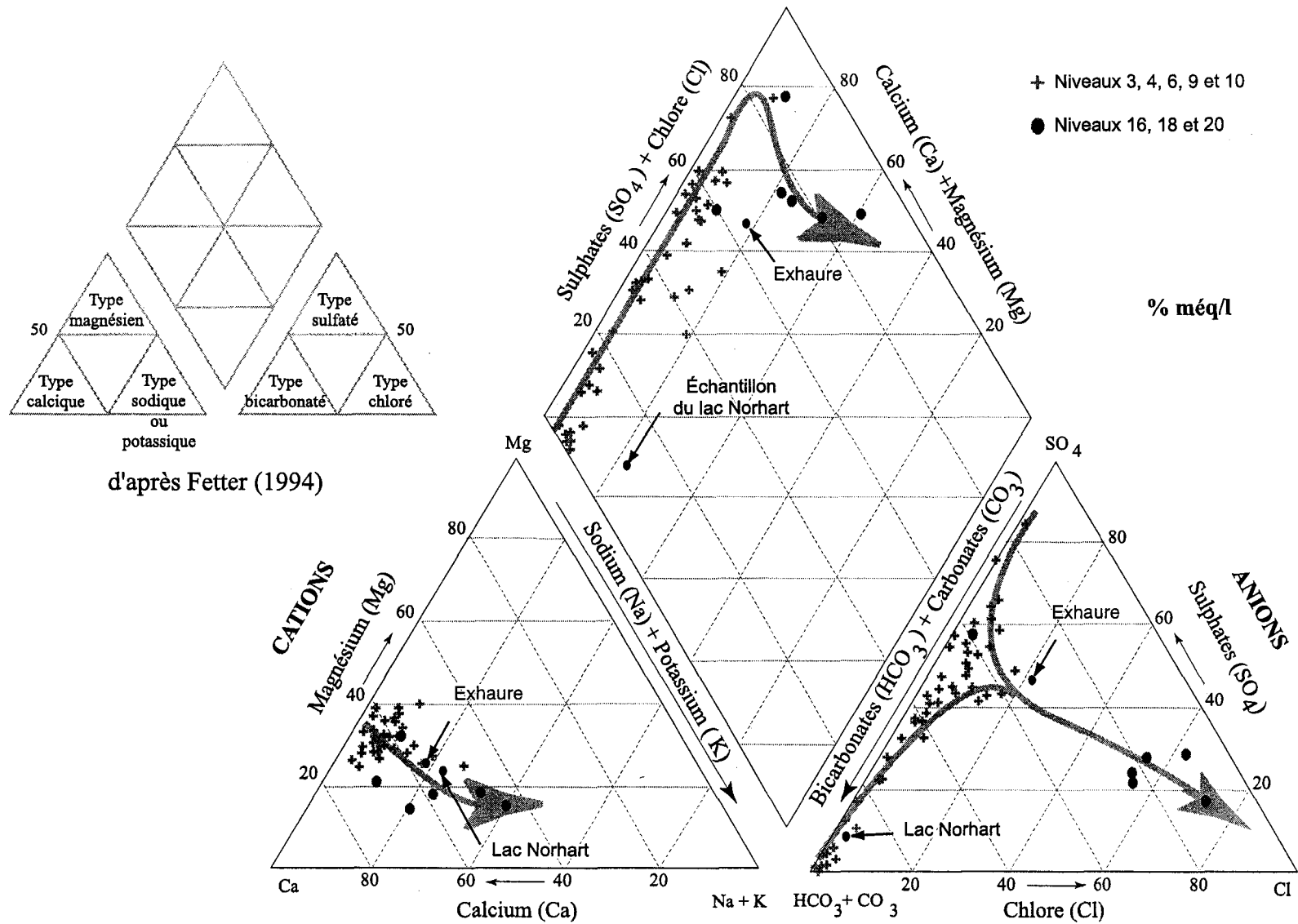


Figure 5.8 : Diagramme de Piper illustrant l'évolution des eaux souterraines en profondeur.

La distribution plurimodale de l'histogramme suggère la présence de quatre populations d'eau souterraine en fonction des valeurs croissantes du total des sels dissous.

- i) 45 échantillons se retrouvent dans l'intervalle : $94 < \text{TSD} < 496$ ppm (figure 5.9).
- ii) 19 échantillons ont une valeur de TSD entre 497 et 771 ppm (figure 5.10).
- iii) 15 échantillons constituent la gamme de valeurs suivantes : $772 < \text{TSD} < 1046$ ppm (figure 5.11).
- iv) seuls 2 échantillons ont un TSD supérieur à 1047ppm.

Pour chacune des trois premières populations d'eaux souterraines, une matrice des coefficients de Pearson est élaborée et présentée ci-après.

	Prof.	Cl	Sulfates	Sr	Oxy	Mg	Na	Ca	K	Fe	Si	TSD
Profondeur	1.00											
Cl	0.60	1.00										
Sulfates	0.37	0.55	1.00									
Sr	0.31	0.34	0.49	1.00								
Oxygène dissous	0.29	0.32	0.18	0.14	1.00							
Mg	0.16	0.14	0.81	0.39	0.03	1.00						
Na	0.56	0.81	0.45	0.59	0.27	0.14	1.00					
Ca	0.13	0.26	0.88	0.29	0.08	0.92	0.15	1.00				
K	0.23	0.24	0.23	0.31	0.44	0.07	0.39	0.01	1.00			
Fe	-0.12	-0.11	-0.21	-0.11	0.07	-0.06	-0.11	-0.06	-0.04	1.00		
Si	0.04	0.03	-0.31	0.22	0.01	-0.35	0.11	-0.47	0.32	0.31	1.00	
TSD calculé	0.30	0.45	0.96	0.44	0.13	0.90	0.36	0.96	0.16	-0.13	-0.35	1.00

TSD <496 ppm

Figure 5.9 : Matrice de corrélation de la population 1.

	Prof.	Cl	Sulfates	Sr	Oxy	Mg	Na	Ca	K	Fe	Si	TSD
Profondeur	1.00											
Cl	0.90	1.00										
Sulfates	-0.58	-0.66	1.00									
Sr	0.95	0.94	-0.55	1.00								
Oxygène dissous	-0.55	-0.56	0.45	-0.51	1.00							
Mg	-0.55	-0.52	0.91	-0.44	0.36	1.00						
Na	0.93	0.97	-0.57	0.96	-0.56	-0.46	1.00					
Ca	-0.53	-0.40	0.50	-0.40	0.41	0.67	-0.50	1.00				
K	0.18	0.34	0.13	0.35	-0.33	0.39	0.26	0.52	1.00			
Fe	0.59	0.64	-0.30	0.57	-0.61	-0.31	0.68	-0.53	0.06	1.00		
Si	0.38	0.56	-0.06	0.43	-0.49	0.04	0.55	-0.19	0.40	0.85	1.00	
TSD calculé	0.13	0.27	0.44	0.28	-0.07	0.61	0.29	0.46	0.72	0.34	0.54	1.00

497 < TSD < 771 ppm

Figure 5.10 : Matrice de corrélation de la population 2.

	Prof.	Cl	Sulfates	Sr	Oxy	Mg	Na	Ca	K	Fe	Si	TSD
Profondeur	1.00											
Cl	0.96	1.00										
Sulfates	-0.96	-0.92	1.00									
Sr	0.92	0.97	-0.85	1.00								
Oxygène dissous	-0.44	-0.36	0.52	-0.26	1.00							
Mg	-0.97	-0.93	0.97	-0.89	0.48	1.00						
Na	0.91	0.97	-0.83	0.99	-0.20	-0.87	1.00					
Ca	-0.42	-0.58	0.40	-0.62	0.11	0.44	-0.57	1.00				
K	0.42	0.20	-0.49	0.06	-0.36	-0.42	0.06	0.40	1.00			
Fe	-0.08	-0.05	-0.03	0.03	0.03	-0.03	0.00	-0.10	-0.19	1.00		
Si	0.44	0.28	-0.40	0.34	0.02	-0.43	0.31	0.09	0.34	0.25	1.00	
TSD calculé	0.68	0.80	-0.57	0.84	0.01	-0.60	0.87	-0.52	-0.18	0.04	0.12	1.00

TSD > 772 ppm

Figure 5.11 : Matrice de corrélation de la population 3.

De ces trois populations d'eau, il faut retenir quelques caractéristiques importantes :

↪ **Corrélation avec la profondeur**

Dans le premier groupe, le chlore est l'élément qui a la plus forte corrélation avec la profondeur. Le coefficient de Pearson profondeur-chlore est d'autant plus élevé que le TSD est fort.

Les corrélations entre la profondeur et Sr, Na et Cl sont d'autant plus prononcées que la valeur en éléments dissous est grande.

Pour le troisième groupe (de TSD la plus élevée), on obtient le meilleur coefficient entre la profondeur et le TSD (0.68).

↪ **Corrélation entre le chlore et le sodium**

Plus le TSD est grand, plus le coefficient de corrélation est proche de 1.

↪ **Corrélation avec le strontium**

Pour les deuxième et troisième groupes, des corrélations ressortent entre le strontium d'une part et le sodium et le TSD d'autre part.

5.3.4 Présentation des graphiques binaires

Des graphiques binaires ont été élaborés pour les paires de paramètres corrélés selon la figure 5.7. L'interprétation de ces derniers se fera dans le chapitre 6.

5.3.4.1 Le chlore comme élément conservatif

Le chlore est un traceur des eaux souterraines car il ne participe aux réactions de précipitation et dissolution que dans les environnements de saumures et ne concerne pas les

réactions d'oxydo-réduction. Les valeurs couvrent une large gamme de 1 à 440ppm. Comme l'ont montré les matrices de corrélation, les eaux souterraines appartiennent à plusieurs populations dont le facteur de contrôle de l'évolution n'est pas la profondeur, mais plutôt une certaine répartition dans l'espace que nous tenterons de cerner plus précisément lors de l'interprétation des résultats.

5.3.4.2 Relations avec le total des sels dissous

Le fait que le contenu en chlore des eaux échantillonnées augmente avec le TSD est la principale information apportée par les graphiques en figures 5.12. Deux groupes d'eaux se distinguent : un premier groupe à TSD variés et un faible contenu en chlore, un autre pour lequel le TSD augmente avec le contenu en chlore. Une tendance à l'enrichissement en chlore se dessine avec une augmentation de TSD. Les échantillons du deuxième groupe ne correspondent pas nécessairement à des échantillons d'eau localisés en profondeur dans

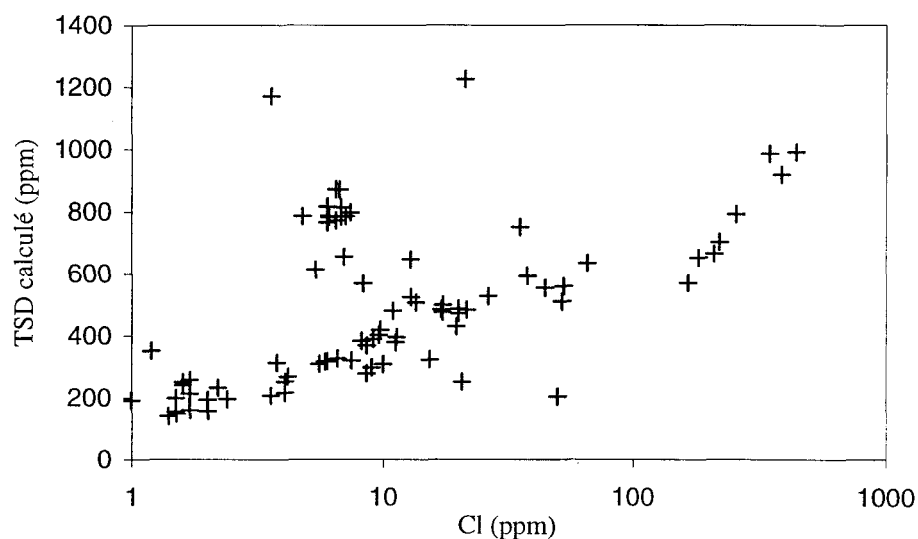


Figure 5.12A : TSD versus Cl (échelles arithmétiques).

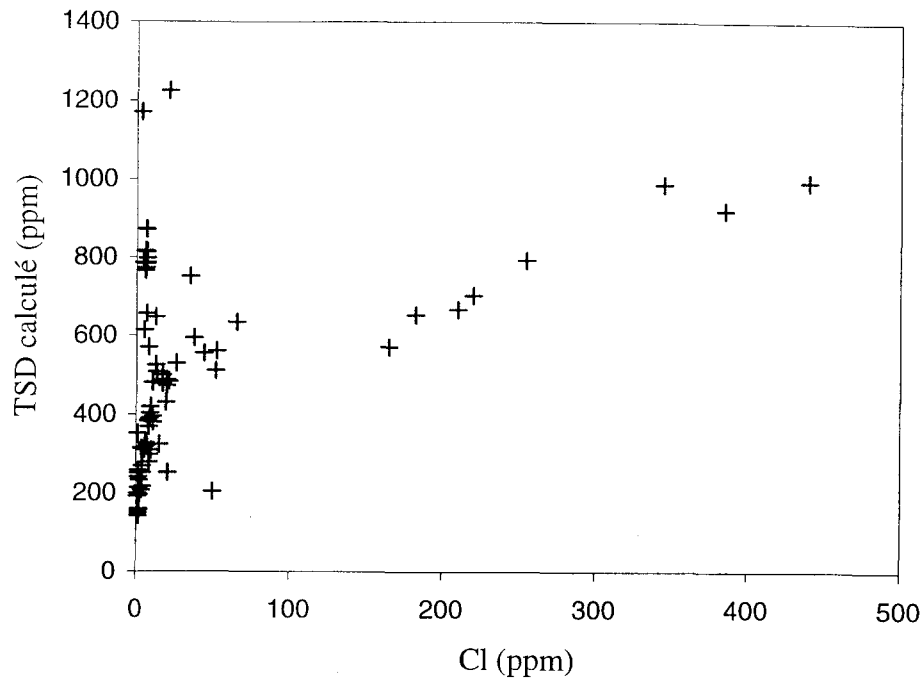


Figure 5.12B - TSD versus Cl (échelle logarithmique en abscisse).

la mine ; la majorité sont des échantillons du niveau 4 et certains des niveaux 18 et 20. Pourtant, la tendance à une augmentation de la teneur en chlore associée à celle du TSD est respectée comme caractère typique des eaux souterraines du Bouclier canadien.

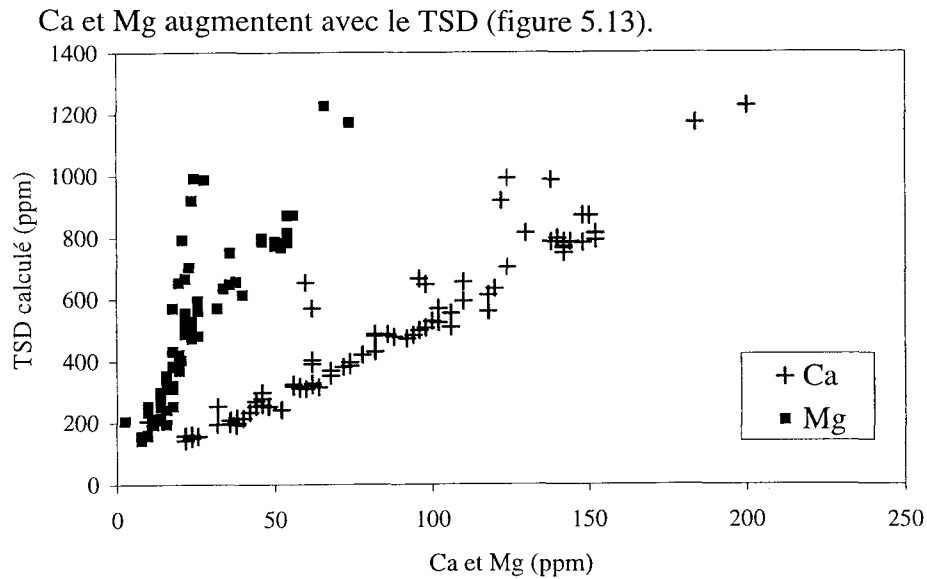


Figure 5.13 : TSD versus Ca et Mg.

5.3.4.3 Relations avec le magnésium

La linéarité entre Ca et Mg, en figure 5.14, est annoncée par le coefficient de Pearson élevé. La tendance générale se décompose en deux segments de droite de régression : la première pente est prononcée alors que la deuxième est faible. L'augmentation concomitante de Ca et Mg se fait moins rapide pour des valeurs de Ca supérieures à 100ppm et de Mg supérieures à 25ppm.

Le graphique de Mg versus Na met en évidence la relation d'exclusivité entre Na et Mg dans la partie B de la figure 5.15. Au-delà de certaines concentrations en Na et Mg, le sodium n'est présent que pour de faibles concentrations de magnésium et inversement (partie A).

5.3.4.4 Relations avec le chlore

Ca et Mg montrent une bonne corrélation (figure 5.14). De ce fait, en figure 5.16, le graphique de Ca et Mg versus Cl montre sensiblement la même chose : pour les faibles valeurs en chlore, les contenus en Ca et Mg varient beaucoup. Pour des valeurs en chlore élevées, le contenu en Mg reste à peu près constant autour de 20ppm ; la gamme de valeurs de Ca est, quant à elle, plus large variant entre 50 et 150ppm.

Le graphique sodium versus chlore en figure 5.17 est caractéristique. Il montre une tendance à un enrichissement simultané des eaux souterraines en sodium et chlore.

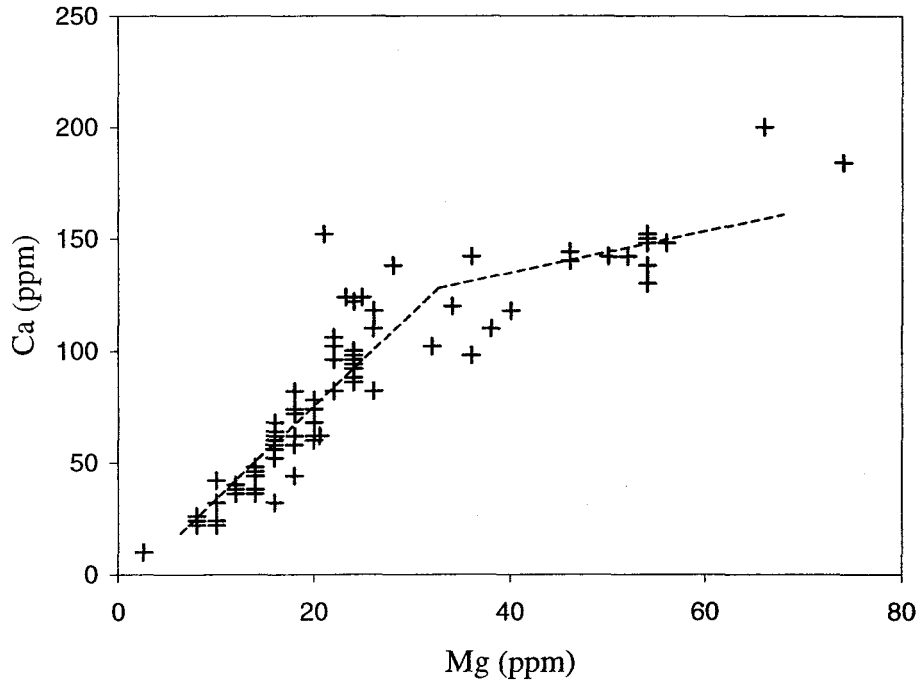


Figure 5.14 : Ca versus Mg ; deux droites de régression sont tracées.

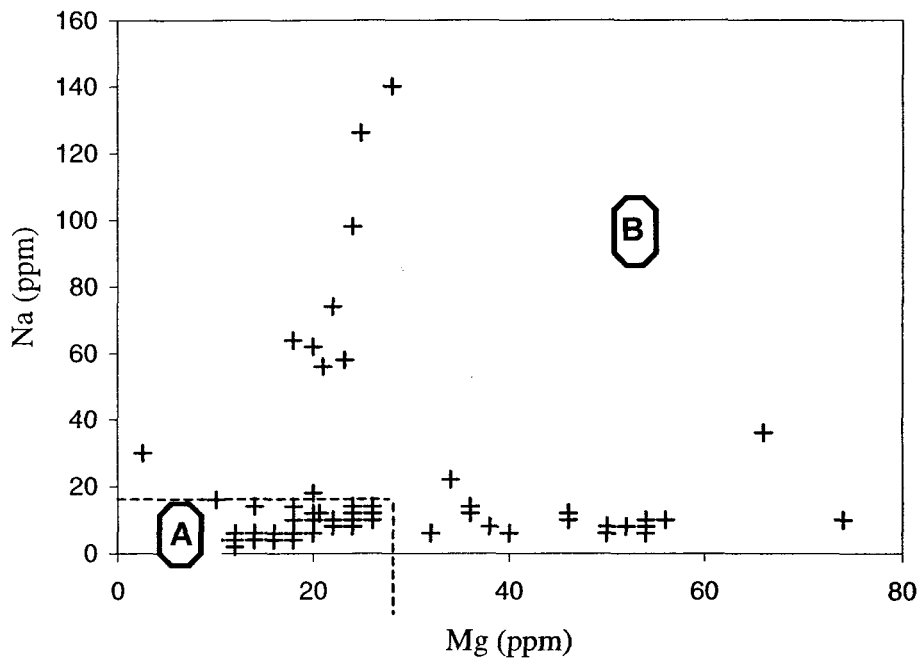


Figure 5.15 : Na versus Mg.

