

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

Par

Julien Walter

**LES EAUX SOUTERRAINES À SALINITÉ ÉLEVÉE
AUTOUR DU LAC SAINT-JEAN, QUÉBEC : ORIGINES ET INCIDENCES**

AVRIL 2010

RÉSUMÉ

Les eaux souterraines dans le socle cristallin grenvillien de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean sont l'objet d'une première étude géochimique et isotopique portant principalement sur des eaux de salinité élevée. Les objectifs de cette étude sont d'évaluer la qualité naturelle des eaux souterraines, d'évaluer la variabilité chimique dans le temps et dans l'espace, de corréler la géologie régionale avec l'hydrogéochimie identifiée et d'identifier les processus géochimiques contrôlant les caractéristiques chimiques des eaux souterraines et leur évolution.

Au total 96 échantillons ont été prélevés lors de trois campagnes. Parmi les 46 stations sélectionnées, 18 ont été échantillonnées à trois reprises, soit aux mois de novembre et décembre 2004, février 2005 et mai 2005, 13 stations ont été échantillonnées lors de 2 campagnes et 16 stations ont été échantillonnées une seule fois. La majorité des échantillons proviennent du socle rocheux et la plupart ont été prélevés dans des puits privés alimentant une résidence; certains échantillons proviennent de puits publics (prises d'eau municipales) ou abandonnés. Les échantillons ont été analysés pour 25 composantes inorganiques majeures, mineures et traces, ainsi que pour les isotopes stables ^2H et ^{18}O . Les résultats montrent une importante variabilité de certains paramètres mesurés *in situ*, de même que des paramètres analysés en laboratoire; le plus variable étant les fluorures. Ces variations influencent directement le respect des normes de potabilité.

Les résultats permettent de définir deux principaux faciès hydrochimiques sur les portions du territoire à l'étude : un type (Na-Ca)- HCO_3 dont le TSD moyen est de 300 mg/L et un type (Na-Ca)-Cl dont le TSD moyen est de 4000 mg/L. Les corrélations ioniques avec les chlorures suggèrent une signature marine pour 30 échantillons parmi les 62 échantillons de type (Na-Ca)-Cl. Ces échantillons sont tous du type Na-Cl. Leur localisation aux endroits où sont présentes les argiles de la Mer de Laflamme (10 000 ans BP) tend à confirmer la participation de l'eau de mer à la salinité des échantillons. La relation entre le calcium et le strontium des 32 autres échantillons suggère une origine crustale des ions dissous; la salinité serait alors acquise par l'interaction entre l'eau et la roche, soit la dissolution. Une anomalie locale en bore et en lithium à Chambord suggère que la composante marine identifiée pour ces échantillons provient de l'interaction avec les roches sédimentaires paléozoïques d'origine marine (calcaires et shale) présentes à cet endroit.

L'ensemble de ces observations corrélées à la géologie locale apporte des pistes de réflexion sur l'écoulement des eaux souterraines autour du lac Saint-Jean et permet d'expliquer en partie les variations dans la qualité naturelle des sources souterraines d'eau potable.

REMERCIEMENTS

Nombreuses sont les personnes qui ont contribué à cette étude, à commencer par les propriétaires de puits qui nous ont permis de faire couler l'eau parfois pendant de très longues minutes. Puis il y a ceux qui m'ont assisté sur le terrain lors de l'échantillonnage : Maryse Doucet, technicienne à l'UQAC, Jérôme Lavoie, étudiant à l'UQAC au baccalauréat en géologie, Julie Larouche, Réjean Godin, Sylvette Awoh et Philippe Tremblay qui étaient à l'époque des candidats à la maîtrise en sciences de la Terre. Ce projet n'aurait pas été possible sans la précieuse participation du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, par l'intermédiaire de M. Normand Rousseau à Québec et de M. Daniel Labrecque de la Direction régionale du Centre de Contrôle Environnemental ; ce dernier a mis à notre disposition 430 heures d'analyse dans les laboratoires du Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec. Je tiens aussi à remercier Alcan, aujourd'hui Rio Tinto Alcan, pour sa contribution monétaire de 5 000 \$, sans oublier la Fondation de l'UQAC (FUQAC) qui m'a généreusement octroyé une bourse de 3 000\$. Aussi, je remercie Dr Ian Clark de l'Université d'Ottawa, examinateur externe de ce mémoire, pour m'avoir ouvert les portes de son laboratoire d'analyses isotopiques (*GG HATCH Isotope Laboratory*) et m'avoir fourni l'aide nécessaire pour les analyses et l'interprétation qui en découle. Pour finir, je souhaite remercier le principal instigateur de ce projet, Dr Alain Rouleau, professeur d'hydrogéologie à l'UQAC et directeur de ce mémoire, d'abord pour ses idées, ses conseils scientifiques, techniques et didactiques, ensuite pour le financement des deux premières années du projet, et surtout pour sa très grande générosité et son infinie patience.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ANNEXES.....	ix
1 INTRODUCTION.....	1
2 DESCRIPTION DU TERRITOIRE ET DE LA GÉOLOGIE RÉGIONALE.....	5
2.1 DESCRIPTION DU TERRITOIRE.....	5
2.2 GÉOLOGIE RÉGIONALE.....	6
2.2.1 LE SOCLE ROCHEUX GRENVILIEN.....	6
2.2.2 LE SOCLE ROCHEUX PALÉOZOÏQUE.....	8
2.2.3 FRACTURATION DU SOCLE.....	10
2.2.4 LES DÉPÔTS MEUBLES.....	12
3 CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE AU SLSJ ET PROBLÉMATIQUE DES EAUX MINÉRALISÉES.....	16
3.1 INFORMATIONS SUR LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES AU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN.....	16
3.2 LES EAUX SOUTERRAINES MINÉRALISÉES DANS LE MONDE.....	19
3.2.1 DANS LE BOUCLIER CANADIEN.....	20
3.2.2 DANS LE SOCLE CRISTALLIN AILLEURS.....	20
3.2.3 AUTRES EXEMPLES : DANS LES SÉDIMENTS.....	21
3.3 HYPOTHÈSES EXPLIQUANT LA SALINITÉ DE L'EAU.....	22
4 DESCRIPTION DES SECTEURS ET DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE.....	24
4.1 CRITÈRES DE SÉLECTION DES PUIES.....	24
4.1.1 QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE.....	25
4.1.2 AQUIFÈRES EN MILIEUX FRACTURES.....	26
4.1.3 PUIES LOCALISÉS EN ZONE DE DÉCHARGE.....	26
4.2 DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DES SECTEURS D'ÉCHANTILLONNAGE... 26	26
4.2.1 ALMA.....	29
4.2.2 CANTON TREMBLAY.....	30
4.2.3 CHAMBORD.....	31
4.2.4 DOLBEAU.....	32
4.2.5 LAROUCHE.....	32
4.2.6 PÉRIBONKA.....	33
4.2.7 SAINT-AMBROISE.....	34
4.2.8 SAINT-GÉDÉON.....	34

4.2.9	ROBERVAL.....	35
4.2.10	SAINTE-JEANNE-D'ARC.....	35
4.2.11	SAINT-MÉTHODE.....	36
4.2.12	SAINT- NAZAIRE	36
4.2.13	SAINT-PRIME	37
5	MÉTHODOLOGIE.....	38
5.1	LA CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE.....	38
5.1.1	CRITÈRES D'ÉCHANTILLONNAGE.....	39
5.1.2	MATÉRIEL DE TERRAIN.....	41
5.1.3	CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS	43
5.2	PARAMÈTRES MESURÉS ET ANALYSES	45
5.2.1	PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE	45
5.2.2	ANALYSES CHIMIQUES ET LIMITES DE DETECTION.....	48
6	RÉSULTATS.....	51
6.1	CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES DONNÉES.....	51
6.1.1	BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS.....	52
6.1.2	DISCUSSION SUR LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	53
6.2	STATISTIQUES DESCRIPTIVES	54
6.3	VARIABILITÉS DES DONNÉES	59
6.3.1	VARIATIONS DES PARAMÈTRES DURANT LE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS	59
6.3.2	VARIATIONS DES PARAMÈTRES ANALYSÉS EN LABORATOIRE	61
6.3.3	LES CAUSES DE VARIATIONS	69
7	INTERPRÉTATION ET DISCUSSION.....	71
7.1	HYDROCHIMIE DES EAUX ECHANTILLONNÉES.....	71
7.1.1	LES TYPES D'EAU	72
7.1.2	DÉPASSEMENTS DES RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE AU CANADA.....	75
7.2	ORIGINES DES ESPÈCES CHIMIQUES DISSOUTES	77
7.2.1	REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LA GÉOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES	79
7.2.2	ÉTUDE DES DIAGRAMMES BINAIRES.....	82
7.2.3	ÉTUDE DES ISOTOPES STABLES DE L'EAU : ¹⁸ O ET ² H	92
7.3	DISCUSSION	93
7.3.1	ÉVOLUTION DE L'EAU SOUTERRAINE DU SOCLE ROCHEUX	97
7.3.2	LESSIVAGE DES ARGILES DE LA MER LAFLAMME.....	101
8	CONCLUSION	102
	RÉFÉRENCES.....	106

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Géologie du socle rocheux du Saguenay-Lac-Saint-Jean (modifiée d'Avramtchev, 1993)	7
Figure 2.2: Localisation de la région du Saguenay par rapport aux subdivisions de la Province de Grenville proposées par Rivers et al. (1989), (tirée de Hébert, 2004).	8
Figure 2.3: Graben du Saguenay et roches sédimentaires paléozoïques (tirée de Roy et al., 1993).	11
Figure 2.4: Linéaments du Saguenay-lac-Saint-Jean relevés sur images <i>Landsat</i> (Roy et Rouleau, 1999).	12
Figure 2.5: Carte synthétique des dépôts meubles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, adaptée de Lasalle et Tremblay (1978) et McCormack (1985).	13
Figure 2.6: Retrait glaciaire au Saguenay-Lac-Saint-Jean et dépôts fluvio-glaciaires, (tirée de LaSalle et Tremblay, 1978).	14
Figure 2.7: Limites de la mer Laflamme (tirée de Lasalle et Tremblay, 1978).	14
Figure 4.1: Carte des dépôts meubles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean présentant les secteurs d'échantillonnage et les municipalités où ils se situent (adaptée de Lasalle et Tremblay, 1978, et McCormack, 1985).	27
Figure 4.2: Géologie du socle rocheux de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean présentant les secteurs d'échantillonnage et les municipalités où ils se situent (adaptée d'Avramtchev, 1993)	28
Figure 6.1: Histogramme de l'erreur sur la balance ionique (%) des 96 échantillons	53
Figure 6.2: Comparaison des différentes valeurs centrales.....	56
Figure 6.3: Variation des paramètres mesurés <i>in situ</i>	60
Figure 6.4: Nombre de stations variant de 100% et plus par rapport à la moyenne arithmétique des 3 campagnes d'échantillonnage.....	63
Figure 6.5: Variabilité des fluorures entre les 3 campagnes d'échantillonnage à chaque station d'échantillonnage.....	64
Figure 6.6: Valeurs des moyennes arithmétiques pour chacune des campagnes d'échantillonnage pour l'ensemble des paramètres mesurés plus d'une fois	65

Figure 6.7: Nombre de paramètres mesurés (sur 21) à l'endroit d'une station et présentant une variation relative de 100% et plus par rapport à la moyenne arithmétique des 3 campagnes d'échantillonnage.....	67
Figure 6.8: Variations en mg/L des 21 paramètres chimiques qui ont servi à la caractérisation de la variation spatiale de la variabilité temporelle des stations 1 (a) et 18 (b).....	68
Figure 7.1: Diagramme de Durov illustrant les 4 faciès hydrochimiques des échantillons récoltés lors de cette étude.....	72
Figure 7.2: Localisation des types d'eau en fonction de la géologie simplifiée du Saguenay-Lac-Saint-Jean: a) type Ca-HCO ₃ , b) type Ca-Cl, c) Na-HCO ₃ et d) Na-Cl. ...	78
Figure 7.3: Relation entre les bromures (Br) et les chlorures (Cl) par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer.	84
Figure 7.4: a) Relation entre le sodium (Na) et les chlorures (Cl) et b) entre le calcium (Ca) et les chlorures (Cl).	84
Figure 7.5: Relation entre le calcium et le sodium.....	86
Figure 7.6: Relation entre le calcium et les bicarbonates.....	86
Figure 7.7: Relation entre le calcium et le strontium.....	87
Figure 7.8: Relation entre le potassium et le magnésium.....	89
Figure 7.9: Relation entre le lithium et les chlorures.....	91
Figure 7.10: Relation entre le bore et les chlorures.....	91
Figure 7.11: Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (‰) (modifiée de Frapé et Fritz, 1987).....	93
Figure 7.12: Raisonnement appliqué dans le cadre de cette étude.....	95
Figure 7.13: Localisation des échantillons anormaux en bore, présentant une signature d'eau de mer, présentant une signature d'interaction eau/roche et de type (Na-Ca)-HCO ₃ sur A) la carte du socle rocheux modifiée de Avramtchev (1993) et B) la carte des dépôts meubles simplifiée de Lasalle et Tremblay (1978) tirée de Mc Cormack (1985).....	96
Figure 7.14 Évolution géochimique des fluides dans les roches cristallines en fonction de la profondeur (Gascoyne et Kamineni, 1994).....	98
Figure 7.15: Cellules d'écoulement et influence d'une topographie irrégulière sur la taille de ces cellules (locale, intermédiaire et régionale) (tirée de Tóth, 1999).....	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Analyses chimiques des eaux souterraines des aquifères de Saint-Henri-de-Taillon (1) Saint-Nazaire (2) L'Ascension (3) Saint-Léon (4) (tiré de Dessureault, 1975)..	18
Tableau 3.2: Types et caractéristiques chimiques d'échantillons d'eau prélevés dans le Bouclier précambrien du Québec méridional (données tirées de Simard et Des Rosiers, 1979).....	18
Tableau 5.1: Numéro de stations, secteurs d'échantillonnage et numéros d'échantillons des trois campagnes (suite du tableau sur la page suivante).....	39
Tableau 5.2: Volume échantillonné, et conditions de filtration et de stockage selon les espèces chimiques à mesurer.	43
Tableau 5.3: Exemple de tableau de suivi des paramètres physico-chimiques.....	47
Tableau 6.1: Mesures statistiques des résultats d'analyse des échantillons des 3 campagnes d'échantillonnage.....	55
Tableau 6.2: Limites de détection des méthodes analytiques	58
Tableau 7.1: Dépassements des Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement – Santé Canada (2007) – de l'ensemble des échantillons	76

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A: Coupes stratigraphiques.....	112
ANNEXE B: Fiche terrain.....	120
ANNEXE C: Données brutes	123
ANNEXE D: Histogrammes et courbes cumulatives.....	140
ANNEXE E: Diagrammes en pointe de tarte.....	169
ANNEXE F: Matrice de corrélation.....	175

INTRODUCTION

La problématique de l'entreposage des résidus radioactifs a poussé de nombreux pays dans les années 70 à investiguer les propriétés de divers matériaux géologiques. La faible perméabilité des milieux fracturés cristallins en a fait un environnement propice à la recherche, ce qui a notamment permis d'approfondir les connaissances sur la chimie des fluides présents à de grandes profondeurs dans les roches cristallines (Fritz, 1997). À l'exception d'une zone à proximité de la surface, les eaux souterraines contenues dans les milieux cristallins sont connues pour être très minéralisées (Stober et Bucher, 2000). Des environnements aquifères associés aux roches cristallines sont connus dans divers endroits du monde et sont généralement exposés par les boucliers composés de roches magmatiques et métamorphiques d'âge précambrien (Gustafson et Krásný, 1994). Des cas de salinité élevée sont aussi retrouvés dans les sédiments (Barth, 2000) et dans certains cas, une origine marine est démontrée pour expliquer le fort contenu en chlorures de certaines eaux souterraines (Bottomley, 1994).

Sans toutefois compromettre significativement l'abondance d'eau souterraine de bonne qualité dans le territoire à l'étude, des eaux souterraines minéralisées ont été identifiées dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Dessureault, 1975; Simard et Desrosiers, 1979). Le roc qui occupe le territoire du Saguenay-Lac-Saint-Jean est très majoritairement précambrien, avec quelques lambeaux de roche sédimentaire d'âge paléozoïque composée de calcaires et de schistes argileux datés à l'ordovicien moyen (~ 450 Ma). Le socle rocheux présente plusieurs familles de structures cassantes suggérant un bon potentiel aquifère. De plus, sa topographie en cuvette peut concentrer des zones de décharge d'eaux souterraines profondes. La géologie régionale se caractérise aussi par la présence d'importants dépôts granulaires d'âge Quaternaire, qui constituent les aquifères connus les plus importants de la région, et de sédiments d'eau profonde de la mer de Laflamme (-10 000 ans) constitués de silt argileux ou d'argile silteuse grise identifiées à de la farine de roche. L'argile marine couvre la plus grande partie des zones habitées de la région, particulièrement au nord du Lac Saint-Jean. Pour Dessureault (1975), ces argiles sont à l'origine de la salinité d'eau souterraine retrouvée à certains endroits dans la région.

Les objectifs de ce projet s'articulent autour de quatre axes : 1) identifier des occurrences d'eau souterraine minéralisée autour du lac-Saint-Jean, 2) évaluer les variations hydrogéochimiques spatiales et temporelles des occurrences, 3)

proposer une origine probable des eaux souterraines minéralisées, et 4) corréler la géologie des secteurs échantillonnés avec la chimie de l'eau.

Les faciès des roches sont généralement bien connus sur l'ensemble des territoires alors que les caractéristiques chimiques des eaux souterraines ne sont connues qu'à la faveur des analyses chimiques, réalisées dans le cadre des rares campagnes de suivi, aux objectifs et finalités très divers. La caractérisation hydrogéochimique d'un système aquifère implique la détermination de la nature géochimique et isotopique de l'eau souterraine, et des différentes sources qui peuvent influencer sa composition. Ces sources vont des précipitations (pluie et neige) dans les zones de recharge, aux roches sédimentaires et roches cristallines fracturées en interaction avec l'eau le long du système d'écoulement et pouvant jouer le rôle d'aquifère.

Le présent mémoire constitue une première étape dans la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines autour du lac Saint-Jean. À l'aide de critères précis de sélection des puits (qualité de l'eau, type d'aquifères, contexte d'écoulement), 17 secteurs et sous-secteurs ont été visités, chacun présentant entre 1 et 7 stations. Pour ces secteurs, une connaissance sommaire et approximative de la géologie a été possible grâce aux informations contenues dans la banque de données du Système d'Information Hydrogéologique du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP,

2006). Les prélèvements d'eau souterraine ont été effectués à trois périodes de l'année pour un total de 96 échantillons. Selon le protocole d'échantillonnage élaboré pour cette étude, les paramètres mesurés *in situ* (pH, Eh, TSD, température et oxygène dissous) ont été suivis durant la purge du puits. Avec la titration des bicarbonates, 5 méthodes différentes ont été utilisées pour l'analyse de 25 espèces chimiques inorganiques et 2 isotopes stables de l'eau. En plus de mettre en pratique une méthodologie d'acquisition de données chimiques propre aux eaux souterraines, ce projet propose de mieux cerner et comprendre la géochimie des eaux souterraines de façon ponctuelle dans la région.

Afin d'appuyer le raisonnement présenté dans ce mémoire, nous traitons du portrait de l'occupation du territoire et de la géologie régionale dans le chapitre 2. Ce chapitre définit le cadre de référence des eaux souterraines à salinité élevée au Saguenay-Lac-Saint-Jean, présentées au chapitre 3, et sert de base pour l'identification et la description géologique des secteurs échantillonnés qui sont présentés au chapitre 4. La méthodologie d'échantillonnage et d'analyse est ensuite décrite au chapitre 5, suivie des résultats obtenus et de leur variabilité, présentés au chapitre 6. La signification des résultats et des premières interprétations, par rapport aux modèles publiés dans la littérature applicables au Saguenay-Lac-Saint-Jean, est discutée au chapitre 7, avant de conclure au chapitre 8.