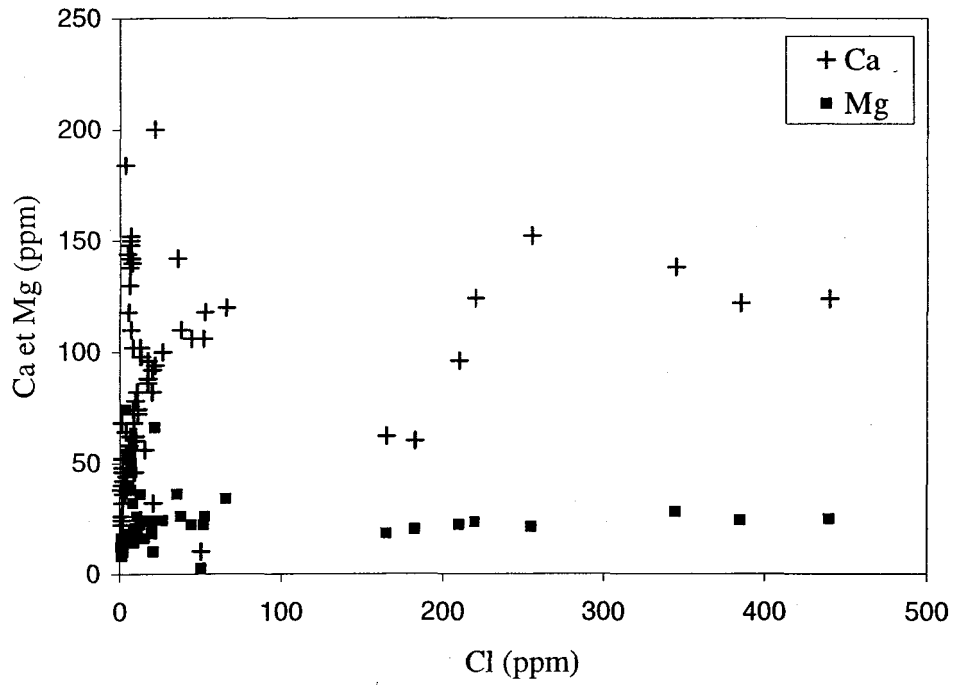


Figure 5.16 : Ca et Mg versus Cl.

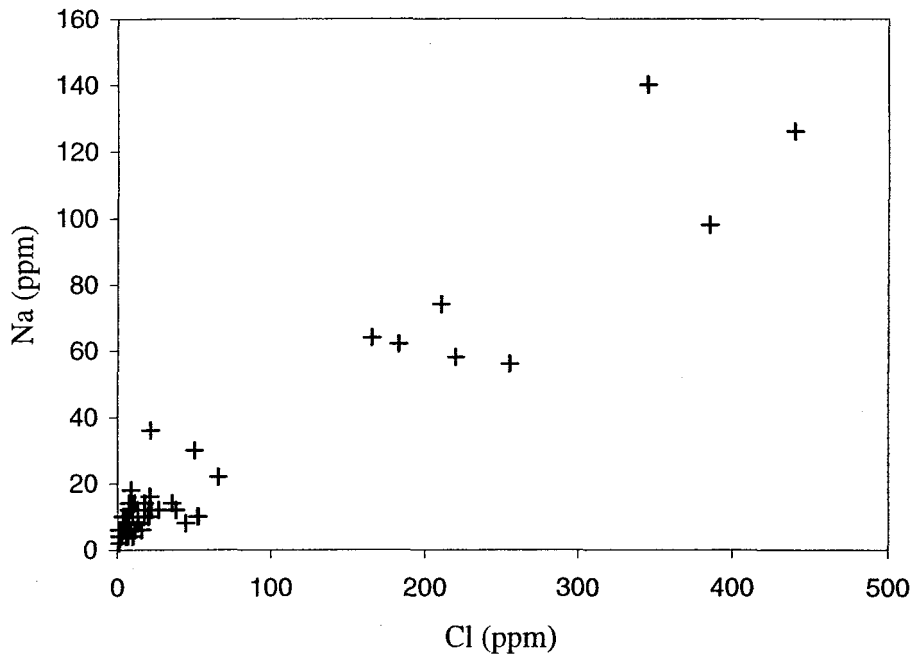
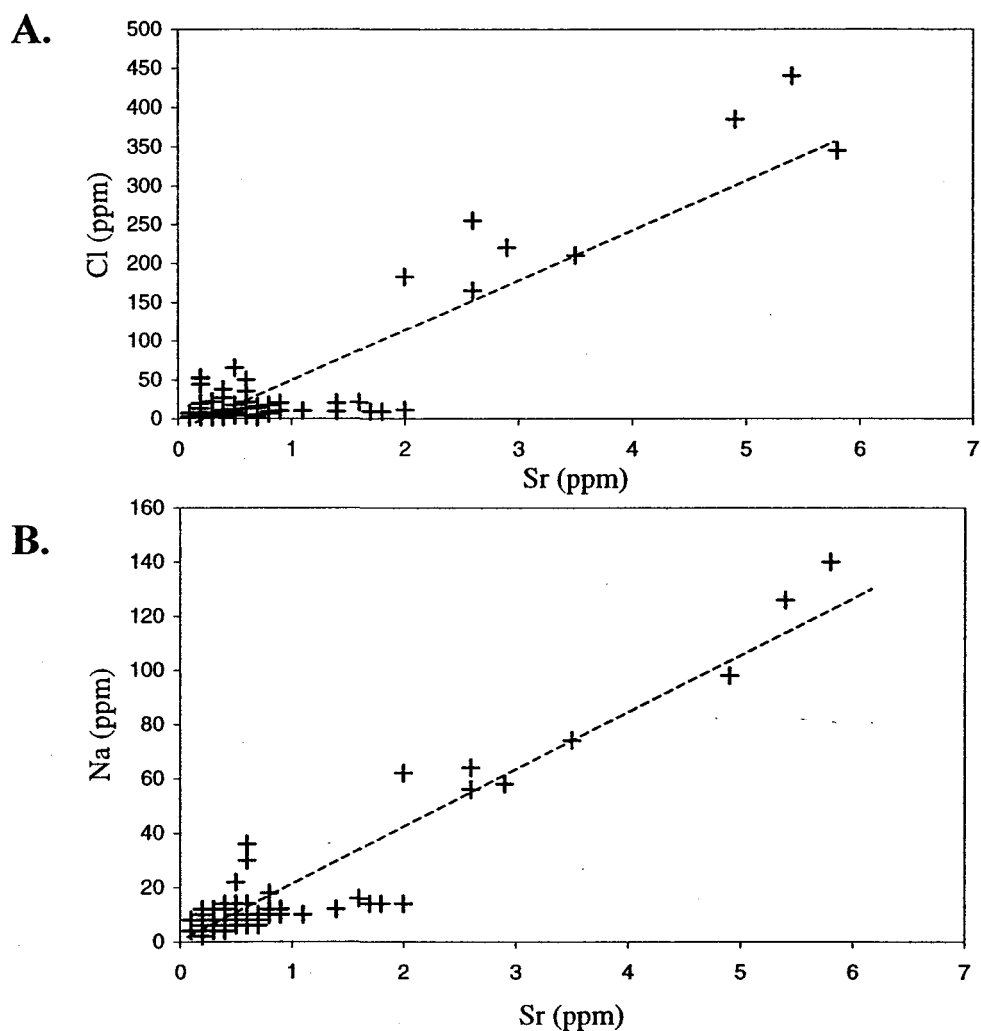


Figure 5.17 : Na versus Cl

5.3.4.5 Relations avec le strontium

L'élément strontium versus l'élément chlore (figure 5.18A) montre une tendance floue pour les valeurs les plus faibles. La relation est mieux définie pour les valeurs fortes et tend à une linéarité entre le strontium et le chlore.

Le strontium versus le sodium (figure 5.18B) tend vers une relation de linéarité.



Figures 5.18 : Corrélations avec le strontium.

A - Cl versus Sr ; B - Na versus Sr.

5.3.4.6 Relations avec les sulfates

Étant donné la bonne corrélation entre les ions magnésium et calcium dans les échantillons, le graphique de ceux-ci versus les sulfates (figure 5.19) met en valeur une tendance similaire. Les sulfates ont une bonne corrélation avec Mg et Ca.

5.3.4.7 Relations avec les bicarbonates

Le magnésium montre une évolution corrélée avec les bicarbonates à la figure 5.20A. Par contre, la présence de sodium empêche la présence de bicarbonates d'après la distribution des points sur le graphique de la figure 5.20B des bicarbonates versus le sodium.

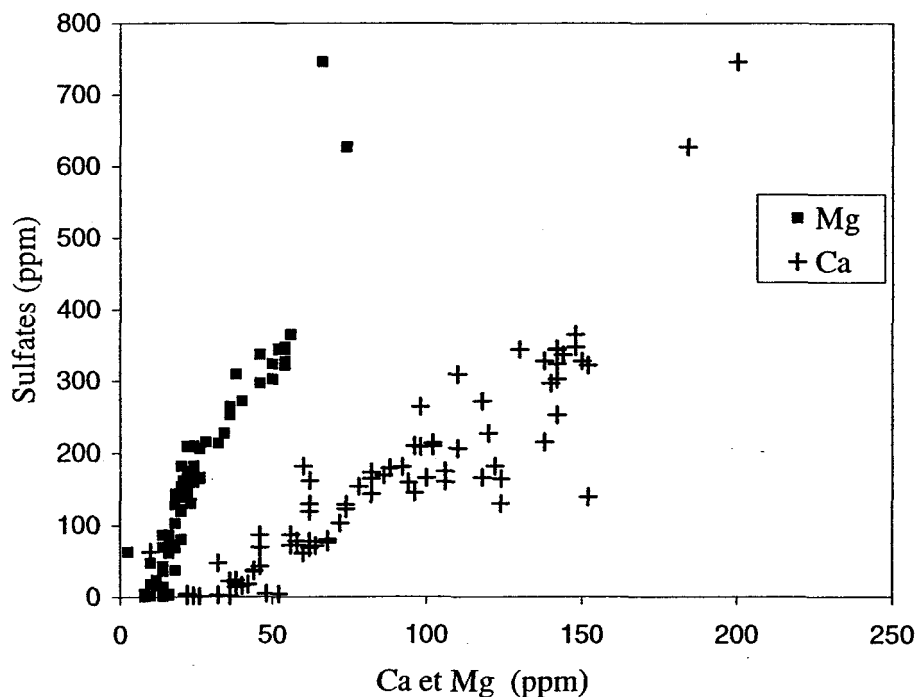


Figure 5.19 : Sulfates versus Ca et Mg.

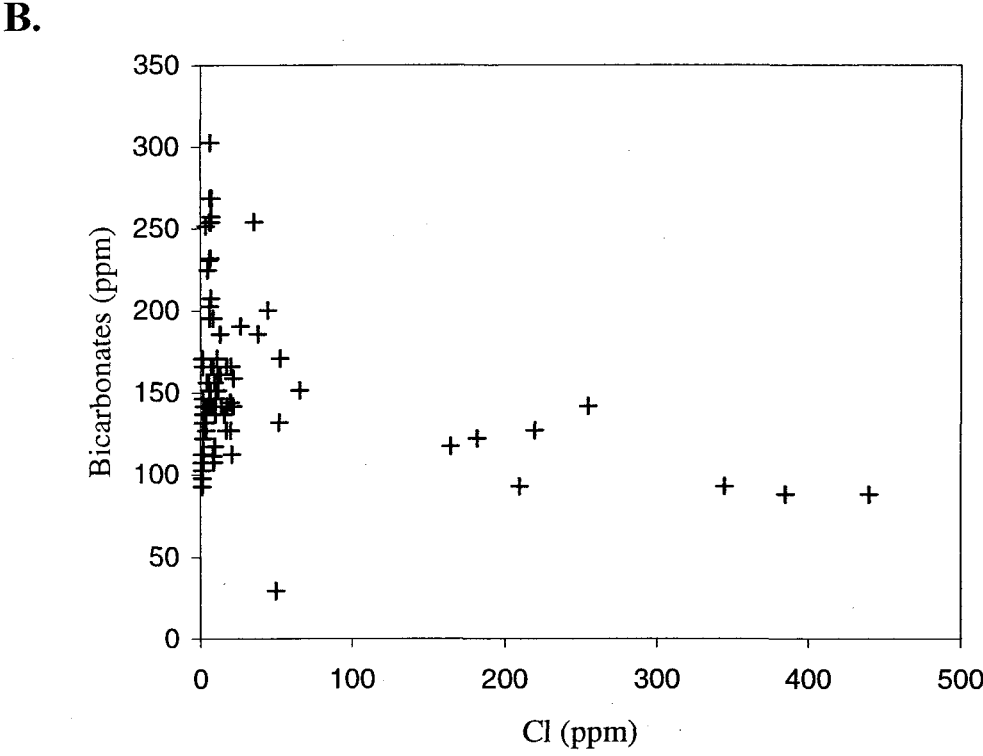
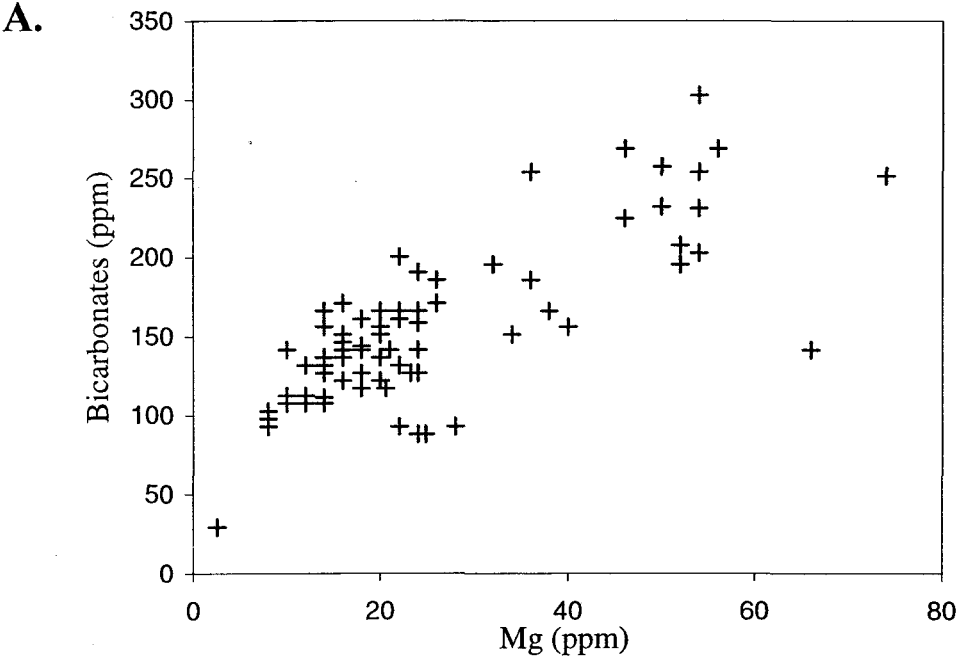


Figure 5.20 : Corrélations avec les bicarbonates.
A - Bicarbonates versus Mg ; B - Bicarbonates versus Cl.

CHAPITRE 6

Interprétation et discussion des résultats

6.1 Caractérisation globale des eaux à la mine Joe Mann

Ce chapitre synthétise les observations faites au chapitre précédent afin de définir le contexte d'écoulement des eaux souterraines à la mine Joe Mann. Les modélisations référencées dans un espace géographique ont été réalisées à l'aide du logiciel MapInfo et les diagrammes en trois dimensions avec le logiciel WinSTAT. La méthode par «voisinage de points» a été utilisée dans le logiciel MapInfo afin de produire les cartes de distribution des éléments. Cela en conséquence à la répartition aléatoire des points.

6.1.1 Identification d'un facteur de contrôle

Les eaux sont caractérisées généralement par une faible valeur du total en sels dissous avec des valeurs variant de 167 à 1265 mg.l⁻¹ (tableau 5.5). Par rapport à de telles valeurs de TSD en milieu de roche cristalline, il faut se questionner quant à l'origine de ces eaux et/ou leur évolution. En effet, les études menées précédemment sur la caractérisation des eaux souterraines dans des contextes miniers rapportent des valeurs de total des sels dissous qui, pour les eaux échantillonnées dans les zones les plus profondes, permettent de définir des saumures avec des TSD dépassant les 10 000ppm, voire 100 000ppm. Les eaux souterraines de cette étude ont des caractéristiques majeures (valeurs de TSD, concentration

en éléments majeurs) d'eaux de surface. Cependant, des tendances similaires à celles définies pour les eaux salines du Bouclier canadien (Fetter, 1994 ; Frappe et Fritz, 1987 ; Fritz, 1997 ; Fritz et Frappe, 1982 ; Gascoyne et *al.*, 1987) sont observées et sont présentées à travers les graphiques du chapitre 5. Ces caractéristiques vont être mises en valeur dans le présent chapitre au cours duquel nous tenterons d'assembler et de structurer les informations apportées par ces graphiques.

Un des enjeux majeurs a été de reconnaître le ou les facteurs critiques contrôlant l'évolution géochimique des eaux : par exemple, est-ce la profondeur ou bien la valeur en total des sels dissous ? En effet plus la valeur en TSD est élevée, plus l'eau souterraine de la mine se rapproche des eaux salines du Bouclier canadien, de par ses concentrations relatives en éléments majeurs et mineurs. Mais la répartition du TSD n'obéit pas à une distribution selon la profondeur. La figure 6.1A illustre ces propos en reliant la température des eaux échantillonnées avec la profondeur de prélèvement et la valeur en total des sels dissous. Aucune caractéristique telle que la position des échantillons en profondeur dans la mine ne peut être évoquée (figure 6.1B) ; cependant, en projection dans le plan XY, on note une très nette diminution des valeurs de TSD en se rapprochant du lac Norhart (figure 6.2). Le rôle de la zone de faille et son implication dans un phénomène plus général de dilution sera évoqué plus en avant dans ce chapitre.

Néanmoins, les eaux souterraines examinées obéissent à des distributions typiques pour les éléments chimiques en matière d'hydrogéologie dans le Bouclier canadien, lorsque

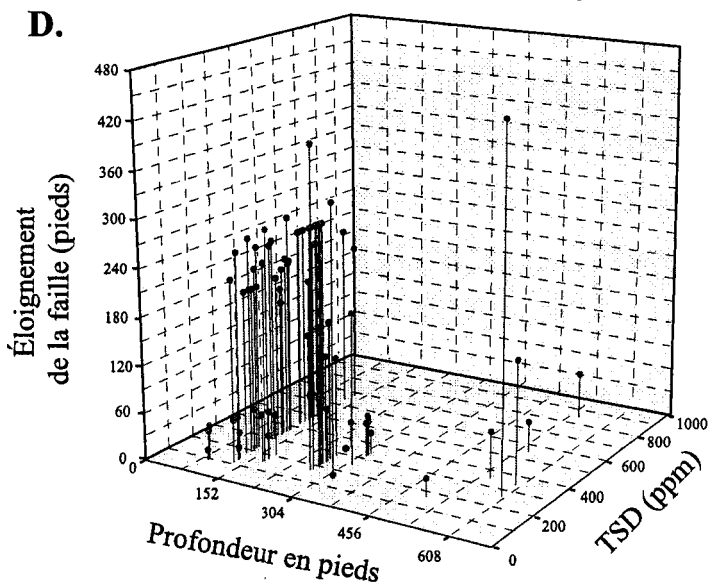
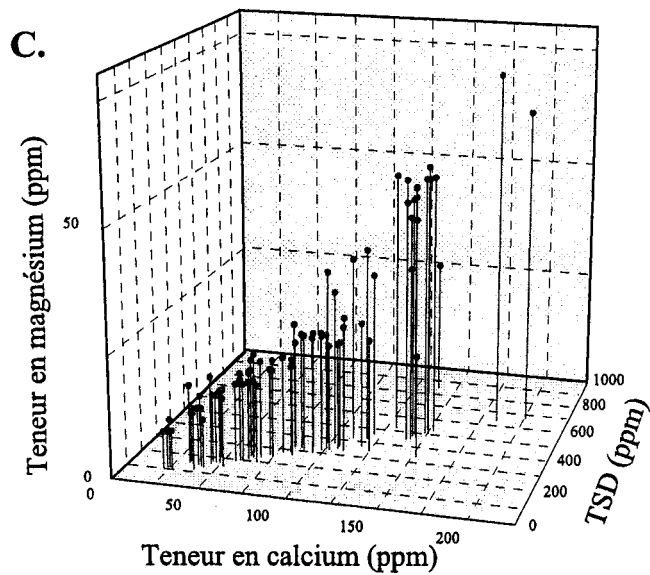
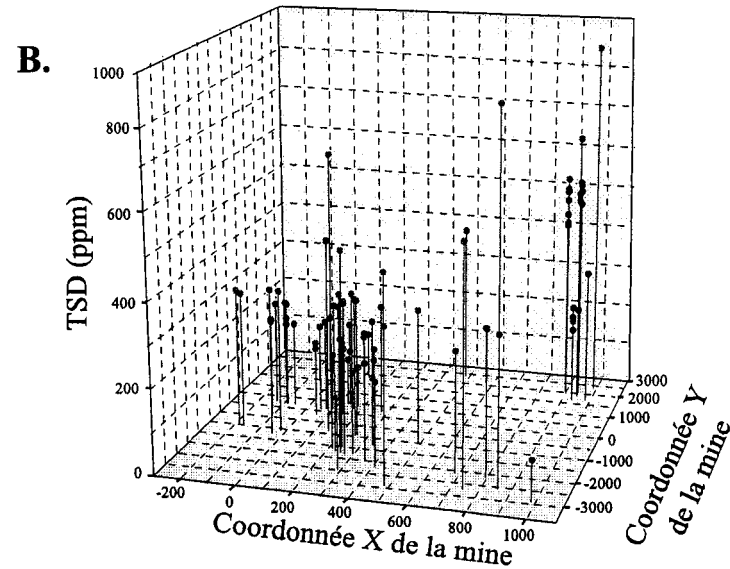
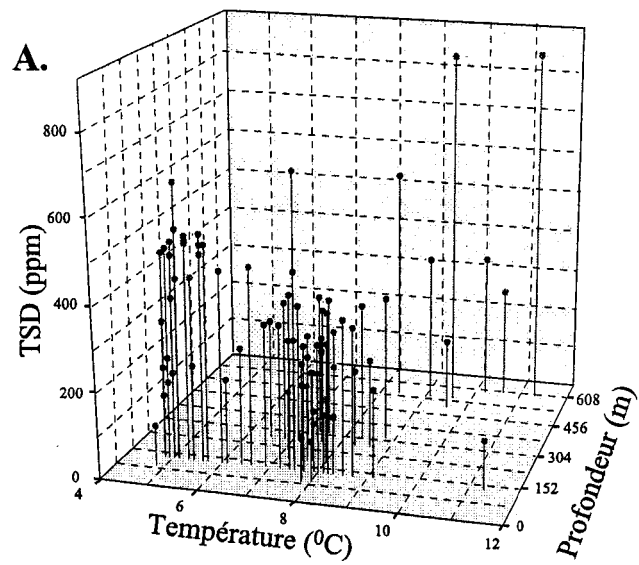
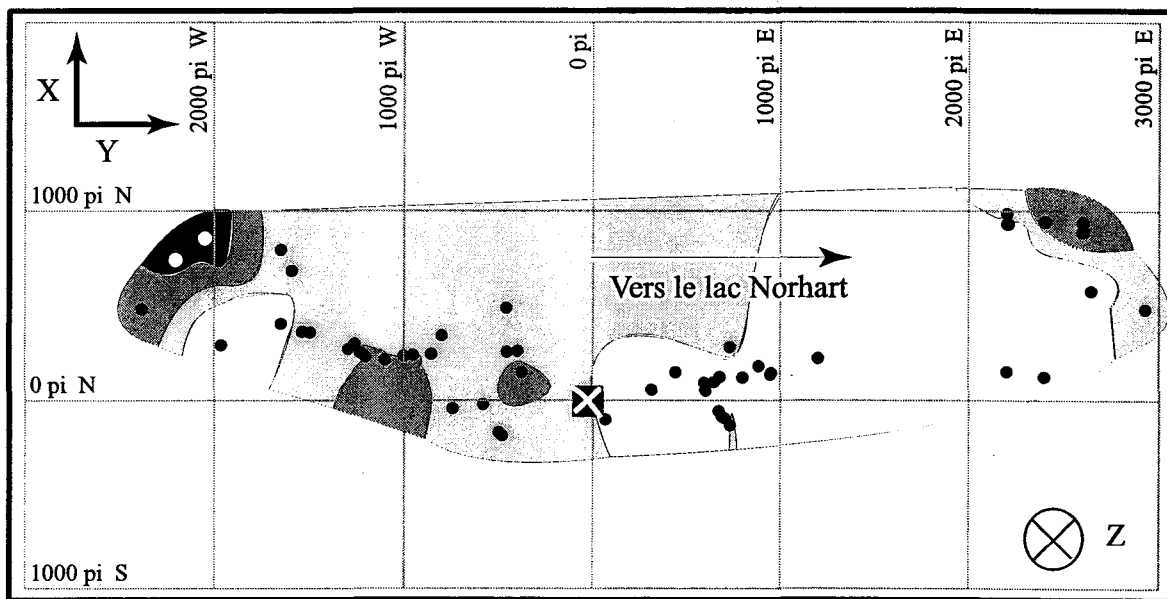
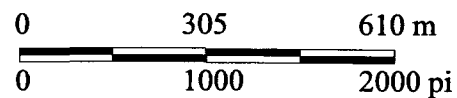