DESCRIPTION DE LA GÉOLOGIE RÉGIONALE

Ce chapitre présente la géologie régionale du Saguenay-Lac-Saint-Jean, un élément déterminant pour caractériser son potentiel aquifère et la qualité naturelle des eaux souterraines.

2.1 DESCRIPTION DU TERRITOIRE

Le Saguenay–Lac-Saint-Jean constitue l'une des 17 régions administratives de la province de Québec. Avec son vaste territoire de 104 018 km², elle se situe au 3^e rang en superficie des régions du Québec. Les basses terres du Saguenay-Lac-Saint-Jean consistent en une dépression structurale inscrite à plus de 300 m au-dessous du massif montagneux des hautes terres du Bouclier canadien. Le climat dans les basses terres présente des précipitations annuelles moyennes d'environ 936 mm assez bien réparties au cours de l'année, dont le tiers sous forme de neige. La température moyenne au mois de juillet est de 18°C et de -15,8°C au mois de janvier (Gauthier, 1980).

2.2 GÉOLOGIE RÉGIONALE

Les roches de la région sont de deux âges : les roches cristallines précambriennes et les roches sédimentaires paléozoïques. De plus, ces formations sont recouvertes de dépôts non-consolidés d'âge Quaternaire.

2.2.1 LE SOCLE ROCHEUX GRENVILIEN

Les principales lithologies précambriennes grenvilliennes qui se trouvent dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (figure 2.1) correspondent à plusieurs phases d'injections magmatiques mésoprotérozoïques (~1500 et 1000 Ma) de masses anorthositiques, de plutons de composition felsique à intermédiaire et d'un complexe gneissique formé d'orthogneiss et de paragneiss (Hébert, 2004).

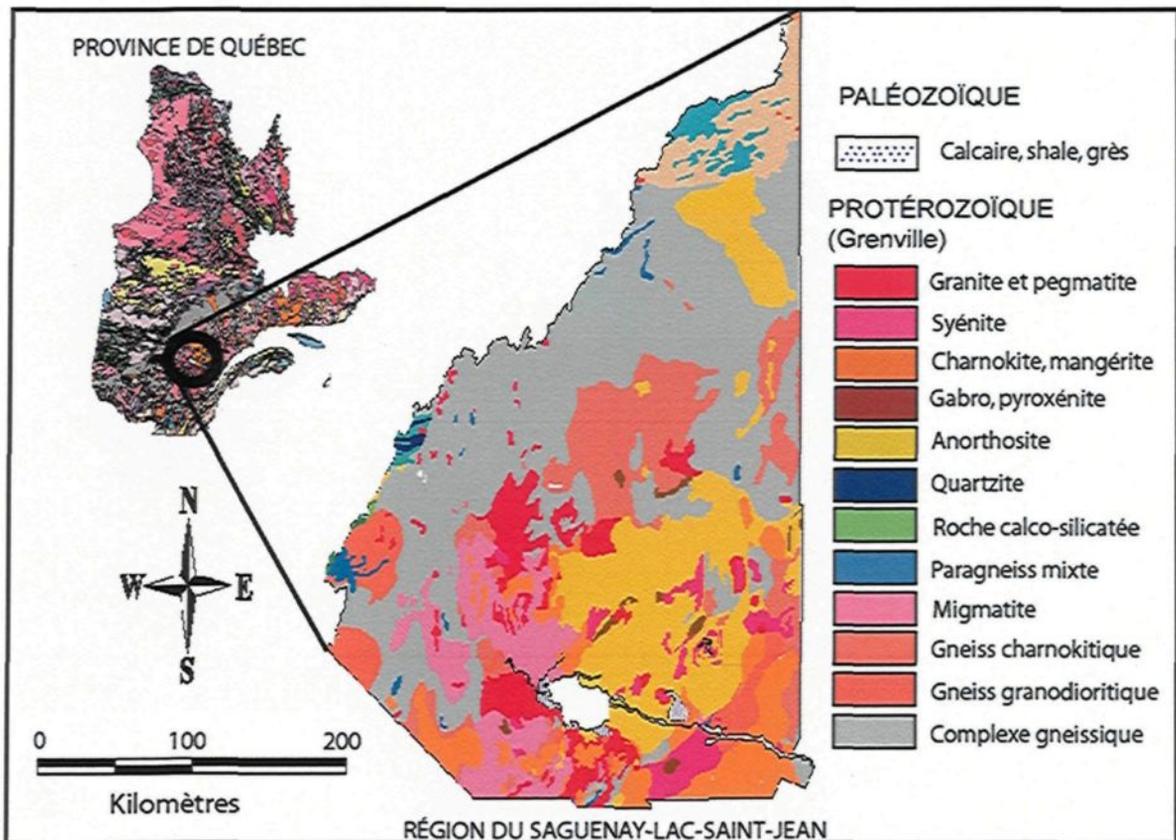


Figure 2.1: Géologie du socle rocheux du Saguenay-Lac-Saint-Jean (modifiée d'Avramtchev, 1993)

En fait, la région du Saguenay appartient à la Province de Grenville (Figure 2.2 ; Rivers et al., 1989) dont les roches sont caractérisées par un haut degré de métamorphisme régional, un faciès granulite localement rétro-métamorphosé au faciès amphibolite supérieur (Hébert, 2004). Elles contrastent nettement avec les roches de faciès schistes verts à amphibolite inférieur de la Province du Supérieur située au nord-ouest. La suite anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) compose une grande partie de la région étudiée.

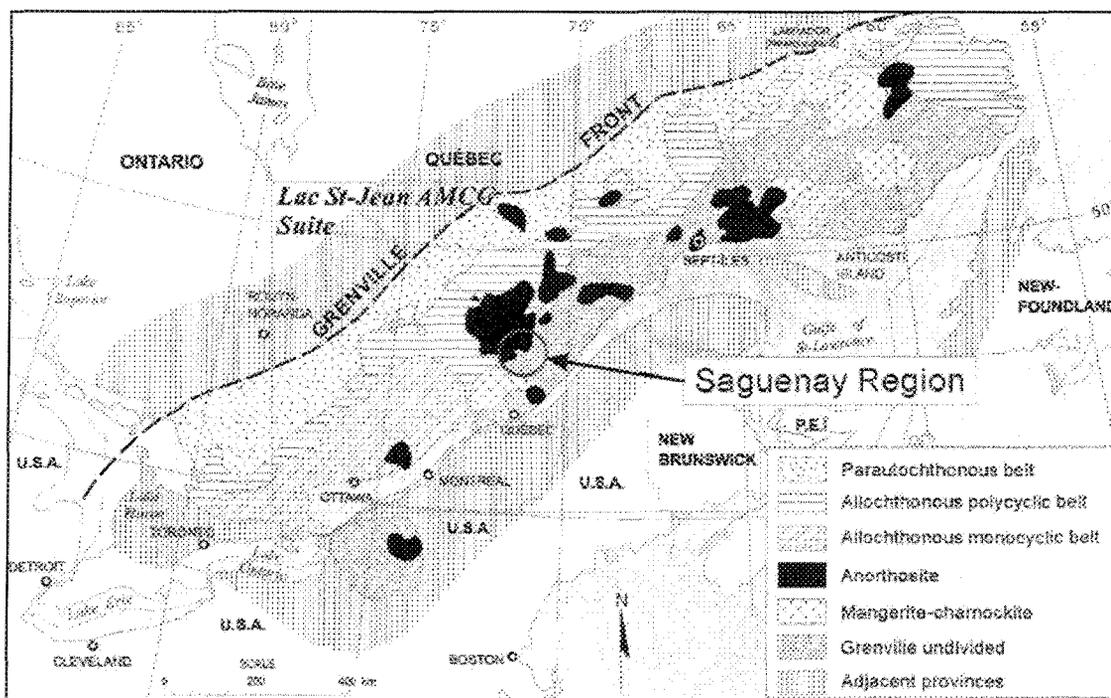


Figure 2.2: Localisation de la région du Saguenay par rapport aux subdivisions de la Province de Grenville proposées par Rivers et al. (1989), (tirée de Hébert, 2004).

2.2.2 LE SOCLE ROCHEUX PALÉOZOÏQUE

Le socle rocheux de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean comprend aussi des lambeaux d'érosion de composition calcaire et schiste argileux de l'Ordovicien moyen (~ 450 Ma), identifiés sur la figure 2.1. Ces roches sont les vestiges d'une mer chaude de l'Ordovicien, qui a recouvert certaines régions du Bouclier Canadien de 450 à 200 Ma. Ces roches paléozoïques se retrouvent dans les basses terres du Lac-Saint-Jean (au sud-ouest du lac) et du Saguenay (région de Saint-Honoré). Dans ces séquences ordoviciennes, plusieurs formations sédimentaires sont identifiées par Desbiens et Lespérance (1989). Elles consistent

généralement en des calcaires gris riches en fossiles marins, des calcaires argileux, des shales laminés et calcaireux, ainsi que des conglomérats et/ou des grès mal cimentés reposant directement sur le socle cristallin.

L'écoulement glaciaire et la présence de nombreux blocs erratiques de calcaire ordovicien dans la moraine de fond à proximité de Saint-Henri-de-Taillon (au nord-est du lac Saint-Jean) suggèrent leur présence dans la partie nord du lac-Saint-Jean (LaSalle et Tremblay, 1978). Il est donc possible que la région renferme d'autres lambeaux de ce type de lithologie. De plus, des forages aux environs de Péribonka et de Saint-Méthode ont révélé la présence de ce même calcaire (LaSalle et Tremblay, 1978).

En général les calcaires ordoviciens de la région ne semblent pas avoir développé de réseau karstique important depuis la fonte du glacier continental. Cependant, des fractures de dissolution marginale, jusqu'à une dizaine de centimètres d'ouverture, ont été observées localement; de plus, quelques cavernes et quelques sources dans les calcaires sont aussi connues, comme à Chambord et à Val Jalbert (LaSalle et Tremblay, 1978).

2.2.3 FRACTURATION DU SOCLE

Le socle grenvillien a été découpé le long du fleuve Saint-Laurent lors de la formation d'un rift produit par l'ouverture de l'océan Iapétus, il y a 600 Ma (Kumarapeli, 1985). À l'Ordovicien moyen (~ 450 Ma), l'orogénie Taconienne, soit la collision entre un arc insulaire et l'Amérique du Nord, et un événement d'extension plus tardif, tel que l'ouverture de l'actuel océan Atlantique (190-170 Ma), ont permis la réactivation des failles de l'ancien rift et des fractures associées datant de la période Iapétienne (Roy et al., 1993).

Cette tectonique cassante est à l'origine du graben du Saguenay au Phanérozoïque (figure 2.3), qui a permis la préservation des lambeaux des roches sédimentaires décrites plus haut. Le plancher du graben et les hautes terres qui le bordent montrent de nombreux linéaments sur les photographies aériennes et sur les images satellitaires (figure 2.4). Plusieurs des zones fracturées importantes de la région semblent reliées au graben du Saguenay qui est limité au nord par la faille Tchitogama et la faille de la rivière Sainte-Marguerite qui se prolonge jusqu'aux pieds des monts Valin, au sud, par la faille du lac Kénogami qui passe au pied du mont Lac-Vert et de la chute de Val-Jalbert au Lac-Saint-Jean. Ces accidents majeurs sont présentés en traits grossiers aux figures 2.3 et 2.4.

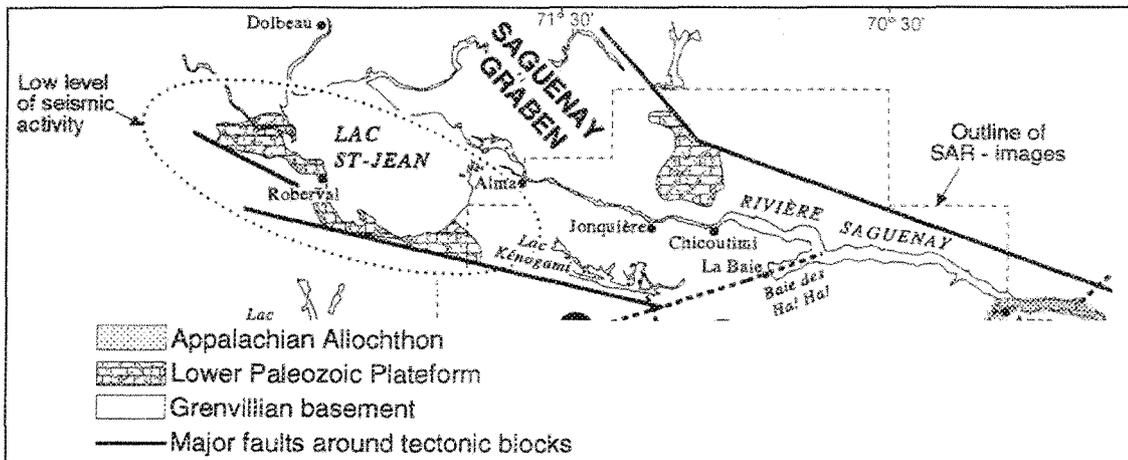


Figure 2.3: Graben du Saguenay et roches sédimentaires paléozoïques (tirée de Roy et al., 1993).

Plus localement, au Lac-Saint-Jean, Lamontagne (1993) fait ressortir trois groupes de directions préférentielles de discontinuités structurales (joints, failles, cisaillements ductiles) qui sont : 010-030, 110-125 et 145-170. Ce dernier suggère aussi que les patrons de fracturation sont influencés par le type d'unité lithostructurale et il identifie deux familles principales de fractures dont les orientations sont: 169° pendage 88° (correspondant à une ancienne fabrique grenvillienne); 110° pendage 81° (reliée au graben).

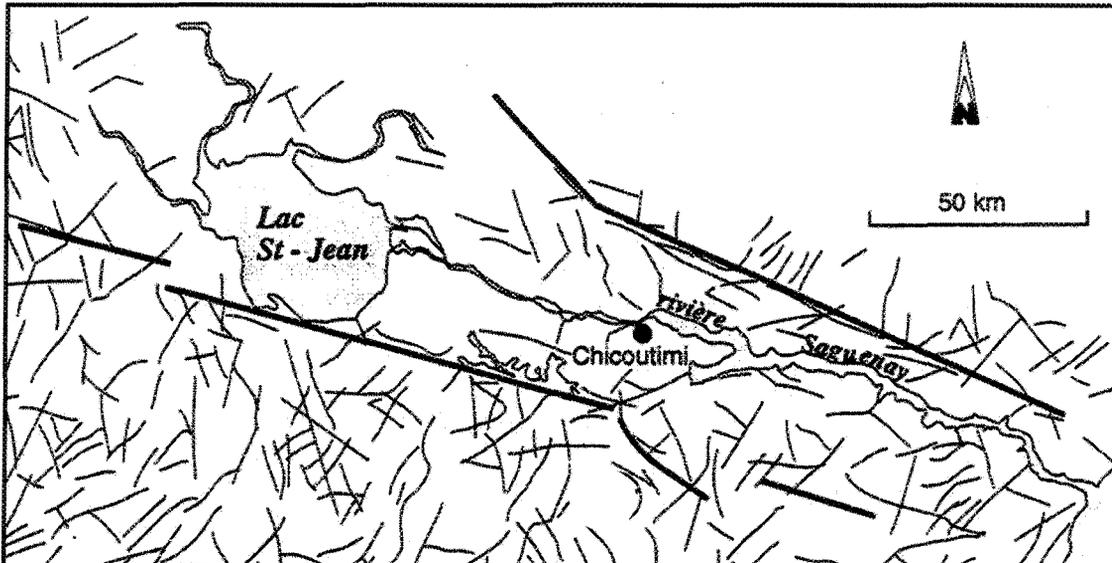


Figure 2.4: Linéaments du Saguenay-lac-Saint-Jean relevés sur images *Landsat* (Roy et Rouleau, 1999).

2.2.4 LES DÉPÔTS MEUBLES

Des dépôts de sable et de gravier, et d'argile (figure 2.5) représentent l'essentiel des dépôts meubles (Quaternaires) présents à la surface des terrains au Saguenay Lac-Saint-Jean.

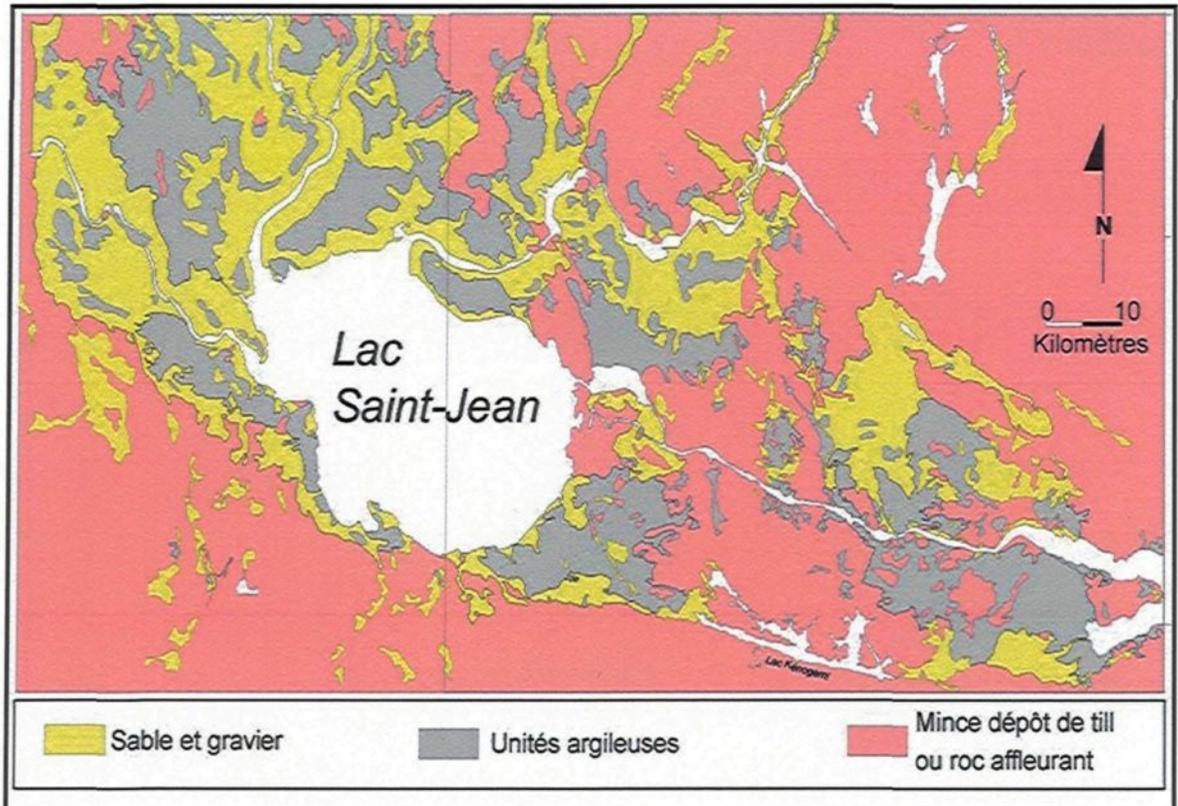


Figure 2.5: Carte synthétique des dépôts meubles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, adaptée de LaSalle et Tremblay (1978) et McCormack (1985).