Figure 6.1 : Diagramme en trois dimensions des paramètres évolutifs caractérisant les eaux souterraines de la mine Joe Mann.



Légende



Valeurs de la teneur en solides dissous

-  de 166.5 à 440 ppm
-  de 441 à 715 ppm
-  de 716 à 990 ppm
-  de 991 à 1264 ppm
-  Position du chevalement de la mine

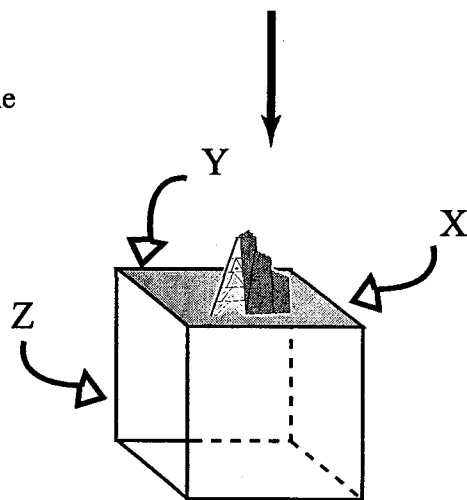


Figure 6.2 : Vue en plan XY de la distribution du TSD pour tous les échantillons indépendamment de la profondeur.

classées par rapport à leur valeur en TSD, comme cela a été montré dans le chapitre 5 (paragraphe 5.1.3.2), où les matrices de corrélations propres à chaque classe de valeurs de TSD font ressortir certaines relations entre les éléments majeurs.

6.1.2 Évolution du chimisme des eaux souterraines de la mine Joe Mann

Dans une première approche, le diagramme de Piper (figure 5.8) fournit des indications : les eaux les plus profondes se distinguent des eaux échantillonnées plus près de la surface par leurs plus grandes concentrations en chlore, en sodium et en potassium et un enrichissement en sulfates. Leurs contenus changent avec la profondeur, mais leurs concentrations en éléments dissous n'augmentent pas nécessairement.

L'importance relative de chaque élément est représenté par des histogrammes à la figure 6.3. Afin de démontrer la pertinence de la classification des eaux par classes de TSD, des calculs ont été faits à la fois par rapport au TSD (Figure 6.3A) et par rapport aux différents niveaux de prélèvement dans la mine (Figure 6.3B). Pour construire le graphique 6.3A, nous avons calculé le rapport de chacune des substances mesurées analytiquement sur le TSD ; cela a été fait pour chacune des trois populations d'eau souterraine définies dans la section 5.3.3 du chapitre 5. Dans le graphique 6.3B, les mêmes rapports sont calculés pour chaque niveau d'échantillonnage. Les tendances générales sont respectées et semblables dans les deux perspectives : par exemple, les concentrations en Cl et en Na augmentent, alors que celles en bicarbonates et Ca diminuent pour les deux types de classification.

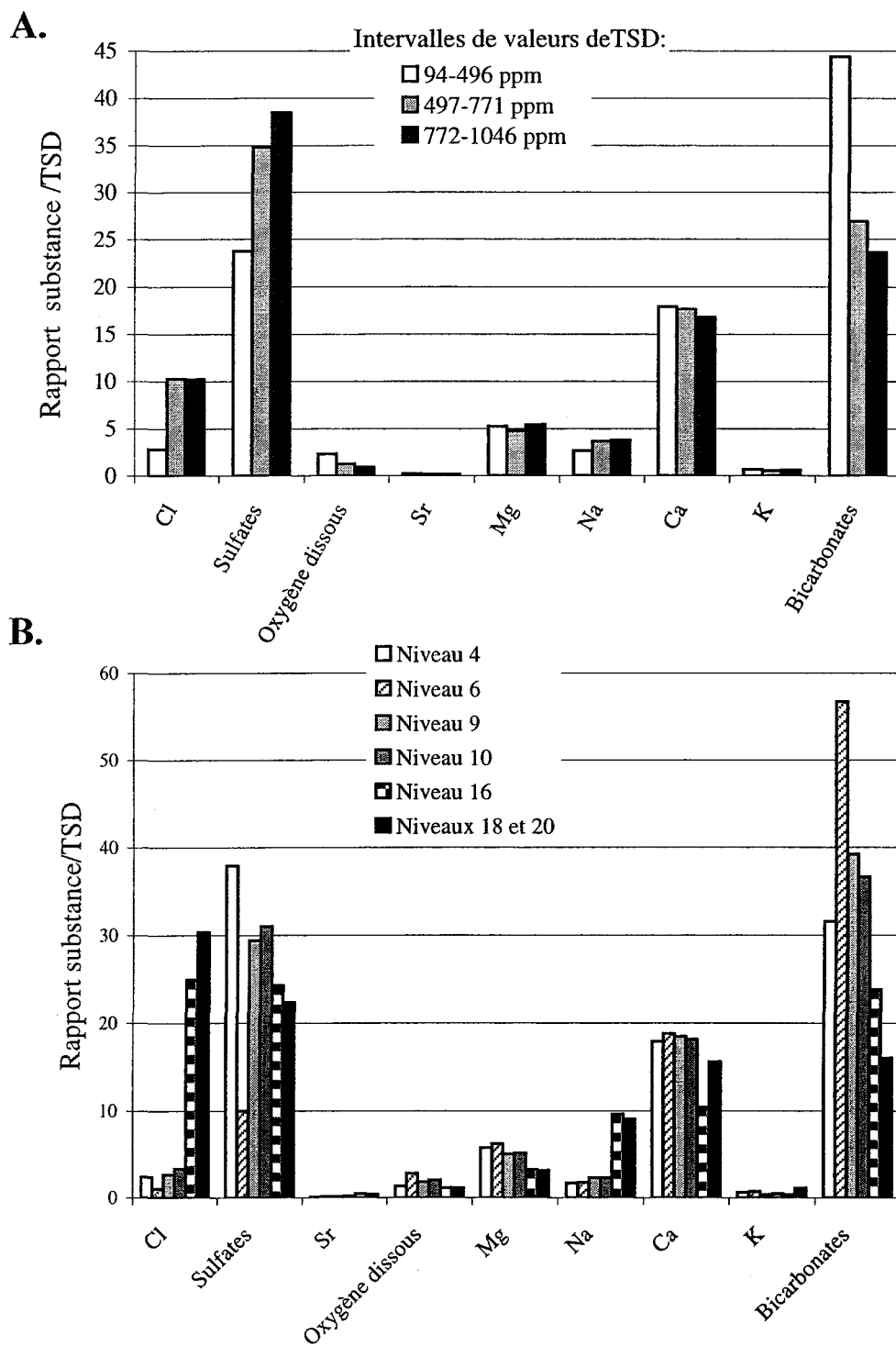


Figure 6.3 : Histogrammes du rapport des substances analysées sur le TSD.
 A - selon les classes de TSD ; B - selon la profondeur.

6.1.2.1 Contenu en Cl

Il faut préciser que le chlore ne se retrouve que très peu dans un environnement d'eaux naturelles de surface. Donc, la présence du chlore de plus en plus forte avec la profondeur (matrices de corrélation du paragraphe 5.3.1 du chapitre 5) comme indicateur d'eaux souterraines profondes démontrerait-elle en même temps que la tendance vis-à-vis des échanges minéraux est respectée (interaction eau-roche)? Dans le cas qui nous intéresse, du fait de la grande circulation d'eau, le temps de résidence des eaux dans la roche est possiblement trop court pour qu'un échange efficace ait lieu. De plus, à cause des basses températures et de la prédominance de minéraux relativement peu solubles, il est légitime de se demander si la composition chimique des eaux qui font l'objet de l'étude a pu être modifiée lors de leur percolation en profondeur à travers le massif rocheux. Donc, la concentration en chlore étaye l'hypothèse d'eaux salines diluées présentes dans la mine. La source d'un enrichissement en chlore dans des environnements de roches cristallines a été attribuée à une variété de processus géologiques incluant le relâchement à partir des amphiboles et/ou des inclusions fluides (Nordstrom et *al.*, 1989 ; Kamineni et *al.*, 1992), la dissolution d'anciens sels matriciels dans les pores de la roche (Kotzer et *al.*, 1998), un enrichissement en fonction de la perte d'eau durant une production radiolytique de deutérium dans le sous-sol (Vovk, 1987), la concentration de l'évaporation de l'eau de mer paléozoïque (Bottomley et *al.*, 1994), l'infiltration de l'eau du bassin protérozoïque (Guha et Kanwar, 1987) et l'expulsion d'un soluté pendant un cycle de gel de l'eau de mer (Bein et Arad, 1992).

Dans les paragraphes qui suivent (section 6.3.), la possible origine du chlore par rapport à la présence d'un membre formateur d'eau saline sera abordée.

6.1.2.2 Contenu en Ca et Mg

Les patrons pour le calcium et le magnésium versus le chlore et le TSD, de même que celui des sulfates en fonction du Ca et du Mg sont remarquablement similaires en ce qui concerne la tendance générale de linéarité.

Dans les eaux les moins salines, la faible concentration en Mg peut dépendre du mélange des eaux douces avec les saumures, considérant qu'il y a surtout une perte en Mg à travers la formation de minéraux secondaires, tels que la chlorite. On ne sait pas si cela intervient durant l'évolution géochimique des eaux douces ou seulement en réponse au mélange avec les saumures. Les minéraux silicatés de Mg se forment à basse température à des vitesses rapides (Frape et Fritz, 1984 ; Pearson, 1987). Le fait que le Mg ne soit pas indépendant de la concentration en TSD indique le rôle mineur de la chimie des roches environnantes sur les eaux souterraines prélevées.

La calcite est le minéral de remplissage le plus commun identifié dans les systèmes les moins profonds où prennent place des eaux fortement carbonatées. Lors de la période d'échantillonnage dans la mine, nous avons constaté la présence de calcite comme remplissage des fractures dans le toit de la galerie en de multiples endroits.

Dans les niveaux plus profonds du Bouclier canadien, il a été noté que le gypse fait son apparition. Il peut subsister des minéraux carbonatés, comme l'ankérite et la dolomite, dans le cas où les systèmes hydrothermaux sont actifs. Le gypse exerce un contrôle majeur sur la concentration en sulfates et joue un rôle important durant le mélange des eaux en maintenant le taux de Ca constant versus le TSD dans les eaux les plus diluées (Frape et Fritz, 1984 ; Pearson, 1987). Le contenu uniforme en calcium provient d'un équilibre minéral avec des minéraux secondaires comme la calcite et le gypse (Frape et Fritz, 1987).

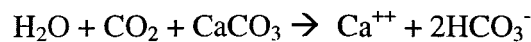
Ca et Mg ont peut-être la même origine dans le système hydrogéologique considéré puisque leur rapport reste constant et évolutif avec la concentration en TSD (Figure 6.1C) ; de plus, une inflexion de leur courbe de tendance survient à un moment donné due à une baisse de la valeur de calcium. L'ion calcique, dont la concentration diminue avec le TSD qui augmente, doit alors être remobilisé.

6.1.2.3 Contenu en Na, Sr, bicarbonates et K

La variation en Na diverge selon les concentrations des saumures et pourrait refléter des processus géochimiques, tels que l'albitisation (les plagioclases perdent du calcium remplacé par du sodium). Le strontium est lié à des réactions eau-roche : nous avons montré que sa concentration augmente avec celle du chlore et du sodium. Le strontium permet par ailleurs de caractériser le degré d'équilibre et de mélange des eaux à compositions isotopiques différentes. Son acquisition se fait à travers l'altération des feldspaths, carbonates notamment. Une confirmation avec des analyses du brome auraient

pu confirmer une tendance à des interactions eau-roche pour les eaux qui s'infiltrent dans les niveaux les plus profonds. Les mesures en brome ne donnent malheureusement pas de résultats avec la technique de l'absorption atomique, car toutes nos analyses se trouvent en dessous de la limite de détection.

La dissolution de la calcite, première étape de l'évolution chimique des eaux, contribue à l'enrichissement en calcium et bicarbonates suite à la réaction (Gascoyne, 1996) :



De plus, les bicarbonates sont relâchés lors de l'altération des plagioclases :



Enfin, les cations K^+ et Mg^{2+} sont relâchés par attaque des autres minéraux de la roche, les ions ferrique et ferreux par l'oxydation de la pyrite (Frape et Fritz, 1987 ; Gascoyne et *al.*, 1987). Or dans la présente étude, le potassium ne varie que très peu par rapport au contenu en TSD et le magnésium reste lui aussi stable avec des concentrations cependant plus fortes que pour le potassium.

6.1.3 Contribution de l'interaction eau-roche à la chimie des eaux souterraines

De façon générale, la présence des minéraux issus de l'altération est très largement dominée par les silicates secondaires, issus de l'altération des roches. Les minéraux d'altération signalés sont dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Minéraux impliqués dans l'interaction eau-roche.

Minéraux d'altération	Éléments susceptibles d'être libérés
Quartz	Relativement peu soluble
Chlorite	Fe surtout, Mg
Biotite	K, un peu de Fe
Séricite	K
Épidote	Fe, Mg, Ca
Carbonates (ankérite, calcite, dolomite)	Fe, Mg, Ca, CO ₂

Même si l'épaisseur de ces zones est peu importante (de 20 cm à 2 m au maximum), l'instabilité des sulfures étant assez grande dans les conditions de température, pH et Eh de l'environnement minier, l'altération de ces sulfures pourrait contribuer à produire des sulfates et du calcium (d'où la présence éventuelle de gypse et d'anhydrite) en plus du fer, du zinc et du plomb.

La forte teneur en sulfates dans les eaux les plus concentrées en ces éléments peut provenir d'une source inconnue qui infiltre le système hydrogéologique. Cette source d'eaux souterraines devrait alors avoir des ratios $[Mg^{+}]/[Cl^{-}]$ et $[K^{+}]/[Cl^{-}]$ respectivement inférieur et supérieur à ceux retrouvés dans les eaux souterraines du Bouclier Canadien.

Cette source serait dotée d'un taux constant en magnésium et potassium, le taux de chlore augmentant dans les deux cas (Joe Mann et Bouclier canadien). La mise en graphique des rapports K / Cl et Mg / Cl versus le TSD (figure 6.4) souligne l'apport constant des éléments potassium et magnésium avec une augmentation du TSD et du contenu en chlore (ligne en tirets). Seuls quelques échantillons dont la concentration en sels dissous est variable ne répondent pas à cette tendance.

L'examen des matrices de corrélation (figures 5.9, 5.10 et 5.11) apporte une confirmation des tendances observées sur la figure 6.4.

Pour les populations 1 et 2 (c'est-à-dire TSD < 771ppm) :

- i) une faible corrélation positive Cl-TSD (0.45 et 0.27)
une forte corrélation positive pour Mg-TSD (0.90 et 0.61)
une corrélation positive faible à forte pour K-TSD (0.16 et 0.72) d'autant plus forte que le TSD est élevé.

Pour la population 3 (TSD > 771ppm) :

- ii) une forte corrélation positive Cl-TSD (0.80)
une forte corrélation négative Mg-TSD (-0.60)
une forte corrélation négative K-TSD

L'élément chlore se corrèle d'autant plus avec le total en solides dissous que ce dernier est élevé. Par contre, plus le TSD est élevé (population 3), plus les corrélations des éléments Mg et K avec le TSD (et donc Cl) sont faibles.

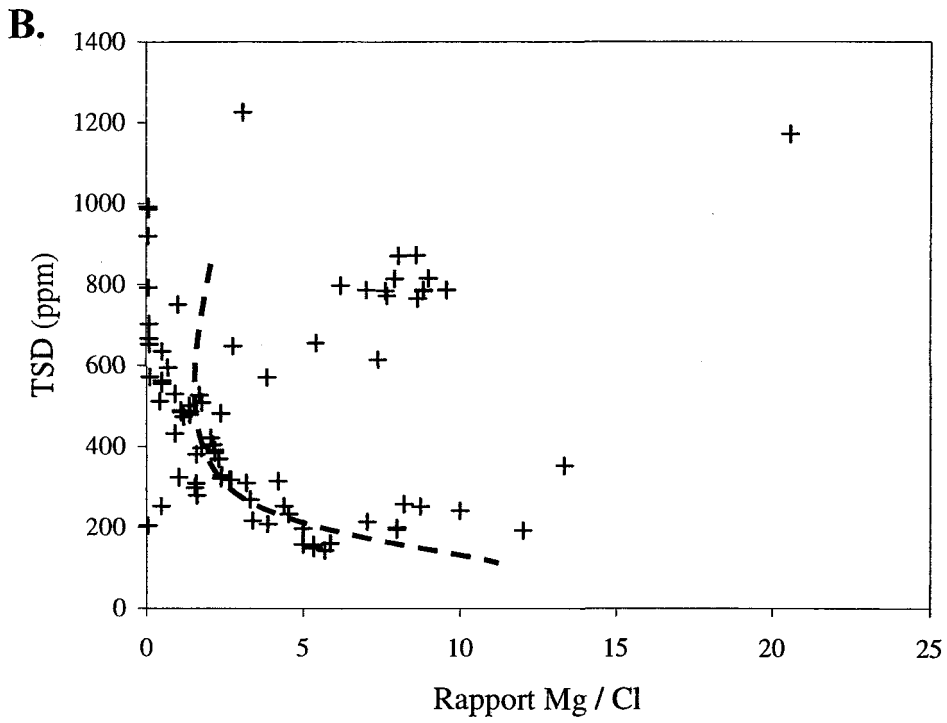
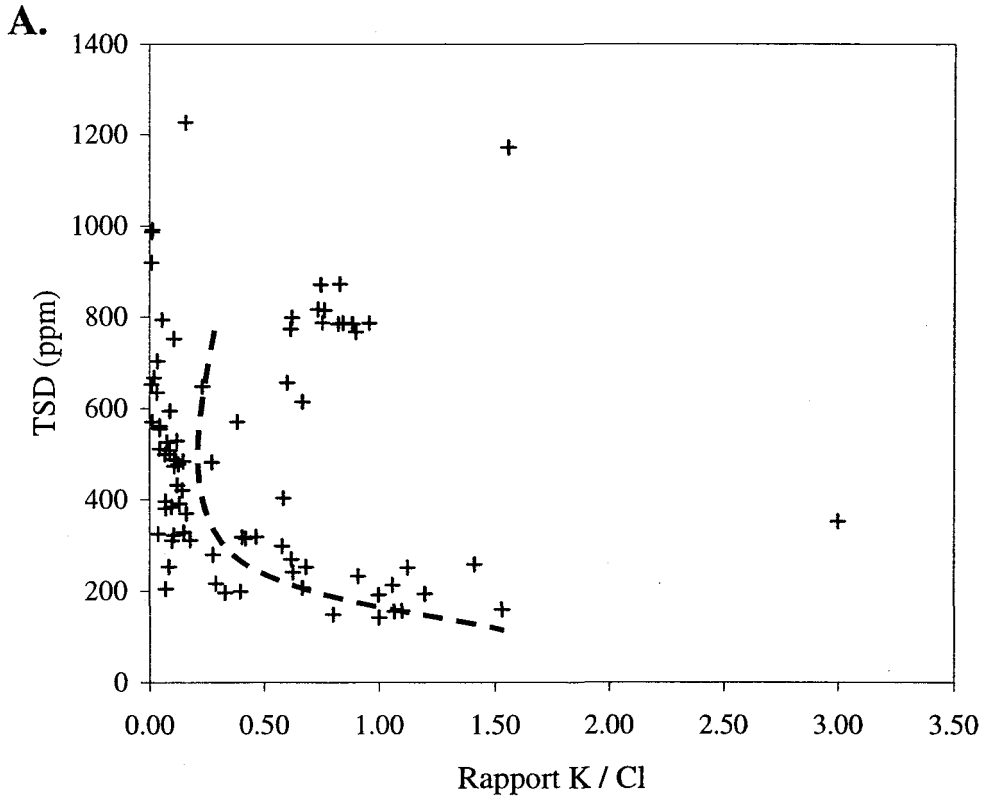


Figure 6.4 : TSD versus les rapports K/Cl et Mg/Cl.