Les relevés de LaSalle et Tremblay (1978) montrent que durant son recul vers l'ouest nord-ouest le glacier a laissé dans son sillage quelques cordons graveleux bien définis et d'imposants épandages fluvio-glaciaires qui permettent d'identifier des phases successives de retrait du glacier (figure 2.6). Suite au retrait des glaciers au Wisconsinien, il y a environ 10 000 ans, la région a été soumise à un envahissement marin par la mer de Laflamme (figure 2.7). Les sédiments d'eau profonde de la mer de Laflamme sont constitués de silt argileux ou d'argile silteuse grise, identifiées à de la farine de roche plutôt qu'à des argiles au sens minéralogique puisqu'elles proviennent de la décomposition et de l'abrasion des

roches du Bouclier précambrien (Bouchard et al., 1983). Ces sédiments sont relativement abondants dans les basses terres de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. L'argile couvre la plus grande partie des zones habitées de la région.

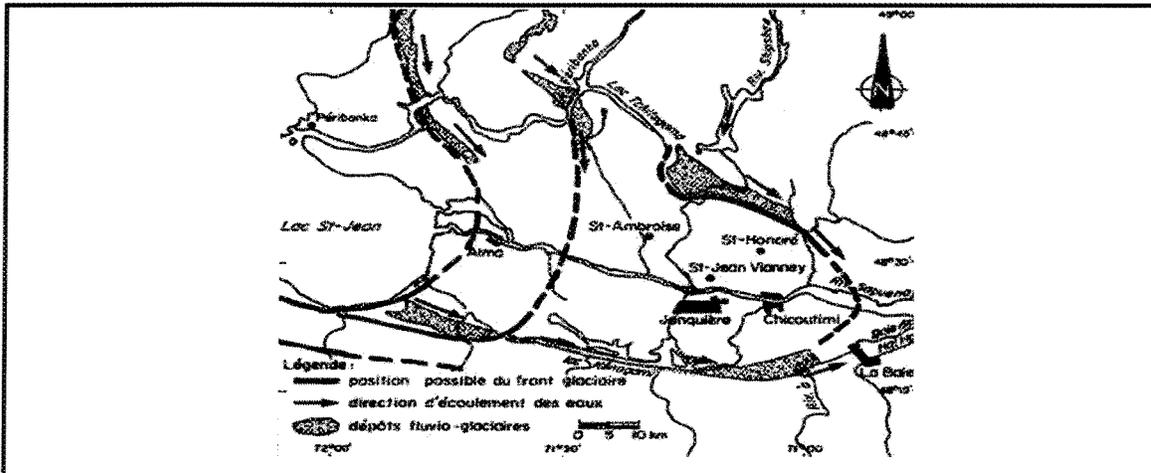


Figure 2.6: Retrait glaciaire au Saguenay-Lac-Saint-Jean et dépôts fluvio-glaciaires, (tirée de LaSalle et Tremblay, 1978).

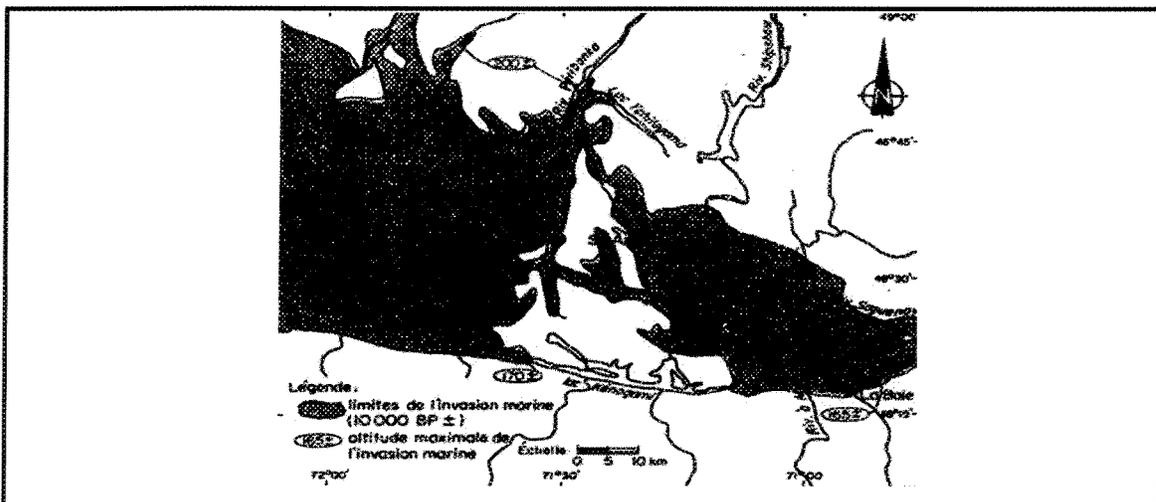


Figure 2.7: Limites de la mer Laflamme (tirée de Lasalle et Tremblay, 1978).

Dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ), aucune étude régionale n'a porté sur le potentiel aquifère des nombreuses zones fracturées du socle cristallin, ni d'ailleurs sur les limites précises des lambeaux de roches calcaires. Parmi les dépôts quaternaires de la région, le sable et le gravier constituent les aquifères les plus importants, alors que les importantes masses argileuses de la région constituent plutôt des couches aquitardes à aquicludes. En ce qui concerne le contenu, l'eau souterraine, sa chimie (i.e. sa qualité) peut changer selon le type d'aquifère considéré.

CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE AU SLSJ ET PROBLÉMATIQUE DES EAUX À SALINITÉ ÉLEVÉE

La région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ) présente une grande variété de type d'aquifère (chapitre précédent) Qu'en est-il de la qualité de l'eau souterraine en général ? Pour répondre à cette question il convient de revoir les informations existantes sur la qualité de l'eau souterraine au Saguenay-Lac-Saint-Jean (section 3.1) où des eaux souterraines salées ont été documentées, d'effectuer des comparaisons avec des cas de salinité élevée observés ailleurs dans le monde (section 3.2), ce qui peut-être expliqué par différentes hypothèses présentées dans la littérature (section 3.3)

3.1 INFORMATIONS SUR LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES AU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN

La qualité naturelle de l'eau souterraine est très peu documentée dans la région du SLSJ, bien que près de 28% de la population régionale soit alimentée par l'eau souterraine, et que de ce nombre, plus de 32% utilisent des puits

individuels (MENVQ, 1999). Au-delà de 1700 des quelques 6400 puits individuels existants ont fait l'objet d'un rapport de forage et sont enregistrés pour le territoire dans le Système d'informations hydrogéologiques du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, 2006). Mais les résultats des analyses, effectuées ponctuellement pour un seul ouvrage à la fois plutôt que pour l'ensemble, ne sont généralement pas compilés.

Dessureault (1975) a présenté une étude hydrogéologique de la région nord-est du Lac Saint-Jean. Cette étude est la seule synthèse hydrogéologique existante pour toute la région. Il a interprété et corrélé les résultats de quatre analyses complètes d'eau (tableau 3.1) provenant de forages atteignant le socle rocheux précambrien. Il n'est pas précisé dans ce rapport si l'eau en question provient du socle rocheux. Comme le montre le tableau 3.1, les analyses chimiques révèlent des eaux à généralement faible contenu en ions dissous, à l'exception de l'eau contenue dans l'aquifère de Saint-Léon qui est salée.

Simard et Des Rosiers (1979) ont présenté un survol des divers aquifères du Québec méridional, mettant l'accent sur la qualité des eaux souterraines basée sur 216 échantillons. Ils ont analysé une vingtaine d'échantillons d'eau provenant du socle précambrien, et ont défini quatre unités « hydrostratigraphiques » dans ce vaste domaine géologique, essentiellement en fonction des régions habitées, soit

1) le Témiscamingue, 2) l'Abitibi, 3) le Saguenay-Lac-Saint-Jean et 4) le reste du territoire (Tableau 3.2).

Tableau 3.1: Analyses chimiques des eaux souterraines des aquifères de Saint-Henri-de-Taillon (1) Saint-Nazaire (2) L'Ascension (3) Saint-Léon (4) (tiré de Dessureault, 1975).

Paramètres (mg/L; sauf pH)	Échantillons			
	1	2	3	4
Calcium	8.8	8.2	5.6	36.5
Magnésium	5.1	6.2	0.8	37.0
Fer	0.20	0.05	0.50	0.15
Carbonates	6.5	6.3		6.4
Bi-carbonates	286	248	23	370
Chlorures	8.5	17.5	3.5	813
Sulfates	3.0	2.8	1.5	122.5
Nitrates	0.9	0.7	0.9	0.0
Fluor	0.9	0.5	0.0	0.5
Sodium	98.0	92.0	2.9	610
Potassium	37.8	7.5	1	18
Solides dissous	290	320	50	1753
pH	8.5	8.4	6.9	8.4

Tableau 3.2: Types et caractéristiques chimiques d'échantillons d'eau prélevés dans le Bouclier précambrien du Québec méridional (données tirées de Simard et Des Rosiers, 1979).

	Témiscamingue	Abitibi	Saguenay-Lac-Saint-Jean	Ailleurs
Nombre de puits	5	6	3	6
Type (nombre d'échantillons)	HCO ₃ -Ca (4) HCO ₃ -Na (1)	HCO ₃ -Ca (6)	Cl-Na (2) HCO ₃ -Na (1)	HCO ₃ -Ca (3) HCO ₃ -Na (1) Cl-Na (1) Cl-Ca (1)
pH	7.5	7.5	8.5	7.4
Conductivité (mΩ/cm)	447	554	1300	375
TSD>1000 mg/L	0 / 5	0 / 6	1 / 3	0 / 6
Dureté>180 mg/L	2 / 5	4 / 6	1 / 3	0 / 6
Fer>0.3 mg/L	2 / 5	4 / 6	1 / 3	0 / 6
Chlore>250 mg/L	0 / 5	0 / 6	1 / 3	0 / 6
Fluor>1.5 mg/L	0 / 5	0 / 6	2 / 3	0 / 6

L'eau des vingt forages considérés dans le socle précambrien est le plus souvent légèrement alcaline (pH : 7,5), bicarbonatée (16/20), parfois chlorurée (4/20), et elle présente généralement une bonne potabilité chimique. Un bon nombre de cas de dureté élevée (>180 mg/L; 9/20) et de forte teneur en fer (>0.3 mg/L; 6/20) sont notés. Sur les quatre puits à eau chlorurée, deux sont situés au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les cas de teneur excessive en fluor (>1.5 mg/L; 2/20) et en chlore (>250 mg/L; 1/20), ainsi que le cas de salinité élevée (>1000 mg/L) sont également situés au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

En général, les documents présentés ci-dessus attestent de l'excellente qualité de l'eau souterraine au Saguenay-Lac-Saint-Jean et mentionnent seulement quelques cas locaux d'eau minéralisée. C'est précisément cette observation qui a attiré notre attention et qui fait l'objet de la prochaine section qui traite des eaux souterraines minéralisées dans le monde.