6.2 Détermination de l'importance des paramètres hydrologiques à partir des observations hydrogéochimiques

Dans le chapitre traitant de la caractérisation de l'environnement hydrodynamique du secteur de la mine Joe Mann, la présence d'une zone faillée a été évoquée. Le plan de la zone faillée est de direction NNE, de pendage 30 degrés W. La faille affleure dans le lac Norhart, comme cela a été illustré sur la figure 4.4.

6.2.1 Relativisation du rôle de la «faille d'eau» dans le phénomène de dilution

Dans la présente étude, il a d'abord été envisagé que les eaux analysées résultent d'une dilution qui se traduirait par le mélange d'une eau concentrée en éléments dissous, de type saumure circulant en profondeur, avec une eau météorique amenée par l'infiltration. L'eau échantillonnée en profondeur a pu subir des influences récentes de la surface car les mouvements verticaux sont favorisés par le biais des fractures omniprésentes dans le roc. Le même phénomène se produit dans le Bouclier canadien, où la circulation de l'eau souterraine est consécutive à l'existence de discontinuités secondaires (fissures, fractures, joints et failles) (Schwartz et *al.* 1982 ; Rouleau, 1988).

Nous nous sommes intéressés à la position spatiale des échantillons dans la mine à chaque niveau. Une hypothèse est avancée et illustrée à la figure 6.5 : les échantillons situés «sous» le plan de la zone faillée pourraient être grandement affectés par la dilution avec les eaux de surface. Ces échantillons pourraient provenir de trous de forage qui

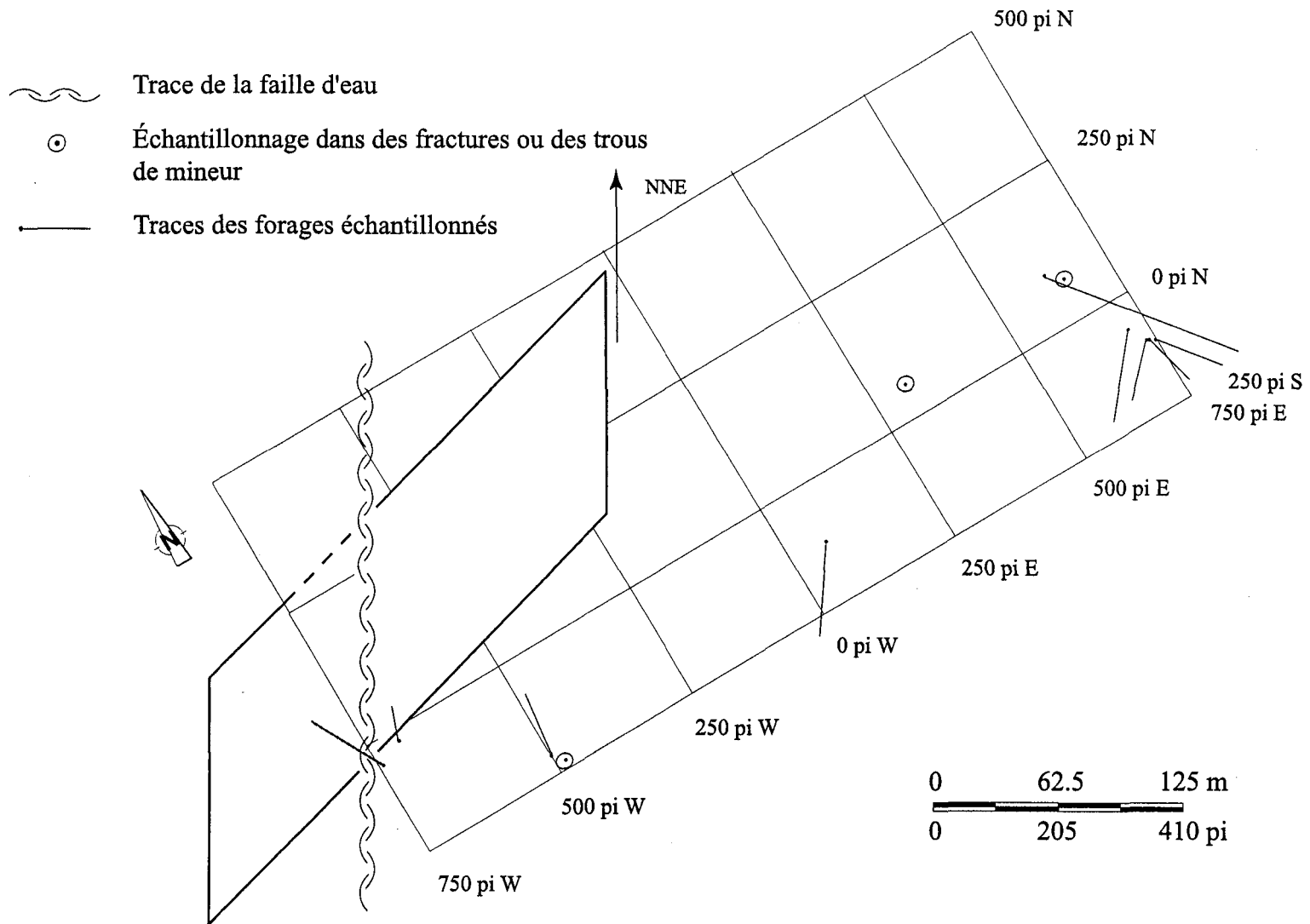


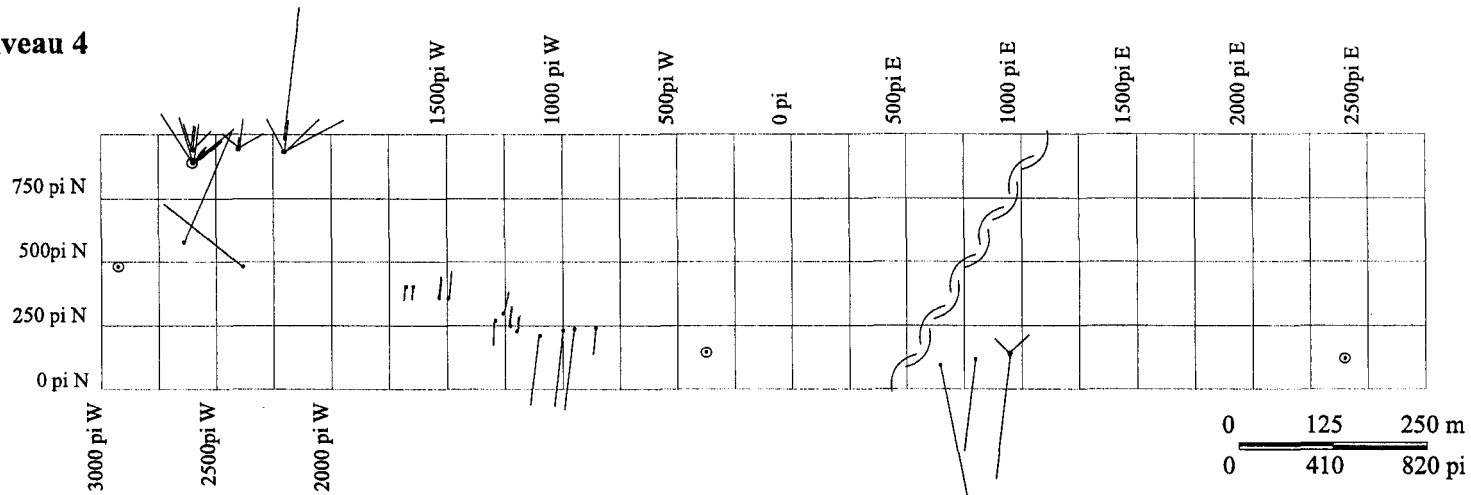
Figure 6.5 :Modélisation du plan de faille au niveau 9 avec la trace des forages.

intersectent le plan de la zone faillée, servant alors de «conduite» d'eau pour l'infiltration des eaux de surface.

Une schématisation des points d'échantillonnage du niveau 9 (figure 6.6) montre que la plupart des échantillons d'eaux ont effectivement été prélevés «sous» le plan de la zone faillée. Toutefois, la longueur de chacun des forages, d'où provient l'eau, est minime par rapport à la distance au plan de la zone faillée ; en clair, ces forages n'interceptent pas le plan de la zone de faillée. Le même type de schématisation pour le niveau 4 montre que la majorité des eaux proviennent de trous de forages «au dessus» du plan de la zone faillée. Mais ces eaux prélevées au-dessus de la zone faillée ne sont pas plus concentrées que les eaux provenant de trous en dessous de cette même zone de faille. Aucune tendance ne se dessine par rapport à un éloignement du plan de la zone faillée.

Selon une autre hypothèse quant au contrôle préférentiel de la zone de faille sur l'infiltration des eaux de surface, nous nous sommes intéressés à la position des points d'échantillonnage sur chaque niveau par rapport au tracé de la faille. Pour chaque échantillon, nous avons calculé la distance horizontale (en mètres) qui le sépare le long d'une droite orthogonale à la trace de la faille sur chaque niveau et cette distance est reprise sous le nom d'«éloignement de la faille» sur la figure 6.1D. Aucune tendance entre les trois paramètres (profondeur, facteur d'éloignement et TSD) n'apparaît franchement.

Niveau 4



○ Trous de mineur (moins de 10 mètres)
et prélèvements dans des fractures.

— Traces des forages

~ Faïlle d'eau

Niveau 9

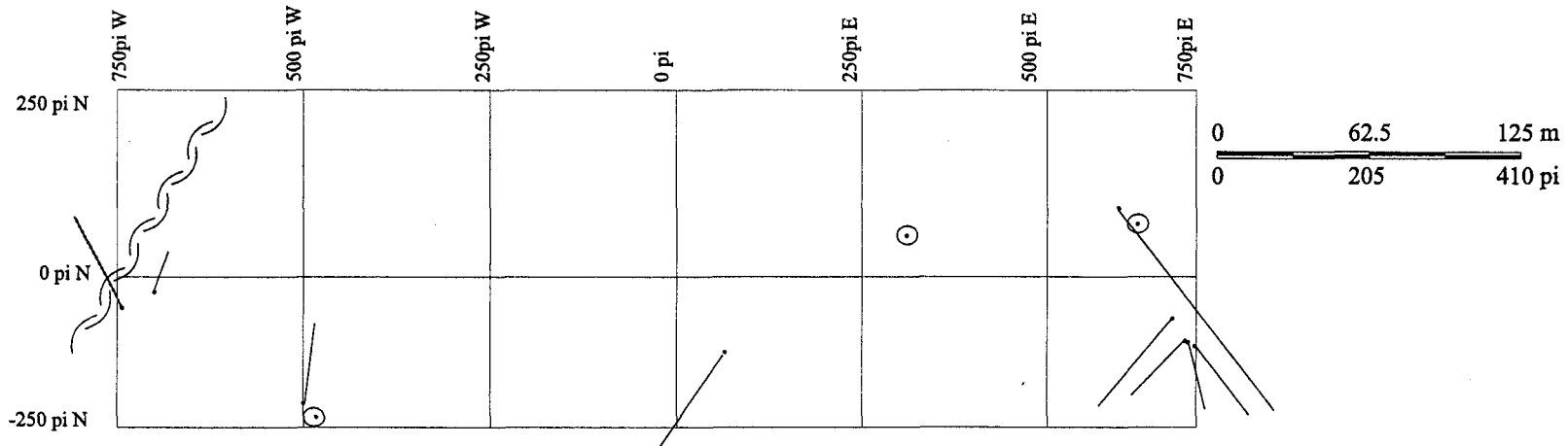


Figure 6.6 : Modélisation des traces de forages aux niveaux 4 et 9.

Les graphiques montrant l'éloignement de la faille versus le TSD (figure 6.7A) et le chlore (figure 6.7B) pour les échantillons du niveau 4, confirment les théories qui viennent d'être avancées : l'augmentation du TSD n'est pas en relation directe avec un éloignement de la zone faillée. De la même façon, la présence d'un fort contenu en chlore ne se manifeste pas nécessairement proche de la zone faillée qui n'est donc pas la seule zone d'infiltration des eaux météoriques. Des symboles différents pour les points à l'est «sous» le plan de la zone faillée et ceux à l'ouest «au-dessus» de la zone faillée apparaissent sur les figures 6.7. Nous voulons démontrer que la position par rapport au plan de la zone faillée ne détermine pas des caractéristiques différentes pour les eaux. Les mêmes conclusions ressortent des graphiques des figures 6.8A et 6.8B où figurent les échantillons de trois niveaux recoupés par la zone faillée.

L'augmentation de la salinité peut correspondre à l'acquisition croissante d'éléments chimiques en profondeur. Dans notre cas, cette augmentation serait plutôt due à la diminution de l'effet de la dilution vers les niveaux les plus profonds de la mine : les concentrations originelles des eaux souterraines en profondeur pourraient alors apparaître.

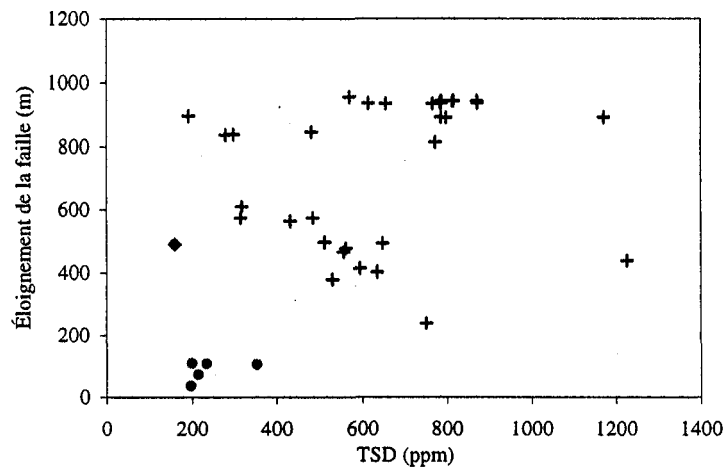


Figure 6.7A : Eloignement de la faille versus TSD au niveau 4.

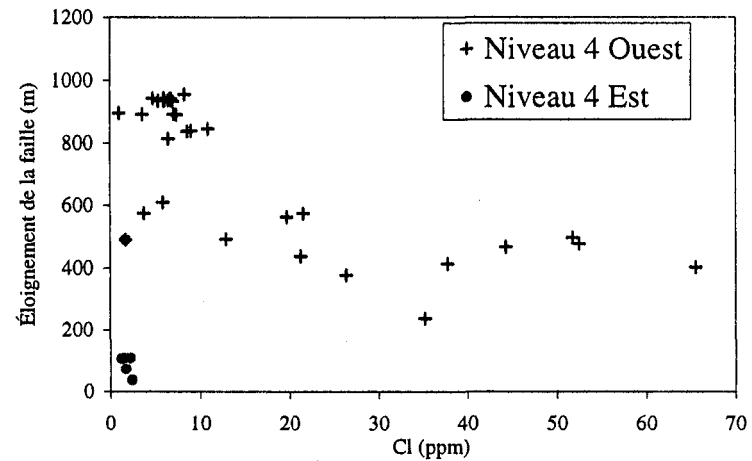


Figure 6.7B : Eloignement de la faille versus Cl au niveau 4.

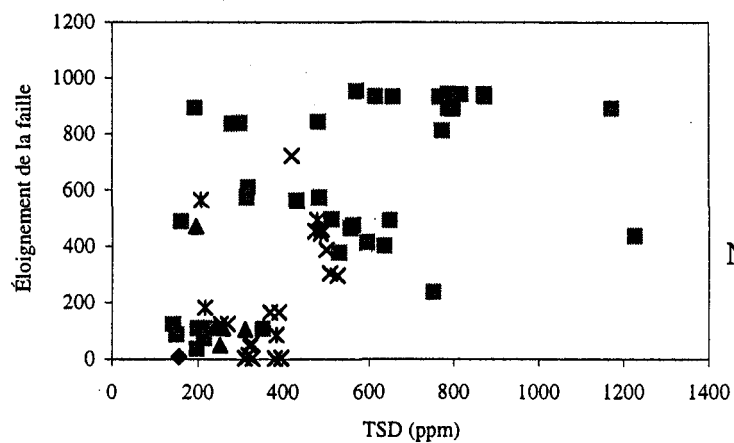


Figure 6.8A : Eloignement de la faille versus TSD sur plusieurs niveaux.

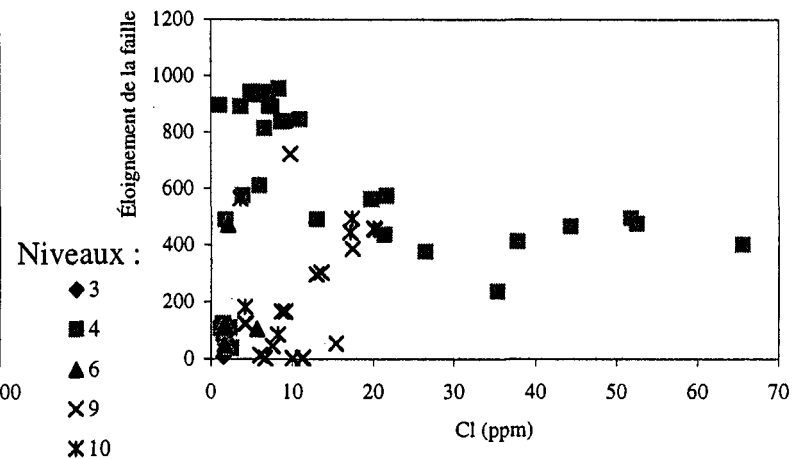


Figure 6.8B : Eloignement de la faille versus Cl sur plusieurs niveaux.

6.2.2 Caractéristiques des trous de forages

La convention propre à la mine définit les forages à plongée positive comme des forages ascendants.

Les figures 6.9 et 6.10 donnent des statistiques concernant les trous de forage échantillonnés. L'eau provient principalement de forages exécutés dans le toit des galeries (à plongée positive, dirigés vers le haut) : dans ces forages, nous avons donc prélevé de

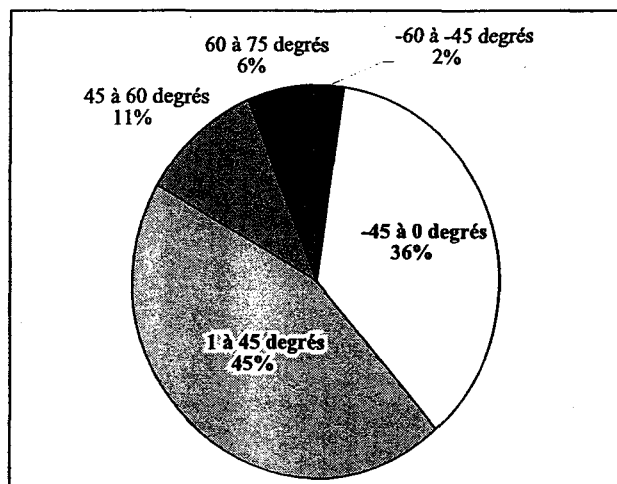


Figure 6.9 : Distribution des plongées des trous de forage.

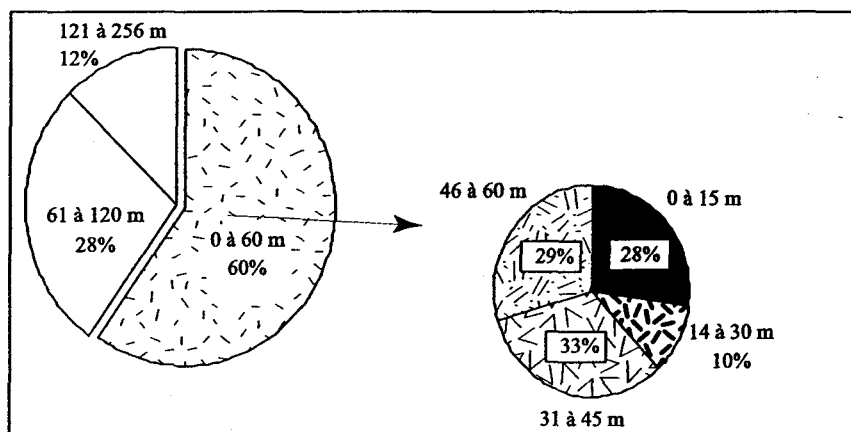


Figure 6.10 : Distribution des longueurs des trous de forage.

l'eau s'écoulant vers le bas à travers le massif rocheux («a contrario» des saumures qui remonteraient dans des forages à plongée négative). La majorité des forages (environ 71%) ont une plongée positive ou négative inférieure à 45° : ils ne peuvent donc pas intercepter le plan de la «faille d'eau», puisque leur longueur dépasse rarement 70 mètres. Ce sont des forages de définition des zones minéralisées qui n'atteignent pas le plan de la zone faillée. Cette faible moyenne de longueur fait aussi en sorte qu'aucun de ceux qui sont à l'est du plan de la zone faillée, à plongée positive, ne peut intercepter ce plan de faille.

6.2.3 Éléments de conclusion sur la dilution

Il faut donc en déduire que la dilution a lieu à l'échelle du massif rocheux de la mine Joe Mann. La zone de faille majeure (la «faille d'eau») n'est pas la seule structure ayant contrôlé le phénomène. Les entrées d'eau de recharge plus diluée masque les effets d'une augmentation en sels dissous avec la profondeur.

6.3 Paléohydrogéologie

6.3.1 Isotopie

Les résultats mis sur le diagramme $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ donnent des échantillons des niveaux 450 et 2500 sur la droite GMWL (figure 5.6). L'échantillon issu du lac Norhart se retrouve légèrement en dessous de la ligne d'eau globale météorique.

Le graphique de $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ montre des eaux peu profondes proches de la ligne globale d'eau météorique et donc un contenu isotopique défini par des conditions climatiques locales ; les eaux de surface peuvent se retrouver en dessous ou sur cette ligne du fait de l'évaporation ; les saumures et les eaux salines seraient par définition au-dessus de cette ligne ; elles sont soit enrichies en ^2H ou appauvries en ^{18}O par rapport aux eaux météoriques actuelles (Bottomley et *al.*, 1994).

Le fait que les deux échantillons d'eaux souterraines (4110 et 25111) soient sur la GMWL n'est pas accidentel. Dans d'autres sites, une ligne de dilution est tracée montrant que la saumure diluée s'enrichit en $\delta^{18}\text{O}$ et s'appauvrit en $\delta^2\text{H}$ à tel point que la ligne de dilution atteigne la GMWL (Fritz et Frapè, 1982, Frapè et Fritz, 1987). Nous pouvons évoquer que les échantillons de la mine Joe Mann représentent un cas de dilution extrême des eaux salines, voire des saumures du Bouclier canadien, par de l'eau météorique, mais rien ne permet d'étayer cette hypothèse avec certitude. L'eau du lac Norhart se positionne en dessous de la GMWL comme une eau de surface sujette à de l'évaporation.

La figure 5.6 montre aussi la position de plusieurs eaux souterraines échantillonnées dans le Bouclier canadien. Les lignes de régression sont dessinées afin de déterminer la possible composition isotopique de la source originelle commune à ces eaux salines. Dans notre cas, nous disposons que de deux échantillons d'eaux souterraines ce qui ne nous permet pas de dégager une tendance.

Normalement, les eaux souterraines dans les roches cristallines ne sont pas affectées par les processus d'évaporation ou d'interaction eau-roche et l'expérience montre que la composition isotopique des eaux souterraines peu profondes ($\pm 2\text{‰}$ pour $\delta^{18}\text{O}$) reflète la composition isotopique moyenne annuelle pondérée des précipitations dans la zone de recharge (Gascoyne et Kotzer, 1995).

6.3.2 Modélisation

Il est indéniable que le régime d'écoulement des eaux souterraines a été changé à cause du pompage lié à l'activité minière. De plus, l'écoulement en général dans le massif rocheux est favorisé par un réseau de fractures. Tenant compte de ces assertions, un scénario va être établi.

Avant l'ouverture de la mine Joe Mann, le contexte hydrodynamique devait être celui présenté en figure 6.11. La zone de faille est une voie de décharge pour les eaux salines, ou même les saumures, qui remontent le long de cette voie de plus forte

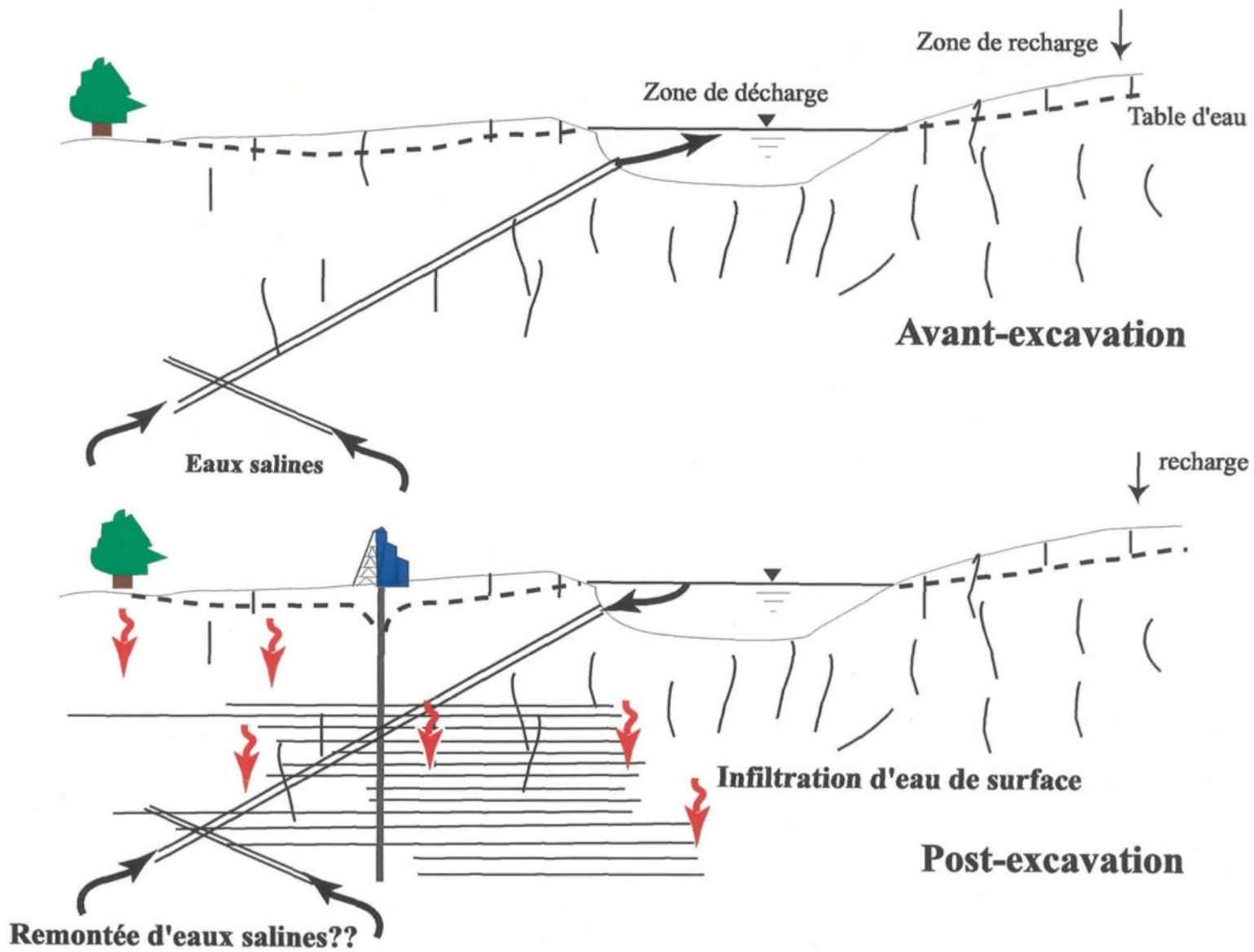


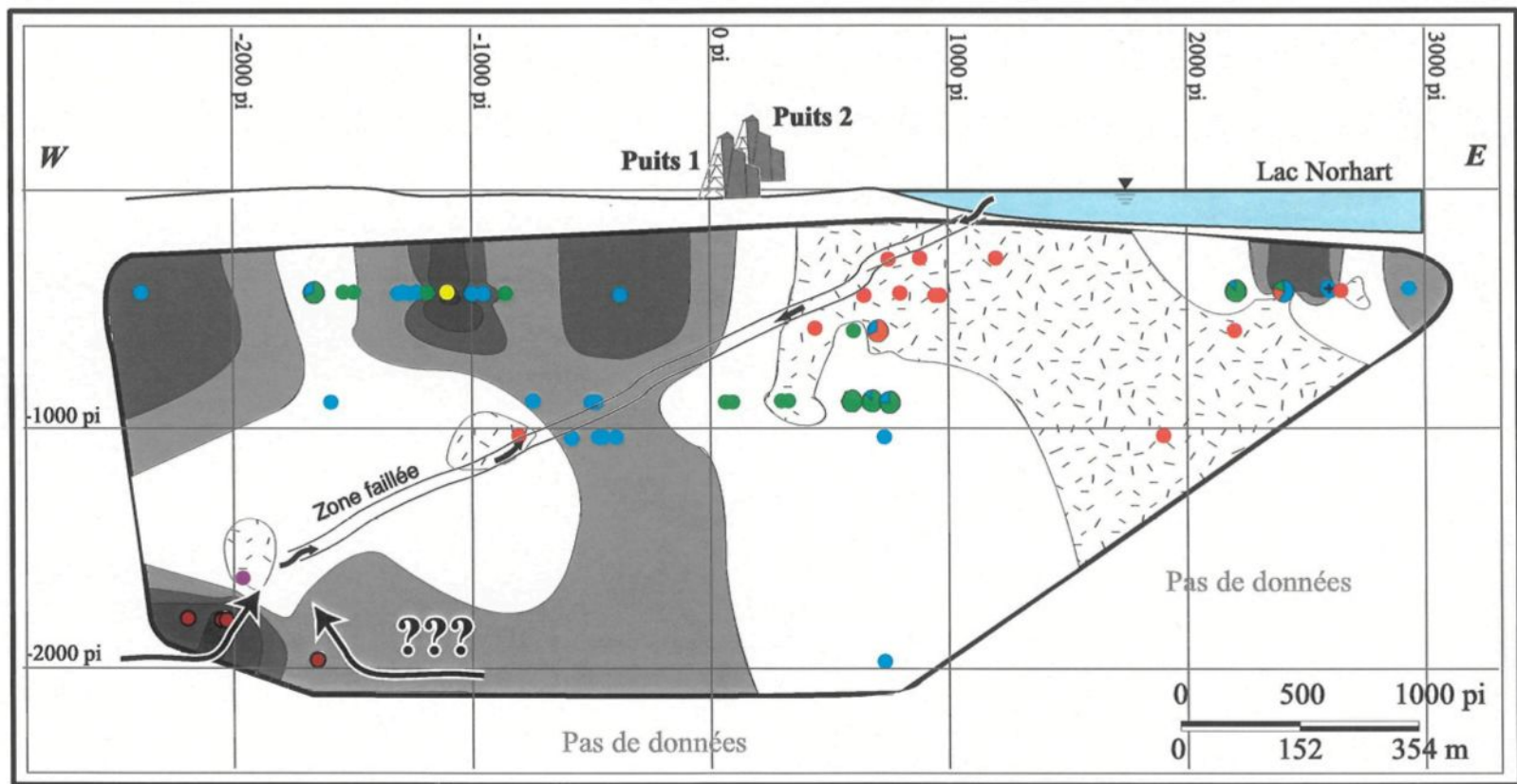
Figure 6.11 : Interprétation des modifications des conditions hydrogéomécaniques (modifié de Gascoyne, 1996)

perméabilité en direction d'un creux topographique, lequel est occupé par le lac Norhart. Ce plan d'eau constitue une limite de faible pression hydraulique.

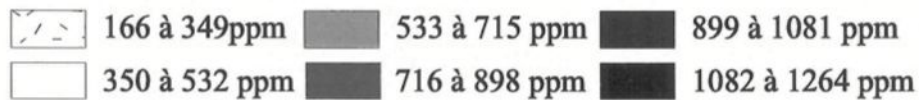
Après la mise en opération de la mine, deux évènements surviennent. Le drainage des galeries crée une zone de faible pression hydraulique dans le roc et donc la remontée des saumures s'en trouve facilitée. D'autre part, le drainage de la mine fait en sorte que l'eau du lac s'infiltré le long de la voie d'écoulement que constitue la zone de faille (figure 6.11).

D'après les résultats hydrogéochimiques obtenus et compilés au cours de cette étude, une constatation s'impose : les eaux de surface pénètrent dans tout le massif rocheux. La dilution des eaux est reconnaissable sur l'ensemble des échantillons récoltés. L'infiltration des eaux météoriques masque les différents phénomènes attendus dans un tel contexte.

L'infiltration des eaux de surface se fait à l'échelle du massif rocheux, cependant les échantillons recueillis en profondeur et à certains endroits du niveau 4 révèlent un TSD fort. Cela est la preuve que les eaux profondes sont des mélanges d'eaux salines et d'eaux d'infiltration récente. Des types d'eaux différents existent en profondeur par opposition à la surface. Les eaux, dans une répartition par rapport à la profondeur, montrent une évolution géochimique caractéristique des eaux souterraines du Bouclier canadien en figure 6.12. La dominance du chlore s'affirme avec la profondeur de même que la prédominance du



Valeurs en total des sels dissous :



La grosseur du point est proportionnelle au nombre d'échantillons recueillis.

Types d'eau

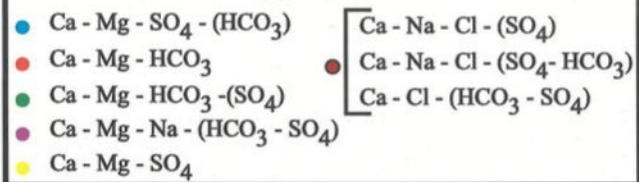


Figure 6.12 : Coupe transversale qui passe par le chevalement de la mine montrant l'évolution des eaux souterraines en profondeur et la distribution du total des solides dissous.

sodium parmi les cations. De plus, il faut noter que les mesures en TSD les plus élevées sont en majorité retrouvées en profondeur.

Cependant, quelques points n'ont pu être éclaircis en ce qui concerne le phénomène de dilution, comme par exemple : la remontée des saumures, si elle a effectivement lieu, se fait-elle par le biais de la «faille d'eau» qui recouperait en profondeur d'autres failles (donc interconnectée avec ces failles).

Du fait de la grande circulation d'eau, nous jugeons le temps de résidence des eaux dans la roche trop court pour que les seuls échanges entre les eaux d'infiltration récente avec les roches environnantes puissent contribuer à l'apparition des valeurs de TSD plus élevées en profondeur. Si des eaux salines remontent le long de la «faille d'eau», existe-t-il un réservoir en profondeur et comment se fait la recharge. Les zones de chantiers exploités sont plus enclines à de la fissuration dans la roche et montrent une dilution plus forte (côté est de la figure 6.12). Bien que les mises en graphique des éléments versus la profondeur ne soient pas révélatrices d'une corrélation, il faut noter que la majorité des valeurs élevées de TSD se retrouve en profondeur. Il est évident que la connaissance des conditions initiales de concentration en éléments majeurs des eaux souterraines locales, avant la mise en place des infrastructures minières, aurait aidé à la modélisation des effets de la dilution sur les eaux souterraines «résidentes» de la mine Joe Mann.

CHAPITRE 7

Conclusion

La modélisation des équilibres qui se manifestent à travers les interactions eau-roche n'a pas pu être mise en œuvre vu les faibles teneurs en éléments dissous des eaux échantillonnées.

L'isotopie ne peut fournir des certitudes quant à l'origine des eaux échantillonnées, ni préciser un membre formateur (*end-member*) d'origine saumurée vu le degré de dilution. Cependant, rien ne permet d'infirmer le fait que de l'eau saline diluée en grande proportion a été trouvée. Le fait que les points soient sur la «Global Meteoric Water Line» peut être interprété comme le résultat d'une dilution intense. La dilution à l'échelle du massif, dans le cas de la mine Joe Mann, est plus importante que dans d'autres mines. Ce phénomène masque les tendances et les caractéristiques des eaux souterraines dans un contexte minier. Une validation quant à la source des eaux souterraines prélevées aurait pu être apportée par la datation au tritium qui aurait confirmé leur origine récente ou non.

Il est reconnu que dans des zones d'activité anthropogénique, notamment sur les sites miniers, le mélange entre les eaux douces et des eaux salines peut se produire

entraînant des caractérisations chimiques problématiques pour les eaux salines en tant que membre-formateur. Cela amène à un ensemble de mélange isotopique ou de tendances de dilution entre un membre formateur saumure, de composition isotopique floue, et d'eaux ayant des compositions isotopiques similaires à celle des eaux de précipitation locales, ce qui est très variable à l'échelle du Bouclier canadien.

Deux points principaux ressortent de cette étude :

i) Les échantillons représentent soit des eaux de surface, soit des eaux profondes souterraines diluées en proportion variable, mais toujours suffisamment importante pour empêcher la détermination d'un membre formateur de type saumure, même à l'aide des études isotopiques pour l'oxygène 18 et le deutérium.

ii) En l'absence de données portant sur la densité de fracturation à la mine Joe Mann, nous pouvons supposer qu'il existe un réseau de fractures et de joints assez bien développé qui participe au drainage des eaux météoriques, en plus de la voie d'écoulement que constitue la zone de faille considérée. Cette infiltration entraîne une dilution des éventuelles eaux salines qui résident dans le massif rocheux.

Des différences dans les concentrations en sels dissous pourraient être vérifiées, étant donné que les volumes d'eau pompés diminuent à l'automne et à l'hiver. Le site de l'étude, en l'occurrence la mine Joe Mann à Chibougamau a permis une caractérisation de l'effet de l'intrusion d'eau de surface dans un domaine minier, mais se révèle inapproprié pour une étude classique des eaux souterraines et en particulier pour mettre en évidence la présence

d'eaux salines ou de saumures du Bouclier canadien. L'hydrogéologie propre à la mine Joe Mann a été comprise par le biais d'interprétations hydrogéochimiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.S.T.M., 1995. Standard test method for alkalinity in brackish water, seawater and brines. Désignation D 3875 – 80, Water and environment. American Society for Testing and Materials, volume **11.01** Water (I): 368-371.
- A.S.T.M., 1995. Standard practice for measuring elements in water by flame atomic absorption spectrophotometry. Désignation D 4691 – 87, Water and environment. American Society for Testing and Materials, volume **11.01** Water (I): 476-481.
- Banwart, S.A., Gustafsson, E. et Laaksharju, M. 1999. Hydrological and reactive processes during rapid recharge to fracture zones, The Aspö large scale redox experiment. Applied Geochemistry, vol.14, **6** :873-892.
- Bédard, P., 2000. L'utilisation des appareils Hach pour la géochimie de l'eau, Préliminaire. Document interne non publié, Université du Québec à Chicoutimi.
- Bein, A et Arad, A., 1992. Formation of saline groundwaters in the Baltic region through freezing of seawater during glacial periods. Journal of Hydrology, **140**: 75-87.
- Benlahcen, A., 1996. Modélisation de saumures carbonatées par le traitement multivariable en hydrogéochimie à la mine Niobec de Saint-Honoré, Québec. Université du Québec à Chicoutimi; mémoire de maîtrise.
- Bottomley, D.J., Gregoire, D.C. et Raven, K.G., 1994. Saline groundwaters and brines in the Canadian Shield : geochemical and isotopic evidence for a residual evaporite brine component. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol.58, **5** :1483-1498.
- Bouchard, M.A. et Martineau, G., 1984. Les aspects régionaux de la dispersion glaciaire, Chibougamau, Québec. *Dans* Chibougamau – Stratigraphy and Mineralization. *Éditeurs* : Guha, J., Chown, H., The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume **34** :431-440.
- Campbell Resources Inc., 1995. Annual report.
- Chown, E.H., Daigneault, R., Mueller, W. et Mortensen, J.K., 1992. Tectonic evolution of the Northern Volcanic Zone, Abitibi belt, Quebec. Journal canadien des sciences de la Terre, **29** :2211-2225.
- Chown, E.H., Daigneault, R., Mueller, W. et Pilote, P., 1995. Part A – Geological setting of the eastern extremity of the Abitibi belt. *Dans* Metallogenic evolution and geology of the Chibougamau area – from porphyry Cu-Au-Mo to mesothermal lode

- gold deposits, field trip guidebook. Éditeur : Pilote, P., Association géologique du Canada, Open File 3143 :1-18.
- Clark, I.D. et P. Fritz, 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Lewis Publishers, New York, 328 p.
- Dion, C. et Guha, J., 1994. Minéralisation aurifère du secteur oriental de la bande volcano-sédimentaire Caopatina-Desmaraisville. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, ET 91-10, 154p..
- Dion, C. et Maltais, G., 1998. La mine d'or Joe Mann. *Dans* Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau. Éditeur : Pilote, P., Association géologique du Canada :125-131.
- Domenico, P.A. et Schwartz, F.W., 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc., 506p.
- Farvolden, R.N., Pfannkuch, O., Pearson, R. et Fritz, P., 1988. Region 12, Precambrian Shield. *Dans* The Geology of North America, Hydrogeology. Éditeurs : Back, W., Rosenheim, J.S. et Seaber, P.R. Geological Society of America, O-2 :101-114.
- Faure, G., 1991. Principles and Applications of Inorganic Geochemistry. MacMillan Publishing Company, 626p.
- Fetter, C.W., 1994. Applied Hydrogeology. Prentice Hall, third edition, 691p.
- Fontes, J.C., Louvat, D. et Michelot, J.L., 1989. Some constraints on geochemistry and environmental isotopes for the study of low fracture flows in crystalline rocks. *Dans* Isotopes techniques in the study of the hydrology of fractured and fissured rocks . International Atomic Energy Agency : 29-67.
- Frape, S.K. et Fritz, P., 1984. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48 :1617-1627.
- Frape, S.K. et Fritz, P., 1987. Geochemical trends for groundwaters from the Canadian Shield. *Dans* Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. Éditeurs : Fritz, P., Frape, S.K. Association Géologique du Canada, Special Paper, 33 :19-38.
- Fritz, P., 1997. Saline groundwater and brines in crystalline rocks : the contributions of John Andrews and Jean-Charles Fontes to the solution of a hydrogeological and geochemical problem. *Applied Geochemistry*, 12 :851-856.
- Fritz, P. et Frape, S.K., 1982. Saline groundwaters in the Canadian Shield – A first overview. *Chemical Geology*, 36 :179-190.