3.2 LES EAUX SOUTERRAINES MINÉRALISÉES DANS LE MONDE

Dans cette section nous présentons des cas d'eau souterraine à salinité élevée retrouvée dans le Bouclier Canadien (section 3.2.1), dans le socle cristallin ailleurs dans le monde (section 3.2.2.) et dans les sédiments (section 3.2.3)

3.2.1 DANS LE BOUCLIER CANADIEN

Des fluides de salinité élevée sont documentés dans le Bouclier précambrien Canadien avec des teneurs supérieures à 150 g.Cl.L^{-1} (grammes de chlorures par litre; Frape et al., 1984). Selon Fritz et Frape (1982), la teneur en solides dissous et la chimie des saumures contenues dans le Bouclier Canadien suggèrent que, dans le passé, une eau salée a pénétré le socle précambrien. Par la suite, la chimie originale de ces eaux salées a été modifiée par d'importantes interactions entre l'eau et la roche jusqu'à atteindre une signature géochimique finale indépendante de la première. Seule une étude isotopique permet de reconnaître la signature géochimique originale.

3.2.2 DANS LE SOCLE CRISTALLIN AILLEURS

Des fluides de salinité élevée sont aussi documentés dans le Bouclier Fennoscandien avec des teneurs dépassant 45 g.Cl.L^{-1} (Laaksoharju et al., 1995), ainsi que dans le cadre du programme européen de forages profonds continentaux (KTB : « Kontinentales Tiefbohrprogramm »), avec des salinités supérieures à 38 g.Cl.L^{-1} (Fritz and Lodemann, 1990). Parmi les ions majeurs, le sodium et le calcium sont les cations en plus forte concentration dans les eaux souterraines profondes du socle cristallin de la croûte continentale contenant des

concentrations élevées en chlorures (Edmunds et al. 1984; Gascoyne et al. 1987; Fritz 1997).

3.2.3 AUTRES EXEMPLES : DANS LES ROCHES SÉDIMENTAIRES

Considérons comme autre exemple l'étude des eaux souterraines dans une section du couvert sédimentaire de la fin du Paléozoïque (Permien) au début du Mésozoïque (Triasique) en Europe Centrale, soit dans le nord de la Suisse et dans le sud-ouest de l'Allemagne. Barth (2000) a distingué quatre types d'eau dans ces systèmes aquifères : 1) une eau salée dans les sédiments du Permien, 2) une eau saumâtre à salée dans les sédiments du Trias précoce, 3) une eau fraîche à salée dans les sédiments du Trias moyen, et 4) une eau salée dans les sédiments du Trias tardif. Les résultats des analyses hydrogéochimiques et isotopiques ont montré que l'évolution de ces eaux souterraines est contrôlée par leurs interactions avec les sédiments hôtes (évaporites, sulfates, carbonates et argiles) et des mélanges inter-aquifères. Toujours selon l'étude de Barth (2000), ces processus suggèrent aussi une perméabilité suffisante des aquifères pour avoir permis aux fluides de s'infiltrer à de grandes profondeurs et jouer un rôle important dans l'origine de la salinité des eaux souterraines du socle rocheux.

3.3 HYPOTHÈSES EXPLIQUANT LA SALINITÉ DE L'EAU

Les études hydrogéologiques initiées en 1977 dans une ancienne mine de fer à Stripa en Suède, ont soulevé d'importantes questions dont une sur l'origine de la salinité élevée de l'eau souterraine présente sur le site (Fritz, 1997) : « La salinité des eaux souterraines à Stripa et dans d'autres environnements de roches cristallines est-elle due aux interactions eau-roche *in situ*, ou bien le sel est-il importé d'environnements où sont présents des sédiments marins/évaporitiques? ». Fontes et al. (1989) avait mis de l'avant plusieurs hypothèses afin d'expliquer l'origine de cette salinité : 1) intrusion récente d'eau de mer, i.e. par un mouvement latéral; 2) intrusion de la Mer Baltique holocène; 3) dissolution d'évaporites ou contribution de saumures qui y sont associées; 4) circulation de fluides salinisés en milieu cristallin fracturé. Frapé et al. (1984) suggèrent un scénario où les réactions minéralogiques *in situ* sont responsables de la chimie des eaux à Stripa : l'évolution chimique des fluides dans les roches cristallines, ou bien le mélange d'eaux non-salines avec de petites quantités d'eaux très salées d'origine locale expliqueraient les fortes teneurs observées (700 g/L), ainsi que la signature Ca-Cl plutôt que la signature Na-Cl.

Pour Gascoyne et Kamineni (1994), aux plus grandes profondeurs du Bouclier Canadien (> 200 m.), l'accroissement de la salinité de l'eau souterraine est causé par la dissolution de chlorures de la matrice des roches en place et, en

certains endroits, par le mélange avec des saumures chlorurées sodiques de signature marine ou d'eau de formation de bassins sédimentaires.

Les ratios isotopiques du bore dans des saumures du Bouclier Canadien précambrien, ainsi que les rapports Br/Cl obtenus dans une étude de Bottomley et al. (1994) suggèrent que la plupart des chlorures sont d'origine marine plutôt que le produit de l'interaction entre l'eau et la roche. Cette origine pourrait dater de la dernière grande incursion marine au Paléozoïque, précisément au Dévonien précoce, il y a quelques 400 millions d'années.

DESCRIPTION DES SECTEURS ET DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE

Pour expliquer la salinité d'une eau souterraine, il convient de connaître le milieu physique dans lequel elle se trouve. Ce chapitre porte d'abord sur les critères qui ont été considérés lors de la sélection des secteurs d'échantillonnage (4.1). Ensuite, les secteurs et les stations retenues sont décrites (4.2).

4.1 CRITÈRES DE SÉLECTION DES PUITES

Le Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEP (2006) constitue la principale source publique d'information disponible pour identifier des stations d'échantillonnage en ce qui concerne les puits tubulaires creusés dans les aquifères rocheux et granulaires, qu'ils soient publics ou privés. Des études hydrogéologiques réalisées par des firmes d'experts conseil sont également d'excellentes sources d'information sur les captages municipaux d'eau souterraines; elles sont souvent disponibles directement auprès des municipalités qui ont commandé ces études. La qualité de l'eau des puits privés individuels n'est

pas toujours présentée dans ces sources d'information. Si certaines municipalités sont averties de cas de salinité anormale des eaux souterraines dans certains secteurs de leur territoire, ce sont les propriétaires privés qui sont souvent le plus au fait de cette problématique. La rencontre d'agents municipaux, des propriétaires de résidences isolées et la lecture des rapports géologiques disponibles ont donc permis de localiser des secteurs d'intérêt. La qualité de l'eau souterraine, le type d'aquifère échantillonné et le contexte hydrogéologique (recharge ou décharge des eaux souterraines) ont été des critères de sélection de puits qui ont constitué les sites d'échantillonnage. Ces critères sont présentés ci-dessous.

4.1.1 QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

À l'endroit de l'échantillonnage, l'eau souterraine devait présenter une qualité naturelle mauvaise à très mauvaise. Cette échelle qualitative met l'accent sur une salinité élevée et détectable au goût (TSD supérieur à 1000 ppm). Les cas de teneur élevée en H₂S (forte odeur d'œuf pourri) ont aussi été considérés lorsqu'ils étaient associés à une salinité anormale ou dans certains cas, lorsqu'ils présentaient une odeur très prononcée au point d'être presque intolérable.

4.1.2 AQUIFÈRES EN MILIEUX FRACTURÉS

L'eau ayant séjourné longtemps dans les milieux géologiques présente généralement les hautes salinités recherchées. Cette eau se trouve souvent dans des forages profonds aboutissant dans le socle rocheux. Les puits creusés dans le roc ont donc été privilégiés, sans toutefois négliger les cas éventuels de puits creusés dans un milieu granulaire, confinés par l'argile, lorsqu'ils contiennent une eau aux caractéristiques recherchées.

4.1.3 PUIITS LOCALISÉS EN ZONE DE DECHARGE

Selon le modèle de Tòth (1984) discuté au septième chapitre, les zones de décharge régionale des eaux souterraines sont propices à contenir l'eau minérale. Pour cette raison, les forages échantillonnés se trouvaient préférentiellement au voisinage des grands plans d'eau importants comme le Saguenay ou le lac Saint-Jean.

4.2 DESCRIPTION GEOLOGIQUE DES SECTEURS D'ÉCHANTILLONNAGE

Un secteur d'échantillonnage correspond à une partie du territoire dans laquelle une ou plusieurs stations peuvent être échantillonnées. Une station

d'échantillonnage correspond à un puits d'où peut être prélevé un échantillon d'eau souterraine.

Au total, 17 secteurs et sous-secteurs ont été visités, chacun présentant entre 1 et 7 stations (figures 4.1 et 4.2).