- Gascoyne, M., 1996. Évolution des conditions d'oxydo-réduction et géochimie des eaux souterraines dans des zones d'alimentation-émergence sur le Bouclier Canadien. Atomic Energy of Canada Limited, 11682, 39p.
- Gascoyne, M. et Kotzer, T., 1995. Isotopic methods in hydrogeology and their application to the underground research laboratory, Manitoba. AECL-11370.
- Gascoyne, M., Davison, C.C., Ross, J.D. et Pearson, R., 1987. Saline groundwaters and brines in plutons in the Canadian Shield. *Dans* Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. *Éditeurs* : Fritz, P., Frape, S.K. Association Géologique du Canada, Special Paper, **33** :19-38.
- Geological Survey of Canada, 1967. Groundwater in Canada. Economic Geology, report 24 : 20-30.
- Gobeil, A. et Racicot, D., 1983. Carte lithostratigraphique de la région de Chibougamau. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MM83-02, 14p.
- Guha, J. et Kanwar, R., 1987. Vug brines-fluids inclusions : a key to the understanding of secondary gold enrichment processes and the evolution of deep brines in the Canadian Shield. *Dans* Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. *Éditeurs* : Fritz, P., Frape, S.K. Association Géologique du Canada, Special Paper, **33** :95-103.
- Guha, J., Chown, E.H., Archambault, G., Barnes, S.-J., Brisson, H., Daigneault, R., Dion, C., Dubé, B., Mueller, W. et Pilote, P., 1990. Metallogeny in relation to magmatic and structural evolution of an Archean greenstone belt : Chibougamau Mining District. *Dans* Gold and base metal mineralization in the Abitibi subprovince, Canada, with emphasis on the Quebec segment. *Éditeurs* : Ho, S.E., Robert, F. et Groves, D.I. University of western Australia Special Publication, **24** : 121-166.
- Kamineni, D.C., Gascoyne, M., Melnyk, J.W., Frape, S.K. et Blomqvist, R., 1992. Cl and Br in mafic and ultramafic rocks : significance for the origin of salinity in groundwater. *Dans* Water Rock Interaction. Editeurs : Kharak, Y.K. et Maest, A.S. Proceedings of the 7th International Symposium on Water-Rock Interaction, Park City, Utah, July 13-18, 1992, vol.1 :801-804.
- Kotzer, T.M., Gascoyne, M., Mukai, J.R. et Waito, D., 1998. ³⁶Cl, ¹²⁹I and noble gas systematics in groundwaters from the Lac du Bonnet Batholith, Manitoba, Canada. *Radiochimica Acta*, **82**: 313-318.
- Lauzière, K., Chown, E.H. et Sharma, K.N.M., 1989. Rapport intérimaire Projet Caopatina ; secteur du lac Rémick. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MM89-60, 93p.

Manuel HACH.

Martin, A., 1993. Modélisation de saumures carbonatées et caractérisation hydrogéologique de la mine Niobec, Saint-Honoré, Québec. Université du Québec à Chicoutimi; mémoire de maîtrise, 125p.

Martineau, G., 1984. Géologie du Quaternaire de la région de Chibougamau. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Rapport intérimaire, 15p.

Mason, J. L. et Kipp, K. L. Jr, 1997. Hydrology of the Bonneville Salt Flats, Northwestern Utah, and simulation of ground-water flow and solute transport in the shallow-brine aquifer. U.S. Geological Survey Professional Paper 1585.

M.E., 1965. Limite des bassins hydrographiques. Ministère de l'environnement, Service des eaux de surface, Chibougamau, Québec, feuillet 32 G, échelle : 1/250000.

M.E., 1990. Annuaire hydrologique 1988-1989. Ministère de l'Environnement, Direction du réseau hydrique. AH-30.

M.E.F., 1993. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1991. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Division des programmes sectoriels, Service de l'assainissement des eaux.

M.E.F., 1994. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1992. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des programmes sectoriels, Service de l'assainissement des eaux.

M.E.F., 1995. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1993. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des programmes sectoriels, Service de l'assainissement des eaux.

M.E.F., 1999. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1994. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur industriel, Service de l'assainissement des eaux.

M.E.F., 1999. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1995. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur industriel, Service de l'assainissement des eaux.

M.E.F., 1999. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1996. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur industriel, Service de l'assainissement des eaux.

M.E.F., 1999. Bilan annuel de conformité environnementale, Secteur minier, 1997.

Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur industriel, Service de l'assainissement des eaux.

- M.E.R., 1991. Carte des dépôts du Quaternaire avec topographie. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service des inventaires forestiers, feuillet 32 G / 08, échelle : 1/50000.
- Mueller, W., Chown, E.H., Sharma, K.N.M., Tait, L. et Rocheleau, M., 1989. Paleogeographic and paleotectonic evolution of a basement-controlled Archean supracrustal sequence, Chibougamau-Caopatina, Quebec. *Journal of Geology*, **97** : 399-420.
- Nordstrom, D.K., Lindblom, S., Donahoe, R.J. et Barton, C.C., 1989. Fluid inclusions in the Stripa granite and their possible influence on the groundwater chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53** :1741-1755.
- Pearson, P.J., 1987. Models of minerals controls on the composition of saline groundwaters of the Canadian Shield. *Dans Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. Éditeurs : Fritz, P., Frapé, S.K. Association géologique du Canada, Special Paper, 33 :39-51.*
- Prest, V.K., 1970. Quaternary geology of Canada, Chapter12 in geology and economic minerals of Canada. Geological survey of Canada, Economic geologic report : 675-764.
- Prichonnet, G., Martineau, G. et Bisson, L., 1984. Les dépôts quaternaires de la région de Chibougamau, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, volume 38:287-304.
- Racicot, D., Chown, E.H. et Hanel, T., 1984. Plutons of the Chibougamau-Desmaraisville belt : a preliminary survey. *Dans Chibougamau, Stratigraphy and Mineralization. Éditeurs : Guha, J., Chown, E.H., Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 34 : 178-197.*
- Rouessac, F. et Rouessac, A., 1995. Analyse chimique, Méthodes et techniques instrumentales modernes. Collection Masson, 303p.
- Rouleau, A., 1988. L'hydrogéologie du Québec : une revue de la documentation. Rapport interne, Centre d'Études sur les Ressources Minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 19p.
- Rouleau, A., Guha, J. Archambault, G. et Benlahcen, A., 1999. Aperçu de l'hydrogéologie en socle précambrien au Québec et des problématiques minières. *Hydrogéologie*, **4** : 23-32.

- Schmitt, L. et Maltais, G., 1998. Le couloir aurifère de la mine Joe Mann. *Dans* Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau. Éditeur : Pilote, P., Association Géologique du Canada :133-136.
- Schwartz, F.W., Muehlenbachs, K. et Chorley, D.W., 1982. Flow-system controls of the chemical evolution of groundwater. *Dans* Symposium on Geochemistry of Groundwater. Éditeurs : Back, W., Létolle, R., Elsevier Publishing Company., Developments in Water Science Collection 16 :225-243.
- Sharma, K.N.M., Gobeil, A et Mueller, W., 1987. Stratigraphie de la région du lac Caopatina. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MM87-16, 16p.
- Tait, L., Pilote, P. et Chown, E.H., 1987. Géologie de la région du lac à l'Eau Jaune, district de Chibougamau. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec ; MB 87-24, 114p.
- Tardat-Henry, M., 1992. Chimie des eaux. Éditions Le Griffon d'argile, Québec, 537 p.
- Todd, D.K., 1980. Groundwater Hydrology. John Wiley and sons, Second edition, 535p.
- Vovk, J.F., 1987. Radiolytic salt enrichment and brines in the crystalline basement of the East European Platform. *Dans* Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. Éditeurs : Fritz, P., Frape, S.K. Association géologique du Canada, Special Paper, 33 :197-210.
- Wagner, W.R., 1978. Geology of the Chibex gold deposit, Chibougamau, Quebec. Université du Québec à Chicoutimi; mémoire de maîtrise, 105p.
- Wilson, N., 1995. Soil water and groundwater sampling. CRC Press, 188p.
- WinSTAT Statistics for Windows, 1994. Version 3.0, Kalmia Co Inc.
- Winter, T.C., 1976. Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwaters, Geological Survey Professional Paper 1001, 45p.

ANNEXE A

Caractéristiques des trous de forage

Référence de l'échantillon	X mine	Y mine	Profondeur	Longueur du forage	Direction	Plongée	Remarques
384	220	1200	286.6	209	187	22	
385	179	883	289.6	30			
386	167	744	289.6	139	187	15	
401	482	2927	419.4 F				
402	578	2642	426.0	482.5	23.47	1	
403	932	2208	420.4	200	332	43	
404	932	2205	419.4	180	7	45	
405	932	2200	423.4	265	62	0	
406	932	2202	419.4	240	46	42	
407	985	2200	422.4	516	7	0	
408	944	2403	427.3	219	7	-59	
409	943	2406	419.4	131.5	321	53	
410	944	2403	418.4	175	7	69	
411	943	2399	419.4	189	60	52	
412	940	2598	422.4	118.3	45	32	
413	942	2600	420.4	175	7	62	
414	941	2602	421.4	142	343	44	
415	942	2600	422.4	121	7	39	
416	892	2604	422.4	229	327	18	
417	892	2603	422.4	30			
418	893	2603	421.4	236	343	41	
419	891	2600	420.4	270	7	57	
420	891	2598	421.4	100	33	42	Arrêté par faille d'eau
421	891	2596	422.4	172	52	35	Interception faille au bout
422	891	2596	423.4	214	52	20	
423	893	2603	424.4	140	343	0	
424	482	-2384	427.3	395	309	0	
425	485	-2380	427.3	543	n7	0	
426	340	-1950	427.3	424	187	0	
427	404	-1679	429.3	51	s6	0	
428	404	-1648	429.3	-	s6	0	
429	361	-1536	429.3	118	n7	48	
430	361	-1536	429.3	131	n7	55	
431	357	-1496	429.3	153	n7	48	
432	298	-1258	429.3	103	n12	37	
433	270	-1291	429.3	113	n2	37	
434	230	-1200	429.3	72	n6	37	eau à 70 pieds
435	250	-1228	429.3	172	n7	65	eau à 129-134, 139-140 pieds
436	212	-1100	434.3	301	187	22	
437	233	-1000	433.3	319	187	19	
438	238	-950	433.3	335	187	16	
439	242	-856	433.3	100	s6	0	
440	148	-376	433.6 F				

Coordonnées X et Y du collet du trou de forage dans les coordonnées de la mine en pi lues sur les compte rendus de forages de la mine (par convention le nord et l'ouest sont positifs) ; profondeur en pi ; longueur du forage en pi, F=fracture dans le toit de la galerie.
 FA= échantillon possiblement prélevé à même la faille «d'eau» ; pendage en degrés (positif vers le haut) ; remarques notées sur les rapports de forages.

Référence de l'échantillon	X mine	Y mine	Profondeur	Longueur du forage	Direction	Plongée	Remarques
441	123	2400	439.3 F				
442	-	-	439.3	75	s7	0	
443	136	947	439.3	490	187	0	
444	144	942	441.3	163	315	61	
445	144	951	435.3	172	48	54	
446	120	798	435.3	358	187	0	
447	96	646	441.3	560	169	0	
678	150	2200	590.1	584	187	0	
679	134	701	581.1	840	7	0	
680	123	677	589.1 F				
681	51	600	589.1	313	187	0	
682	496	111	589.1	395	7	8	
683	147	440	586.1	200	136	0	
948	55	310	886.6	30			
949	55	310	886.6	30			
950	-41	-743	886.6	137	332	0	Problème d'eau à 200 pi ?
951	684	-1592	886.6	57	20	0	
952	-168	-500	886.6	126.5	7	33	
953	-186	-483	884.7 F				
954	-100	65	888.6	149	225	0	
969	-55	668	890.6	198	220	41	
970	-85	685	884.7	124	216	35	
971	-87	689	885.6	120	176	40	
972	-87	689	885.6	159	176	58	
973	-92	698	883.7	135	142	31	
974	71	621	885.6 F				
975	92	596.5	888.6	340	142	0	
976	-100	65	891.3	158	225	0	
1055	-20	-583	1038.4 FA				
1056	488	-460	1038.4 FA				
1057	258	-400	1038.4	148	187	0	
1058			0.0 FA				
1059	341	-800	1037.1 FA				
1060	254	-456	1037.1	408	w4	0	
1061	-131	729	1037.1	-			
1062	215	1900	1037.1	371.5	180	27	
1663	755	2350	1632.5	116	7	-27	
1664	290	-1964	1632.5	30			
1665	492	-1969	1632.5	451	315	0	
1666	492	-1968	1632.5	356	328	0	
1667	252	-397	1632.5	349	201	-12	
1668	253	-341	1632.5	350	200	-10	
1887	915	-2401	1798.3	209	239	17	
1888	914	-2400	1798.3	172	225	0	
1889	979	-2356	1798.3	533	341	0	
1890	980	-2354	1798.3	504	1	0	
1891	972	-2357	1798.3	156	240	-56	
1892	969	-2357	1798.3	145	218	24	
1893	971	-2353	1798.3	216	187	40	
1894	966	-2350	1798.3	235	161	33	
1895	833	-2236	1798.3	80	23	73	
1896	744	-2195	1798.3	237	66	52	

Référence de l'échantillon	X mine	Y mine	Profondeur	Longueur du forage	Direction	Plongée	Remarques
1897	743	-2203	1798.3	195	329	32	
1898	766	-2197	1798.3	175	328	42	
1899	856	-2048	1799.3	492	359	23	
18100	855	-2046	1802.3	555	24	0	
18101	856	-2048	1802.3	533.5	359	-23	
18102	-	-	1802.3	30			
20103	665	-1906	1971.0	298	341	-45	
20104	795	-1649	1971.0	225	187	40	
20105	279	729	1978.0	110	3	45	
20106	198	-850	1978.0	200	38	25	
20107	-	-	1978.0	-			
E108	Échantillon prélevé dans les exhaures						
L109	Échantillon prélevé dans le lac Norhart						
4110	430	1900	440				
25111	229	-1297	2551				
L112	Échantillon prélevé dans le lac Norhart						

ANNEXE B :
Paramètres physiques des eaux échantillonnées

Référence de l'échantillon	Eh	pH	Température	Conductivité	TSD lu
384	190	8.23	7.8	0.207	104
385	182	8.14	7.8	0.193	98
386	182	8.21	8	0.186	94
401	140	7.42	5	0.755	379
402	177	7.66	4.8	0.293	145.5
403	137	7.4	5	0.403	202
404	114	7.74	4.9	0.356	179
405	130	7.57	4.8	0.421	212
406	121	7.63	4.9	0.469	236
407	107	7.05	4.8	0.644	323
408	148.4	7.59	5.4	0.442	222
409	174.9	7.44	5.7	1.014	508
410	166	7.3	5.1	1.287	644
411	158.4	7.36	4.9	0.984	493
412	165	7.36	5.6	1.057	530
413	169	7.49	5.3	1.048	524
414	172.2	7.67	5	0.961	478
415	174	7.59	5	1.016	509
416	156	7.42	5.6	0.968	484
417	160	7.46	5.3	1.026	513
418	163.7	7.48	5.3	1.014	508
419	163.8	7.69	5.4	0.84	430
420	165.8	7.55	6	0.906	450
421	164.4	7.68	5.1	0.846	424
422	166.9	7.53	5.6	1.011	506
423	180.8	7.59	5.1	1.074	537
424	166	7.21	4.8	0.963	482
425	183	7.16	5.4	1.414	706
426	2	12.52	7.9	1.671	844
427	114	7.96	6.4	0.543	273
428	130	7.94	6.1	0.392	196
429	137	7.69	8	0.46	231
430	141	7.83	7.4	0.601	302
431	140	7.67	7.7	0.581	291
432	153	7.71	8.1	0.753	378
433	153	7.54	8.5	0.72	361
434	152	7.49	8.7	0.688	345
435	157	7.55	8.2	0.753	373
436	161	7.51	7.5	1.378	685

Eh en mV, pH en unités pH, température en degrés celsius, conductivité en mS/cm, TSD en ppm.

Référence de l'échantillon	Eh	pH	Température	Conductivité	TSD lu
437	164	7.46	6.9	0.666	334
438	161	7.54	6.6	0.925	463
439	165	6.84	7.2	0.671	336
440	164	6.9	7.5	0.92	460
441	196	7.21	11.3	0.224	113
442	207	7.24	8.6	0.204	102
443	200	7.79	7.9	0.224	113
444	208	7.49	9.1	0.407	203
445	206	7.66	8.3	0.267	134
446	193	7.32	7.9	0.283	142
447	172	7.37	8.1	0.266	134
678	172	7.63	7.2	0.314	157
679	173	7.68	8	0.3	151
680	178	7.59	7.6	0.35	176
681	177	7.7	7.7	0.415	208
682	177	8.28	7.6	0.324	163
683	180	8.14	7.5	0.352	177
948	178	7.69	8.3	0.355	178
949	176	7.48	7.4	0.326	164
950	182	7.47	6.9	0.69	349
951	180	7.6	6.5	0.564	282
952	184	7.32	7.1	0.646	324
953	178	7.65	6.8	0.658	329
954	181	6.56	7	0.479	240
969	110.7	6.72	8.6	0.411	206
970	118.6	7.38	7.6	0.503	252
971	121.2	7.05	7.6	0.732	217
972	126.2	7.6	7.3	0.403	202
973	134.5	7.26	7.3	0.509	255
974	136.3	7.25	7.6	0.439	220
975	137.6	7.65	7.5	0.465	233
976	142.7	7.06	7.7	0.471	236
1055	187	7.32	8.8	0.681	340
1056	175	7.22	8.3	0.633	317
1057	166	7.16	7.6	0.649	325
1058	153	7.07	7.2	0.3	151
1059	152	7.17	7	0.322	162
1060	152	7.12	7.4	0.659	330
1061	148	7.09	7.7	0.496	249
1062	145	7.1	7.7	0.324	162
1663	195	7.07	10.2	1.076	538
1664	189.5	7.68	9.6	0.336	168
1665	-9.8	13.2	8.5	10.48	5210
1666	6.6	12.79	8.8	3.48	1719
1667	85	7.89	9	0.88	441
1668	98.3	7.95	8.8	0.8	400

Référence de l'échantillon	Eh	pH	Température	Conductivité	TSD lu
1887	164	7.07	9.1	0.72	351
1888	149	7.36	9.1	0.686	342
1889	136	6.96	9.4	2.82	1388
1890	134	6.91	9.2	2.2	1067
1891	135	7.4	8.7	1.21	597
1892	139	7.53	8.6	1.35	664
1893	142	7.8	8.4	0.876	438
1894	140	7.87	8.6	1.135	567
1895	138	6.76	8.7	1.12	552
1896	143	6.83	8.8	0.355	355
1897	142	7.57	8.4	1.13	555
1898	138	7.7	8.5	1.169	582
1899	121.5	7.29	9.6	1.697	847
18100	116.6	7.46	9.3	0.975	487
18101	114.2	7.73	9.1	0.704	351
18102	91.1	9.23	8.9	0.245	123
20103	129.6	7.96	9.8	0.997	499
20104	131	7.97	10.2	0.69	343
20105	144	7.66	10.6	0.526	263
20106	147	7.95	10.2	0.631	316
20107	203	7.72	10.8	1.411	706
E108	212	7.6	19.6	0.312	156
L109	204	7.21	19.2	0.047	24
4110		7.39		1.662	0.831
25111		7.24		1.207	0.604
L112		7.84		0.066	0.033

ANNEXE C

Résultats des analyses des ions majeurs et mineurs

Référence de l'éch.	Cl	Sulfates	Sr	Oxygène dissous	Mg	Na	Ca	K	Fe	Zn	Si	HCO ₃ titrage	HCO ₃ (alcalinité)	TSD calculé	TSD lu
384	1.5	0.43	0.2	9.1	8	2	26	1.6	0.16	-	4	109.0375	102.48	174.99	104
385	1.5	0.8	0.2	8.6	8	4	24	1.2	0.08	-	3	109.8	97.6	168.5	98
386	1.4	4	0.1	5.5	8	4	22	1.4		-	3	89.2125	92.72	166.52	94
401	8.3	213.55	0.2	5.7	32	6	102	3.2		-	4	250.71	195.2	570.15	379
402	1	18.84	0.7	4.1	12	6	38	1		-	3	152	107.36	192	145.5
403	9	86.4	1.7	9.8	14	14	46	5.2	0.75	-	4	147.01	107.36	298.21	202
404	8.4	66.58	2	3	14	20	48	2.8	0.83	-	4	144.57	109.8	279.41	179
405	8.6	69.01	1.8	7.6	14	14	46	2.4	0.36	-	4	147.62	111.264	279.034	212
406	9.6	81.91	1.8	4.8	18	16	62	3.2	1.68	-	5	152.5	115.656	319.646	236
407	10.9	164.95	2	3	26	14	82	3	0.56	-	4	215.94	170.8	507.074	323
408	15.7	96.9	2	9.2	12	18	46	3	0.29	-	4	122	170.8	421.322	222
409	7.1	302.1	0.1	9	50	8	142	6	0.58		4	317.2	257.176	825.096	508
410	3.6	626.4	0.5	7.3	74	10	184	5.6	3.48	-	5	253.76	251.32	1193.16	644
411	7.4	296.15	0.8	7.4	46	12	140	4.6	9.8	-	5	318.42	268.4	831.71	493
412	6.8	321.55	0.2	8.8	54	6	152	5.2	0.45	-	5	270.23	253.76	872.32	530
413	6	343.95	0.5	8.6	54	8	130	4.4	1.36	-	5	303.78	253.76	849.73	524
414	4.8	336.4	0.7	9.3	46	10	144	4.6	0.91	-	5	237.9	224.48	825.23	478
415	6.7	327.2	0.3	8.2	54	8	150	5	3.67	-	5	316.59	302.56	899.91	509
416	6.1	327.1	0.8	8.8	54	10	138	4.6	1.1	-	5	276.94	230.824	797.548	484
417	6.8	344.75	0.2	10.5	52	8	142	5.6	1.52	-	5	320.86	207.4	820.37	513
418	6.1	347.2	0.2	7.7	54	8	148	5.4	0.41	-	4	317.2	202.52	812.81	508
419	5.4	271.05	0.4	9.4	40	6	118	3.6	0.16	-	4	254.37	156.16	648.33	430
420	5.1	341.5	0.3	8.8	50	8	140	4.8	1.87	-	5	254.98	175.68	760.57	450
421	7	308.6	0.4	8.6	38	8	110	4.2	1.01	-	4	250.1	165.92	681.594	424
422	6	343.4	0.3	8.2	52	8	142	5.4	0.57	-	5	265.96	195.2	785.59	506
423	6.5	364.45	0.2	8.6	56	10	148	5.4	0.18	-	4	324.52	268.4	909.306	537
424	6.5	323.45	0.4	4	50	6	142	4	0.17	-	4	284.26	231.8	804.04	482

Tous les résultats sont donnés en ppm.

Référence de l'éch.	Cl	Sulfates	Sr	Oxygène dissous	Mg	Na	Ca	K	Fe	Zn	Si	HCO ₃ titrage	HCO ₃ (alcalinité)	TSD calculé	TSD lu
425	4	692.2	0.3	4.7	88	8	160	6.4	0.09	-	4	337.94	307.44	1300.994	706
426	2.7	15.01	1.5	3.4	2	10	154	10	0.21	0.05	2		435.296	636.166	844
427	6.7	104.2	0.2	3	20	8	84	1.4	0.06	-	2	168.36	141.52	390.112	273
428	5.9	72.1	0.4	5.5	16	6	56	2.4	0.03	-	2	186.66	151.28	339.57	196
429	3.8	71.25	0.4	7.7	16	6	64	1.6	0.16	-	2	168.97	141.52	332.974	231
430	21.6	159.85	0.3	8.3	24	12	94	3.2	0.13	-	2	185.2875	158.6	501.06	302
431	19.7	143.65	0.2	7.5	18	10	82	2.4	0.77	0.02	3	156.16	143.96	443.4	291
432	12.9	263.75	0.2	7.7	36	12	98	3	2.55	22	4	198.86	185.44	686.58	378
433	51.75	174.95	0.2	7.8	22	10	106	2.4		-	4	216.55	131.76	545.02	361
434	44.25	160.35	0.2	9.3	22	8	106	2		-	3	222.04	200.08	608.86	345
435	52.5	166.3	0.2	9.4	26	10	118	2.4	1.27	-	4	190.93	170.8	609.67	373
436	21.3	745.8	0.6	7.8	66	36	200	3.4	0.09	-	3	147.62	141.52	1264.55	685
437	37.75	206	0.4	8.9	26	12	110	3.4	0.01	-	4	245.22	185.44	647.58	334
438	65.5	226.8	0.5	9.3	34	22	120	2.2	0.02	-	3	195.2	151.28	688.28	463
439	26.375	165.75	0.4	3	24	12	100	3.2		-	4	238.51	190.32	568.085	336
440	35.25	252.15	0.6	9.3	36	14	142	3.8		-	4	210.45	253.76	804.54	460
441	1.7	1.13	0.2	5.8	10	4	24	2.6	0.05	-	3	115.9	107.36	184.24	113
442	2	1.19	0.1	4.4	10	4	22	2.2	0.06	-	4	234.24	107.36	176.83	102
443	1.5	23.06	0.2	5.9	12	2	38	0.6	0.45	-	3	135.42	112.24	213.59	113
444	1.2	75.85	0.3	8.7	16	4	68	3.6	0.71	0.06	3	185.44	170.8	376.62	203
445	2.2	17.3	0.3	9.7	10	4	42	2	1.04	0.06	3	157.38	141.52	257.52	134
446	1.7	15.55	0.2	4.4	12	4	40	1.8	0.41	-	2	154.33	131.76	233.34	142
447	2.4	21.76	0.1	4.8	12	4	36	0.8	0.36	-	2	136.03	112.24	220.86	134
678	2	2.45	0.4	6.6	16	6	32	2.4	0.22	-	4	147.1625	122	218.47	157
679	1.6	3.8	0.2	7.9	16	4	52	1	4.52	-	4	158.6	146.4	270.7	151
680	1.7	42.4	0.2	6.8	14	4	46	2.4	0.01	-	4	149.45	136.64	282.55	176
681	5.6	72.35	0.3	5.3	18	4	58	1	1.24	-	3	165.4625	141.52	334.71	208
682	2.3	45.9	0.7	4.9	26	4	112	4.4	0.07	-	3	137.725	112.24	344.79	163
683	1.6	4.3	0.4	8.4	14	4	48	1.8	0.03	-	3	157.075	165.92	275.85	177
948	4.2	35.37	0.3	2.5	14	6	44	2.6	0.12	-	4	156.16	156.16	298.53	178
949	4.1	37.04	0.7	10.1	18	6	44	2.8	0.02	-	3	154.94	126.88	296.56	164
950	17.375	209.5	0.5	7.5	24	14	96	1.2	0.39	-	2	143.96	126.88	533.505	349

Référence de l'éch.	Cl	Sulfates	Sr	Oxygène dissous	Mg	Na	Ca	K	Fe	Zn	Si	HCO ₃ titrage	HCO ₃ (alcalinité)	TSD calculé	TSD lu
951	9.7	153.9	1.1	7.2	20	10	78	1.4	0.06	-	2	146.4	136.64	463.92	282
952	13.5	208.45	0.7	10.5	24	8	98	1.2	0.04	-	2	131.76	141.52	571.35	324
953	12.9	208.95	0.6	7.9	22	8	102	1	0.01	-	1	116.51	161.04	564.44	329
954	9.1	119.05	1.4	6.6	20	12	62	1.2		-	3	180.56	156.16	429.55	240
969	6	78	0.4	7.1	16	6	58	2.8	0.15	-	2	154.025	141.52	342.37	206
970	11.3	122.85	0.5	6.8	20	6	74	0.8	0.17	-	2	123.525	151.28	444.5	252
971	6.6	77.2	0.4	7.2	16	4	62	1	0.24	-	2	132.675	151.28	357.2	217
972	10	61	0.4	7.2	16	4	60	1	0.54	-	3	151.7375	146.4	338.82	202
973	11.2	102.6	0.4	6.4	18	6	72	0.8	0.04	-	2	142.5875	161.04	414.64	255
974	7.5	68.55	0.4	6.9	18	14	62	0.8	0.01	-	2	115.1375	141.52	355.84	220
975	15.4	86.65	0.7	3.5	16	6	56	0.6	0.03	-	3	115.9	136.64	358.68	233
976	8.6	79.9	0.8	4.6	20	18	68	1.4	0.03	-	2	162.4125	165.92	408.29	236
1055	20.1	181.15	1.4	11.4	24	12	92	2.2	0.02	-	2	173.24	126.88	507.31	340
1056	17.3	179.25	0.8	9.6	24	12	88	2.2	0.03	-	3	192.76	141.52	516.74	317
1057	17.1	169.3	0.8	7.7	24	10	86	2		-	3	180.7125	165.92	510.22	325
1058	3.6	1.1	0.6	6.6	14	6	36	2.4	1.37	-	4	148.688	131.76	222.07	151
1059	3.4	1.6	0.4	5.9	14	6	38	2.8	0.12	-	4	145.6375	117.12	217.74	162
1060	20	173.6	0.9	8	22	10	82	2.2	0.02	-	3	120.475	165.92	516.92	330
1061	8.2	128.8	0.5	3.2	18	6	74	0.8		-	3	272.975	141.52	408.42	249
1062	4.1	13.75	0.6	8.6	14	6	38	1.2	0.01	-	3	137.25	126.88	245.42	162
1663	337.5	114.2	3.9	4.5	18	74	94	3	0.17	-	3	144.875	97.6	774.27	538
1664	20.8	47	1.6	6.9	10	16	32	1.8	0.03	-	4	120.475	112.24	276.77	168
1665	35.5	2.15	20.8	2.5	0	304	500	396	0.05	0.03	6		3430.64	4697.67	5210
1666	39.75	2.15	8.3	3.2	0	56	256	2.8		-	0		814.96	1183.16	1719
1667	165	129.85	2.6	6	18	64	62	2	0.84	-	3	135.725	117.12	609.45	441
1668	182.5	181.7	2	3.8	20	62	60	1.8	7.81	-	9	134.2	122	686.77	400
1887	267.5	77.5	2.7	5.2	14	42	68	2.8	0.29	-	3	115.9	97.6	600.11	351
1888	305	111.25	2.6	6.5	14	40	68	3	0.16	-	2	99.125	97.6	669.63	342
1889	910	397.7	5.6	2.4	22	310	118	3.6	13.6	0.08	6	104.4625	63.44	1871.94	1388
1890	710	286.7	4.4	8	26	168	126	4.4	4.13	-	5	85.4	78.08	1435.35	1067
1891	467.5	152.55	4.4	5.1	24	106	112	3.6	0.94	-	4	102.175	97.6	997.21	597
1892	385	181.7	4.9	5.2	24	98	122	3.6	1.89	-	5	99.8875	87.84	943.53	664

Référence de l'éch.	Cl	Sulfates	Sr	Oxygène dissous	Mg	Na	Ca	K	Fe	Zn	Si	HCO ₃ titrage	HCO ₃ (alcalinité)	TSD calculé	TSD lu
1893	297.5	76.65	2.8	5.1	18	46	84	2.8	1.51	-	3	100.65	73.2	634.96	438
1894	437.5	150.65	4.2	5.2	22	72	104	3.4	2.2	-	5	102.175	136.64	972.07	567
1895	385	104.2	4	5.2	20	70	96	3.8	0.96	-	4	98.3625	97.6	820.04	552
1896	202.5	89.9	2.7	8.4	14	42	64	2.6	0.03	-	5	0	112.24	577.53	355
1897	210	145.5	3.5	6.8	22	74	96	4.4	5.5	0.02	6	112.85	92.72	685.96	555
1898	440	164.7	5.4	7.4	24.8	126	124	6	1.12	-	4	109.8	87.84	1020.54	582
1899	345	214.9	5.8	9.2	28	140	138	4	2.34	-	6	86.1625	92.72	1005.48	847
18100	410	117.15	3	6.2	19.8	82	82	2	5	-	6	116.663	122	874.67	487
18101	220	130.15	2.9	3.1	23.2	58	124	7.8	1.55	-	5	154.7875	126.88	726.98	351
18102	50	62.9	0.6	10.6	2.6	30	10	3.6	0.6	-	4	39.65	29.28	218.82	123
20103	347.5	117.15	3	10	18.2	82	78	5.8		-	4	111.325	122	816.93	499
20104	255	139.05	2.6	4.4	21	56	152	14.6	0.54	-	6	186.05	141.52	821.99	343
20105	9.6	161.7	0.9	10.8	20.6	12	62	5.6		-	3	135.725	117.12	427.72	263
20106	1005	371.5	1.6	4.8	24.2	24	164	14		0.09	3	102.175	126.88	1768.35	316
20107	67.5	393.35	1.3	10.4	47.4	46	152	15.4	0.81	0.02	3	109.8	107.36	873.82	706
E108	25	71.25	0.4	8.2	9.2	12	36	1.8	0.04	-	0	67.1	48.8	237.09	156
L109	0.8	1.6	0	8.3	1.6	0	6	5	0.05	-	1	40.4125	4.88	43.87	24
4110					0.6	40	110	30							0.831
25111					0.4	80	40	50							0.604
L112					0.1	0.24	0.1	0.02							0.033

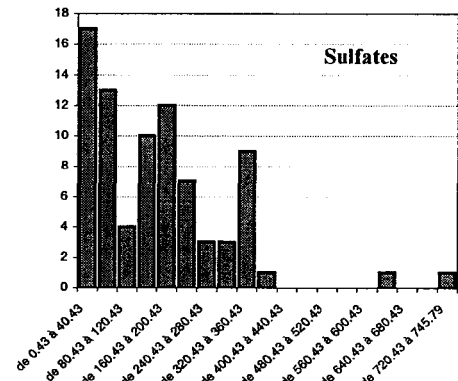
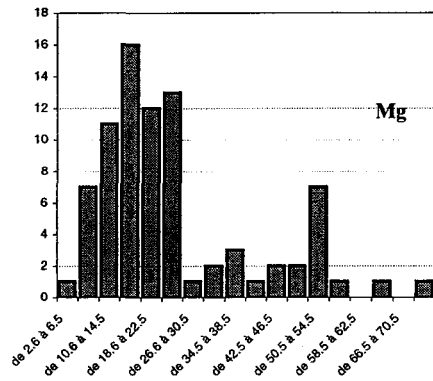
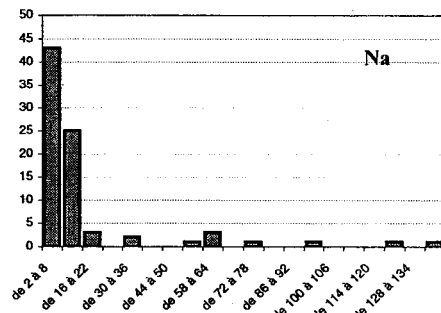
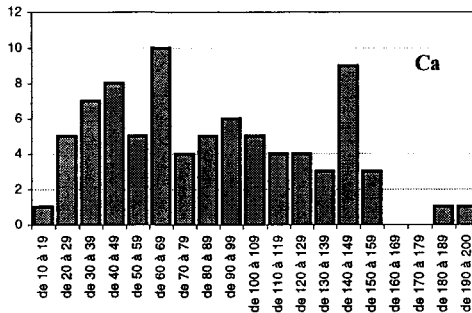
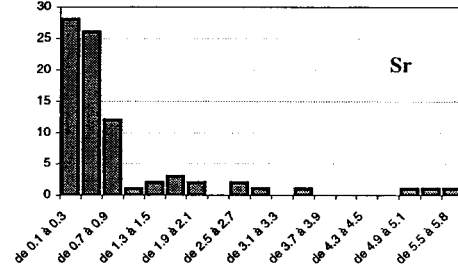
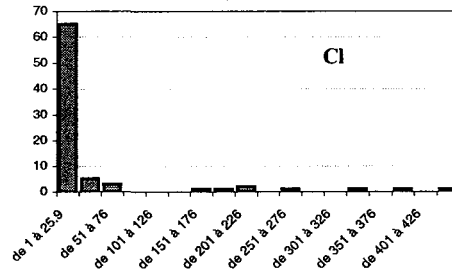
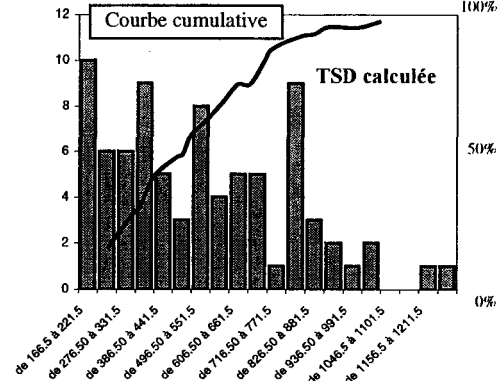
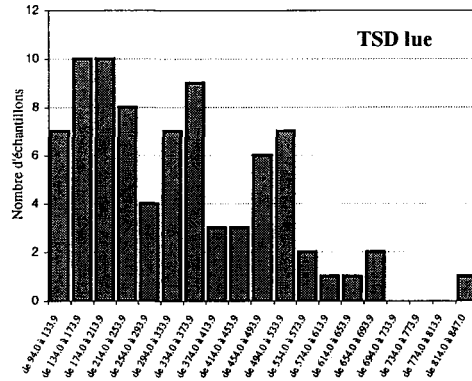
ANNEXE D
Matrice des coefficients de Pearson

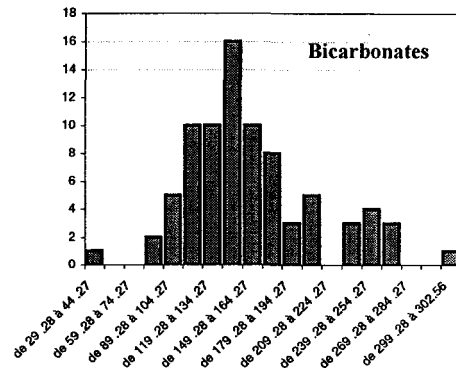
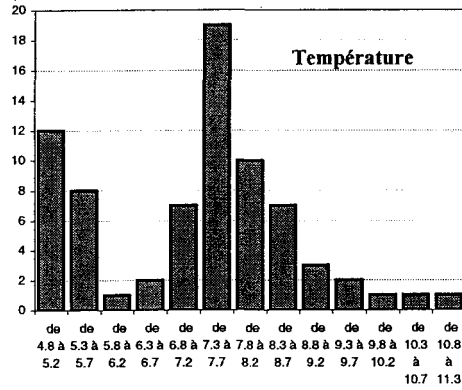
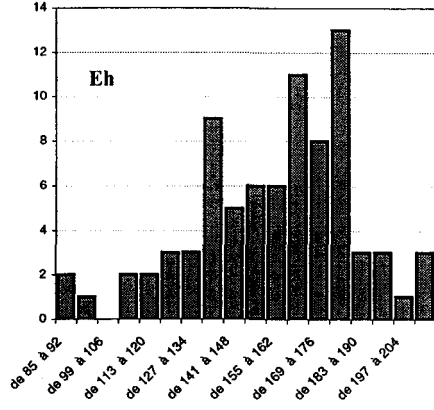
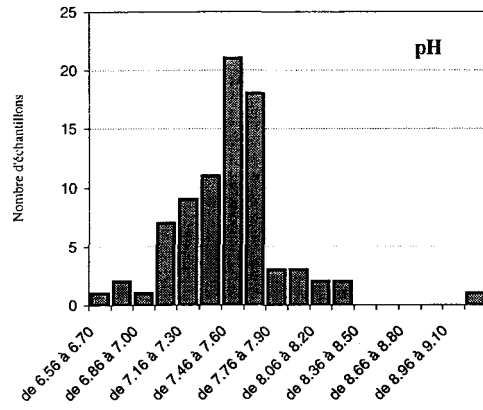
	X mine	Y mine	Z	TSD lu	Cl	Sulf.	Oxy	Sr	Mg	Na	Ca	K	Fe	Zn	Si	Eh	pH	Temp.	TSD calc.	Bicarb.	
X mine	1.0																				
Y mine	0.4	1.0																			
Profondeur	-0.1	-0.4	1.0																		
TSD lu	0.6	0.0	0.0	1.0																	
Cl	0.2	-0.5	0.6	0.5	1.0																
Sulfates	0.5	0.1	-0.2	0.8	0.0	1.0															
Oxy	0.1	0.1	-0.1	0.2	-0.1	0.3	1.0														
Sr	0.3	-0.3	0.7	0.5	0.9	0.0	-0.1	1.0													
Mg	0.6	0.3	-0.3	0.8	0.0	0.9	0.2	-0.1	1.0												
Na	0.3	-0.4	0.6	0.6	1.0	0.1	-0.1	0.9	0.0	1.0											
Ca	0.6	0.0	0.0	0.9	0.3	0.9	0.2	0.2	0.9	0.3	1.0										
K	0.7	0.1	0.2	0.5	0.4	0.4	0.1	0.3	0.5	0.3	0.6	1.0									
Fe	0.4	0.1	0.0	0.3	0.3	0.2	-0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	1.0								
Zn	-0.1	-0.2	-0.3	0.2	-0.2	0.8	-0.2	-0.3	0.9	-0.2	0.5	0.0	0.1	1.0							
Si	0.7	0.2	0.1	0.5	0.4	0.3	-0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.1	1.0						
Eh	-0.1	0.2	-0.3	-0.2	-0.4	0.0	0.2	-0.4	0.1	-0.4	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	1.0					
pH	0.1	0.0	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.1	0.0	-0.2	0.1	-0.2	0.1	0.1	0.6	0.2	-0.1	1.0				
Température	-0.6	-0.5	0.6	-0.4	0.4	-0.5	0.0	0.2	-0.6	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	0.1	1.0			
TSD calculé	0.6	0.0	0.0	1.0	0.4	0.9	0.2	0.4	0.9	0.5	1.0	0.6	0.3	0.6	0.5	-0.2	-0.1	-0.4	1.0		
Bicarbonates	0.4	0.4	-0.4	0.5	-0.3	0.6	0.1	-0.4	0.8	-0.3	0.7	0.3	0.2	0.6	0.2	0.2	-0.3	-0.6	0.6	1	

N.B. Z représente la profondeur. Seulement 5 analyses en Zn sont disponibles pour le calcul des coefficients de corrélation.