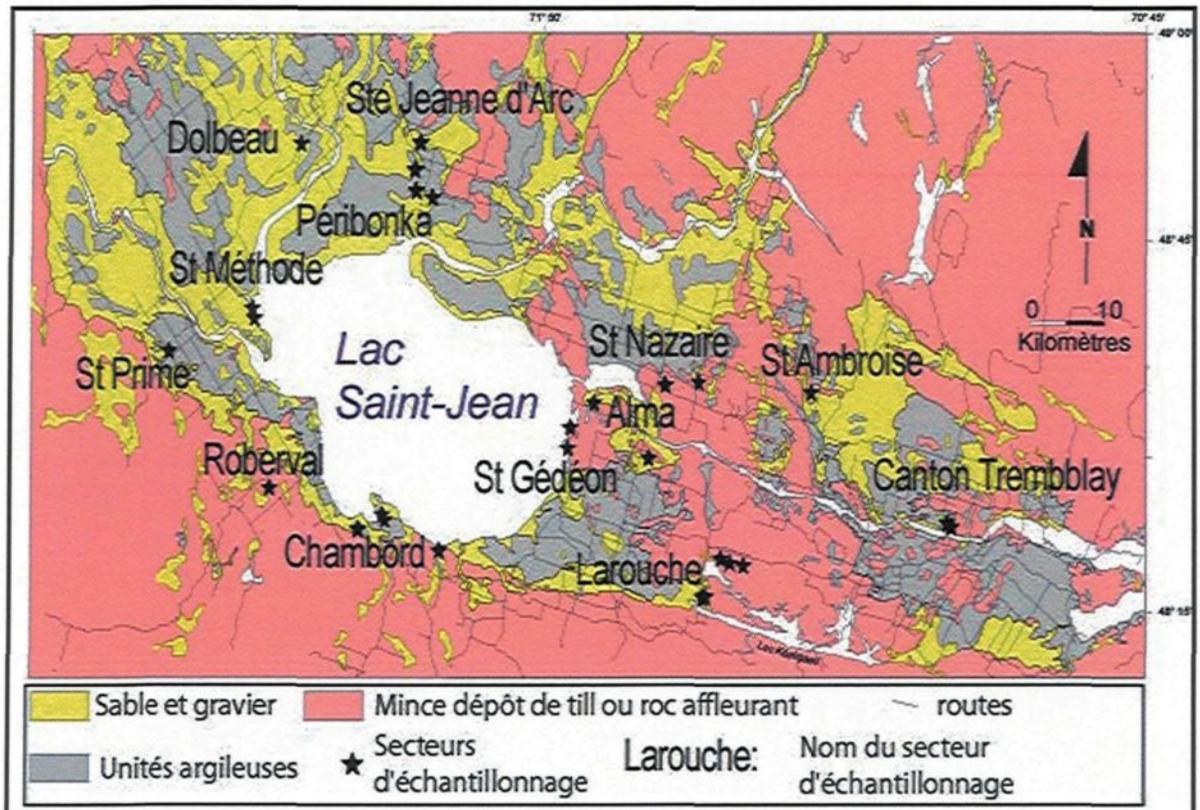


Figure 4.1: Carte des dépôts meubles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean présentant les secteurs d'échantillonnage et les municipalités où ils se situent (adaptée de Lasalle et Tremblay, 1978, et McCormack, 1985).

Pour un secteur donné, une étoile est utilisée pour chaque puits éloigné de plus de 5 km des autres puits du même secteur. Les cartes des dépôts meubles et du socle rocheux (figures 4.1 et 4.2) ont été présentées au chapitre 1.

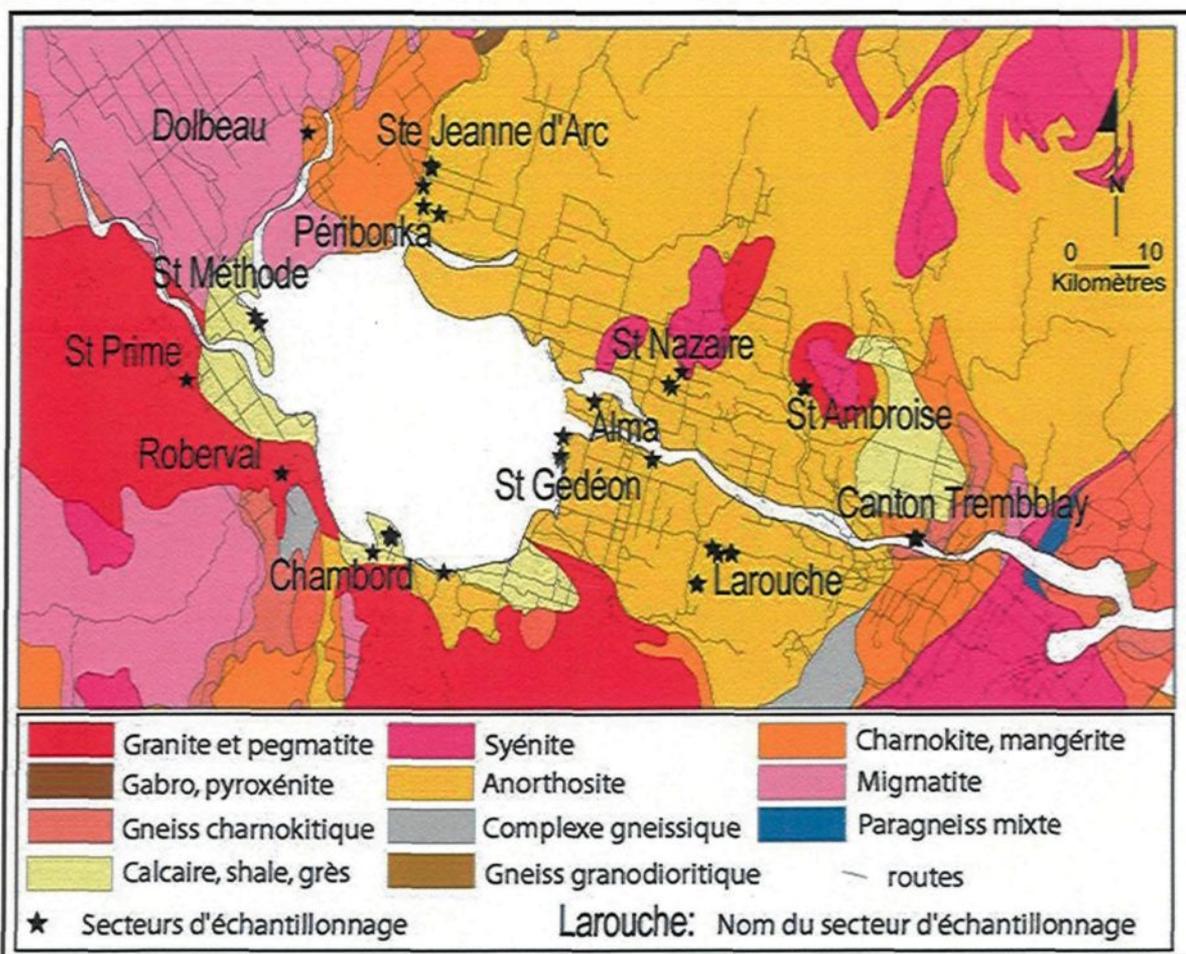


Figure 4.2: Géologie du socle rocheux de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean présentant les secteurs d'échantillonnage et les municipalités où ils se situent (adaptée d'Avramtchev, 1993)

À l'aide d'une sélection de puits dans la banque de données du SIH disponible sur le site du MDDEP, des coupes stratigraphiques ont été tracées dans

les secteurs où plusieurs puits ont été échantillonnés. Dans la banque de données, seule la profondeur du roc, les épaisseurs de niveaux d'argile, de sable et de gravier ont été considérées. Dans certains cas, les observations de terrain permettent de confirmer le type de roche ou de dépôt en surface suggérés par les coupes stratigraphiques. Les coupes stratigraphiques sont présentées à l'annexe A avec les numéros de stations d'échantillonnage de chaque secteurs. L'ensemble des informations est résumé dans la description ci-après des secteurs d'échantillonnage.

4.2.1 ALMA

Le secteur d'Alma peut être divisé en deux sous-secteurs : le sous-secteur Alma-Villebois, situé sur la rive sud du Saguenay vis à vis de la confluence de La Petite Décharge et du Saguenay, et le sous-secteur de l'île d'Alma (rive sud de la Grande décharge).

Le socle rocheux à Alma-Villebois présente une topographie accidentée et affleure à plusieurs endroits. Il est constitué principalement d'anorthosite. La roche de l'île d'Alma est aussi de composition anorthositique et des affleurements de granite et de gneiss ont été observés à proximité des puits. Une mince couche de mort-terrain recouvre le roc à Alma-Villebois. Le sous-secteur de la Dam-en-Terre se distingue de celui de Villebois par une topographie plane à légèrement

vallonnée, et par la présence de dépôts fluvio-glaciaires reposant directement sur le roc et dépassant 10 m par endroit.

Trois puits ont été échantillonnés dans le secteur d'Alma dont 1 à Alma-Villebois et 2 à l'île d'Alma. D'après les observations de terrain, le puits échantillonné à Villebois est foré dans le roc, sa profondeur est inconnue. Parmi ceux de la Dam-en-Terre, un puits a une profondeur de 93 m et finit dans le roc d'après l'information du SIH. La profondeur du second est inconnue, de même que le type de milieu aquifère d'où provient l'eau.

4.2.2 CANTON TREMBLAY

Ce secteur comprend 4 stations d'échantillonnage. La géologie du socle se compose essentiellement d'anorthosite et de gneiss charnockitique. Les puits sont localisés au pied d'un escarpement rocheux important sur la rive nord du Saguenay, ce qui suggère une faible épaisseur de dépôts meubles. Toutefois, aucun puits du SIH n'a été identifié ce qui restreint l'information sur la stratigraphie. D'après les propriétaires des puits échantillonnés, la profondeur des forages varie de 22m à 91m et ils se terminent tous dans le roc.

4.2.3 CHAMBORD

Le secteur de Chambord peut être divisé en trois sous-secteurs. Un puits a été échantillonné à l'entrée Est du village de Chambord (secteur Chambord-village), 4 puits ont été échantillonnés sur la Pointe Chambord, et 2 stations sont situées à la sortie ouest du village, précisément au Domaine du marais.

Le socle rocheux des environs du Domaine du marais est composé de roche anorthositique en contact avec des granites au sud et des calcaires paléozoïques à l'est et à l'ouest. Le socle rocheux présente une pente inclinée vers le Lac Saint-Jean. Au sud, le roc affleure abondamment et se présente souvent sous la forme d'escarpement rocheux. À l'endroit où les puits ont été échantillonnés, les dépôts meubles sont constitués de plusieurs niveaux de sable, gravier et argile en alternance. Localement leur épaisseur dépasse 40 m. Nous ne connaissons pas la profondeur des puits dans ce sous-secteur, toutefois, les propriétaires affirment qu'ils atteignent le roc.