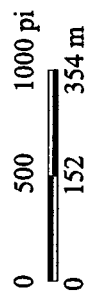
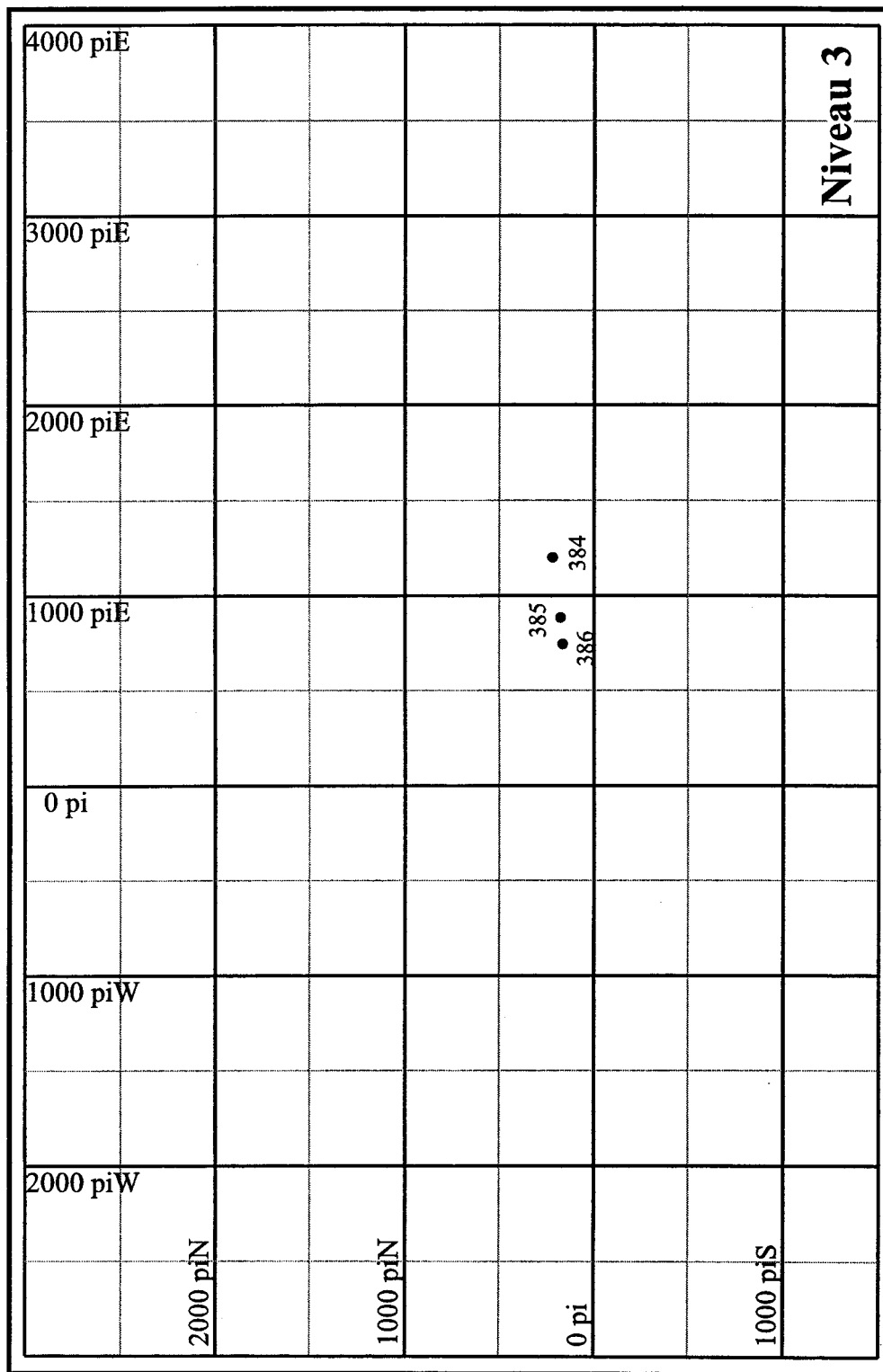
ANNEXE E

Fréquences d'apparition des éléments majeurs, mineurs et des variables physico-chimiques des eaux.

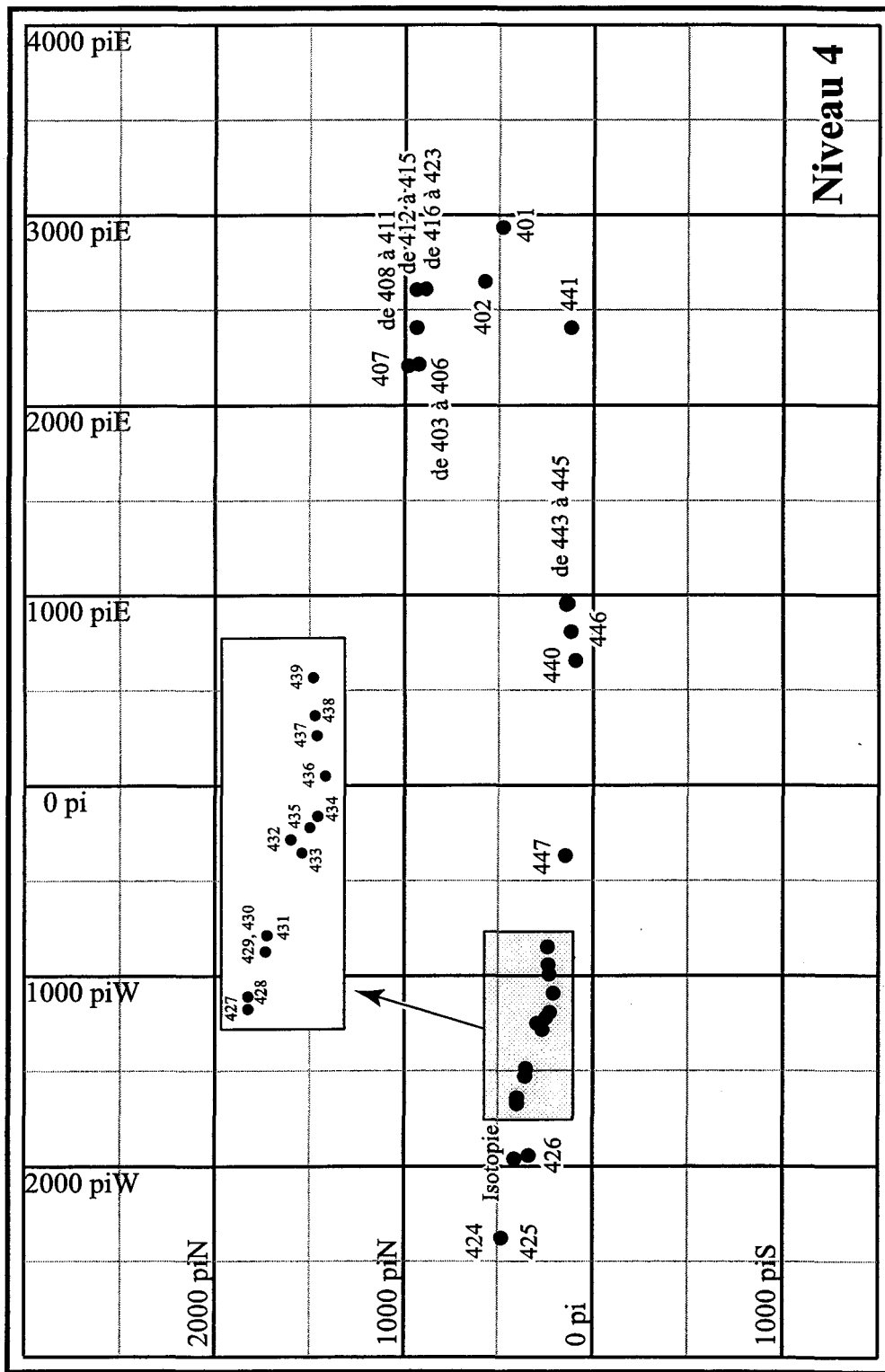




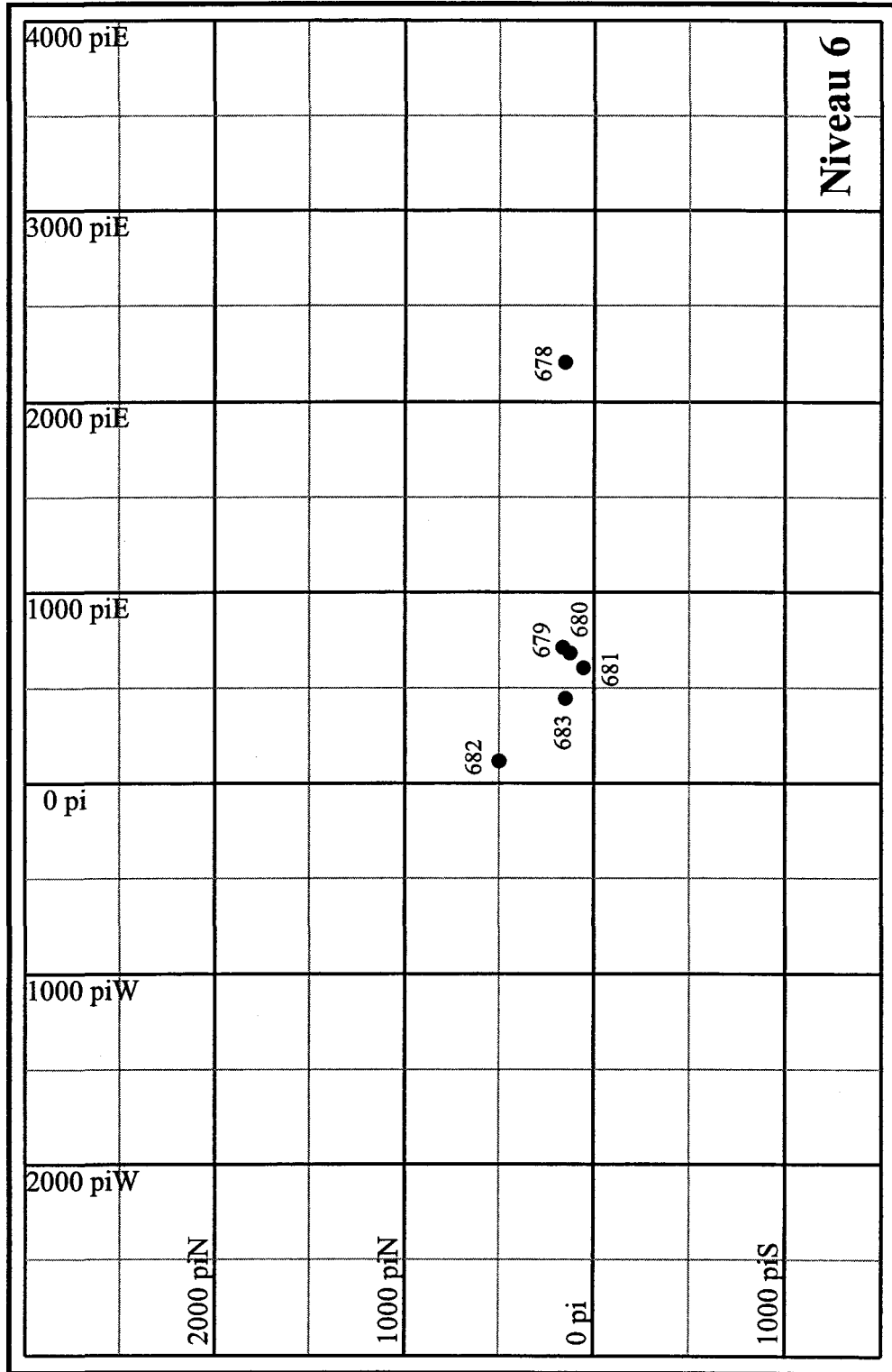
ANNEXE F
Localisation des échantillons



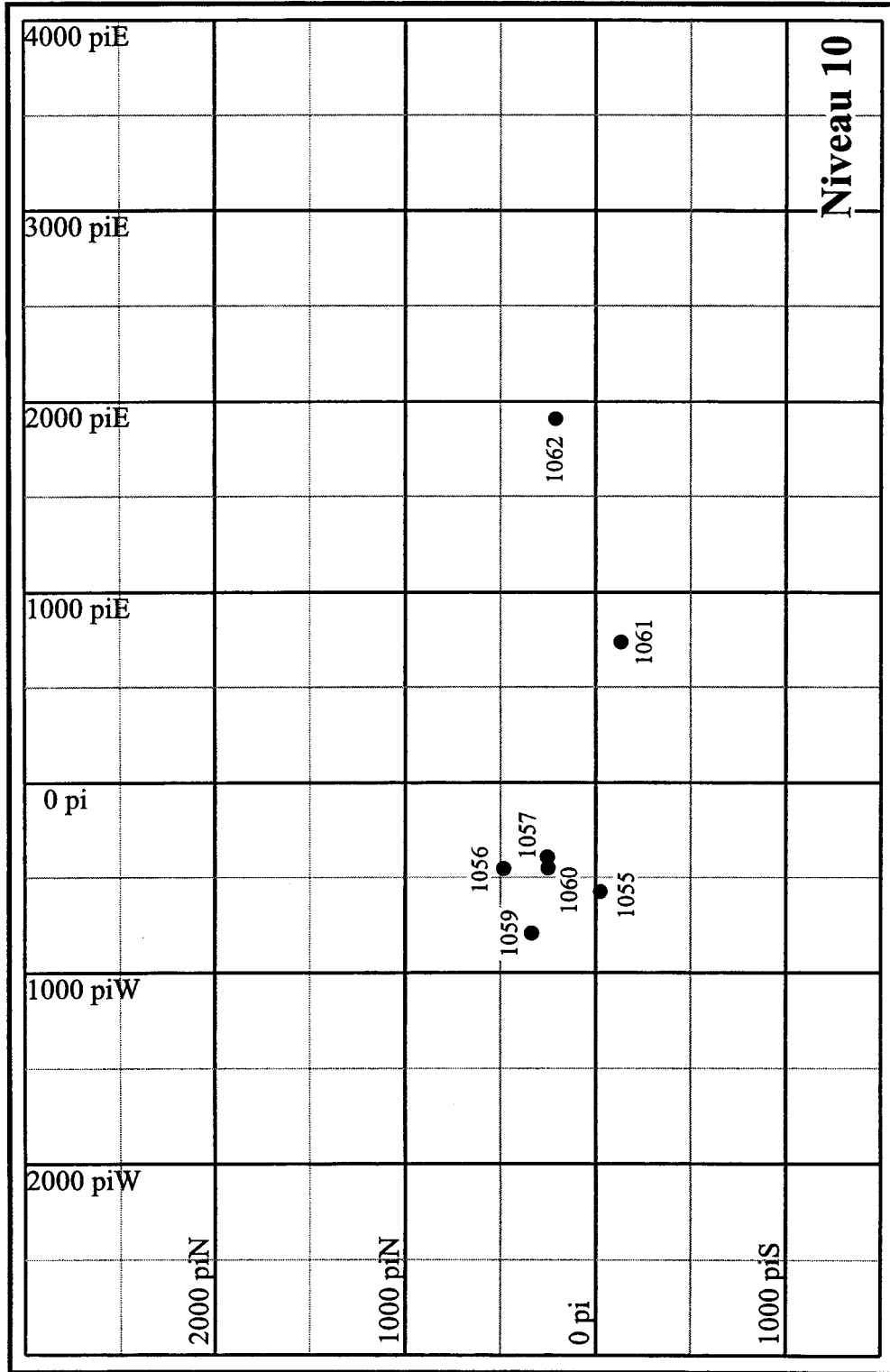
ANNEXE F Localisation des échantillons



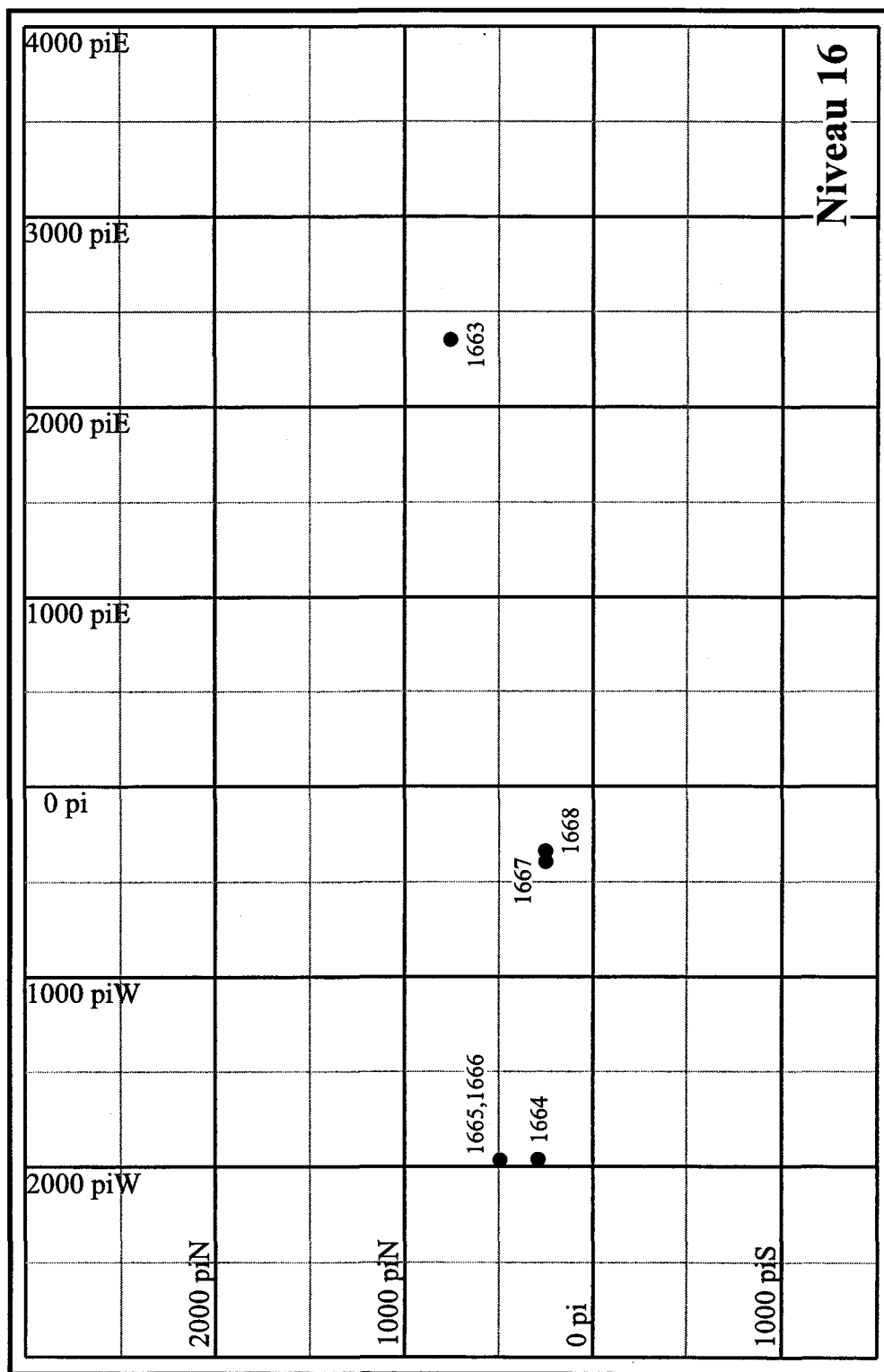
ANNEXE F
Localisation des échantillons



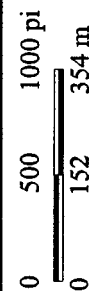
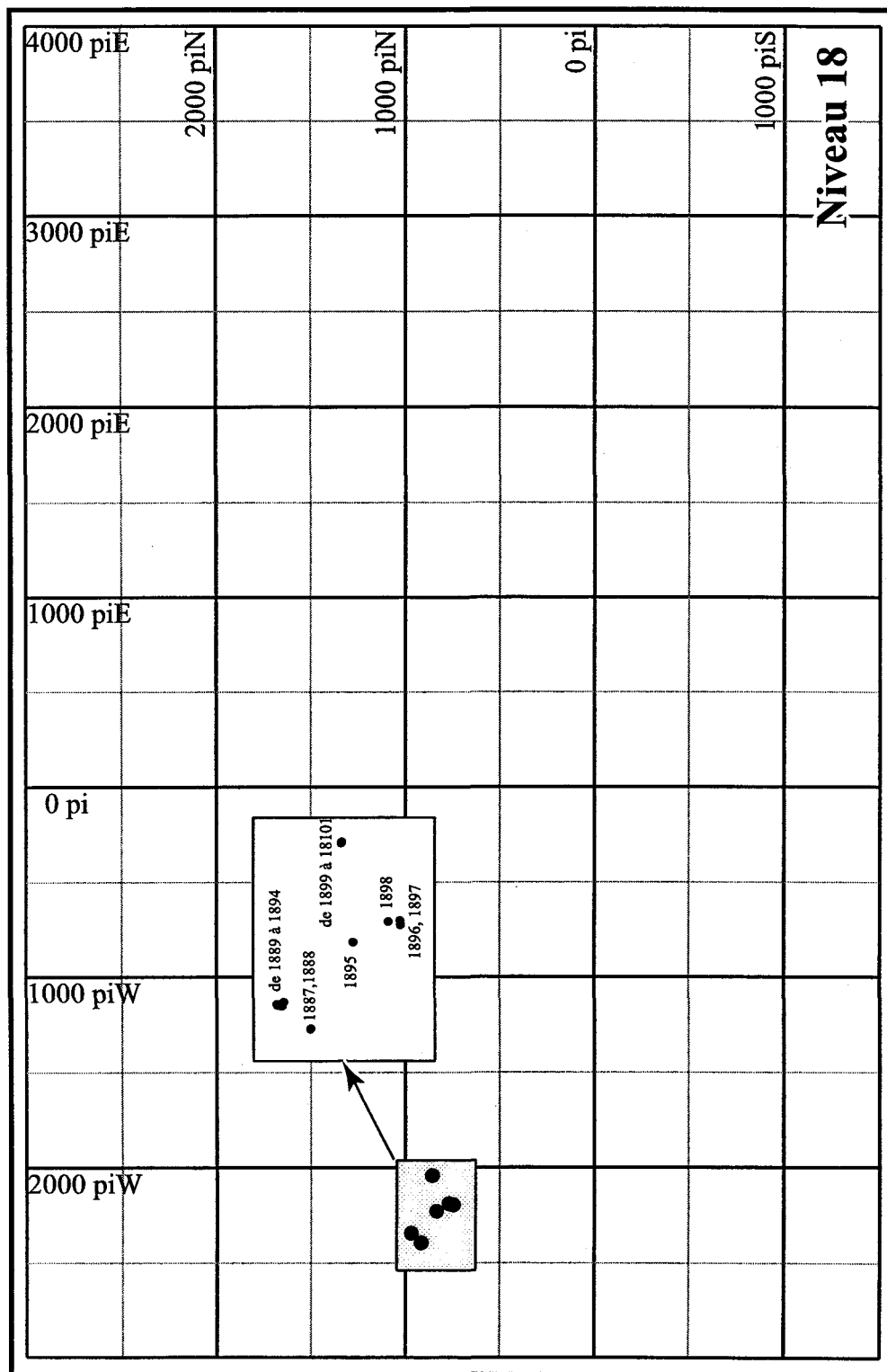
ANNEXE F
Localisation des échantillons



ANNEXE F
Localisation des échantillons



ANNEXE F Localisation des échantillons



ANNEXE F
Localisation des échantillons