Le socle rocheux du sous-secteur de Pointe Chambord et de Chambord-village est composé de dépôts paléozoïques. Des shales sont identifiés localement dans la banque de donnée du SIH. Contrairement à Chambord village, la surface topographique de Pointe Chambord est plutôt plane et aucun affleurement n'a été observé. Les dépôts meubles sont constitués de dépôts lacustres dépassant 20 m

d'épaisseur. L'argile est parfois présente en surface et repose généralement sur le roc. La profondeur du puits à l'entrée du village est inconnue, pour les autres, elle varie de 20 à 50 m. Leur propriétaire affirment que les puits atteignent tous le roc.

4.2.4 DOLBEAU

Un seul puits a été échantillonné dans ce secteur. La roche en place consiste en des migmatites en contact avec l'anorthosite du Lac Saint-Jean. Les dépôts meubles sont présents surtout à proximité de la rivière Mistassini en des niveaux d'argile et de sable d'une épaisseur totale pouvant dépasser 50 m. Le socle rocheux est plus profond à proximité de la rivière. La topographie en surface semble suivre celle du roc. Le puits échantillonné a une profondeur de 91m et aboutit dans le roc. Le propriétaire confirme ces informations.

4.2.5 LAROCHE

Deux sous-secteurs peuvent être distingués dans la municipalité de Larouche dû à la distance qui les sépare. Le premier secteur est situé à proximité de la route 170, entre le village de Larouche et l'arrondissement Jonquière de Saguenay, et 6 puits y ont été échantillonnés. Le second se trouve sur le bord du Lac Kénogami où nous avons prélevé l'eau de 2 puits.

Pour les deux sous-secteurs, le socle rocheux se compose d'anorthosite. Le roc affleure souvent. Les dépôts de sable et gravier sont peu épais dans le sous-secteur de Larouche-Jonquière qui présente une topographie accidentée. À proximité du lac Kénogami, les dépôts meubles sont plus épais et sont caractérisés par la présence de niveaux d'argile sur le roc ou inter-stratifiés avec du sable et du gravier. La topographie est plane. La profondeur des puits échantillonnés dans le sous-secteur de Larouche-Jonquière varie de 60m à 130m ; dans le sous-secteur de Larouche-Kénogami, la profondeur d'un des puits est inconnue, l'autre a une profondeur de 31 m. D'après les propriétaires, tous les puits terminent dans le roc.

4.2.6 PÉRIBONKA

Trois puits ont été échantillonnés dans le secteur de Péribonka. Le roc consiste principalement en de l'anorthosite à proximité du contact avec un peu de gneiss charnockitique dans la partie nord-ouest. La surface topographique présente une pente vers le sud-est qui semble suivre celle du roc. Les dépôts meubles sont du sable, du gravier et de l'argile. L'argile domine les premiers 25 à 30m à partir de la surface. Aux dires des propriétaires, un puits est profond de 57m et il aboutit dans le roc. La profondeur des autres puits est inconnue et le milieu d'où provient l'eau est inconnu.

4.2.7 SAINT-AMBROISE

Trois puits ont été échantillonnés dans ce secteur. La géologie du secteur est dominée par l'anorthosite avec un petit massif de granitoïdes calco-alcalins avec en plus la présence, à 10 km à l'est, de dépôts paléozoïques surmontant la carbonatite de Saint-Honoré. À proximité des puits, le socle est plus profond vers le sud-est et affleure par endroit vers le nord-ouest. La topographie de surface est très variable dans le secteur. Les dépôts quaternaires consistent en de l'argile, du sable et du gravier dont l'épaisseur totale des dépôts varie entre 1 et 40 m. Localement, l'argile repose sur le roc, du sable et du gravier sont présents en surface. Aux dires des propriétaires, les puits échantillonnés ont des profondeurs variant de 50 à 82m et terminent tous dans le roc.

4.2.8 SAINT-GÉDÉON

Dans le secteur de Saint-Gédéon, 4 puits ont été échantillonnés. Le roc du secteur est principalement constitué d'anorthosite et affleure par endroit. Sa topographie est plane. Le mort-terrain consiste en de minces dépôts de sable et d'argile d'épaisseur variable pouvant aller jusqu'à 7m. Les puits échantillonnés sont situés sur la rive du lac St Jean. D'après les propriétaires, ils possèdent une profondeur comprise entre 32 à 90 m et terminent dans le roc.

4.2.9 ROBERVAL

Deux puits ont été échantillonnés dans le secteur de Roberval. Le socle rocheux est composé principalement de roches granitiques qui sont exploitées en carrière à proximité des deux stations d'échantillonnage. La topographie du roc plonge vers le Lac Saint-Jean, ainsi que la surface des terrains. Les dépôts meubles consistent généralement en des niveaux peu épais de sable et/ou d'argile. Localement, le sable peut atteindre 20 m d'épaisseur. Au nord-est, sur la rive du Lac Saint-Jean, le socle rocheux est surmonté de dépôts paléozoïques. Des calcaires fossilifères ont été observés à cet endroit. Aux dires des propriétaires, la profondeur des puits varie de 64 à 106 m et aboutissent dans le roc.

4.2.10 SAINTE-JEANNE-D'ARC

Dans le secteur de Sainte-Jeanne-D'Arc, 4 puits ont été échantillonnés. Le roc consiste généralement en des gneiss charnokitique et de l'anorthosite. Ces masses intrusives présentent un contact orienté approximativement nord-sud. Les dépôts meubles sont constitués d'argile, de sable et de gravier. Les puits du SIH montrent dans l'ensemble une forte dominance des niveaux d'argile pouvant aller jusqu'à 50 m. La topographie est plutôt plane. Aux dires des propriétaires, les quatre puits échantillonnés ont des profondeurs de 22m, 25m, 33m et 61m. À ces

profondeurs et pour le secteur considéré, il semble que les puits puisent l'eau dans les niveaux de sable et de gravier. Nous suspectons aussi le confinement par l'argile des aquifères du secteur.

4.2.11 SAINT-MÉTHODE

Deux puits ont été prélevés dans le secteur de Saint-Méthode (Pointe de). Des dépôts paléozoïques reposent sur les roches du socle. Aucun affleurement n'a été observé sur le terrain. La topographie est plane dans le secteur et l'élévation du roc diminue vers le lac Saint-Jean. Les dépôts quaternaires sont épais et dépassent localement 30 m. Généralement, l'argile domine et repose directement sur le roc. Localement, de minces horizons de sable ou de gravier sont trouvés en surface ou entre deux niveaux d'argile. Les puits échantillonnés sont situés sur la rive du lac Saint-Jean. Aux dires des propriétaires, les puits sont forés dans le roc à des profondeurs de 73 et 85 m.

4.2.12 SAINT- NAZAIRE

Cinq stations ont été visitées dans le secteur de Saint-Nazaire. Le roc dans le secteur est principalement constitué d'anorthosite ainsi que d'intrusions tardives de composition syénitique, granitique et pegmatitique. Le roc affleure localement. Sa profondeur apparaît très irrégulière et par endroit, des dépôts fluvio-glaciaires

sont confinés par des épaisseurs variables d'argile. Du sable est aussi trouvé en surface. D'après les propriétaires des puits, les forages ont des profondeurs variant de 40 à 127m et terminent tous dans le roc.

4.2.13 SAINT-PRIME

Un seul puits a été échantillonné dans le secteur de Saint-Prime. La géologie du roc consiste en des granites et des pegmatites protérozoïques en contact avec des unités sédimentaires paléozoïques à l'est. La profondeur du roc est variable, elle augmente généralement en direction du lac Saint-Jean. La topographie en surface est vallonnée. Aucun affleurement n'a été observé sur le terrain. Les dépôts meubles sont composés de niveaux de sable, d'argile et de gravier dont l'épaisseur totale dépasse 20 m par endroit. La profondeur du puits échantillonné pour cette étude est inconnue mais les propriétaires affirment qu'il aboutit dans le roc.

MÉTHODOLOGIE

L'échantillonnage est une étape incontournable des études hydrogéochimiques. Les caractéristiques de la méthodologie employée sont déterminées en fonction des objectifs de l'étude. Dans ce chapitre, il est question dans un premier temps des divers aspects techniques de la campagne d'échantillonnage réalisée pour ce projet (section 5.1). Par la suite, les paramètres hydrogéochimiques mesurés sur le terrain et analysés en laboratoire sont présentés (section 5.2).

5.1 LA CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE

Outre les caractéristiques géologiques décrites précédemment et se rapportant aux stations d'échantillonnage, des caractéristiques techniques ont été définies pour permettre l'échantillonnage des puits dans l'atteinte de nos objectifs. Il aura fallu définir des critères d'échantillonnage permettant d'évaluer la variabilité hydrogéochimique spatiale et temporelle (5.1.1), sélectionner du matériel de terrain

adapté aux divers cas de figure (5.1.2) et fixer des étapes de conditionnement des échantillons afin d'optimiser la qualité et la fiabilité des résultats d'analyse (5.1.3).

5.1.1 CRITÈRES D'ÉCHANTILLONNAGE

La majorité des prélèvements d'eau souterraine ont été réalisés dans des puits privés, avec l'accord des propriétaires. Un certain nombre de prélèvements ont été effectués dans des puits publics (prise d'eau municipale) ou des puits abandonnés. Quarante sept stations ont été échantillonnées dans les 17 secteurs présentés au chapitre précédent. Les prélèvements d'eau souterraine ont été effectués à trois périodes de l'année, soit aux mois de novembre et décembre 2004, au mois de février 2005 et au mois de mai 2005, pour un total de 96 échantillons. Le tableau 5.1 présente l'ensemble des échantillons prélevés pendant les campagnes 1, 2 et 3, ainsi que les secteurs d'où ils proviennent et les numéros d'identification des stations qui leur sont associés.

Tableau 5.1: Numéro de stations, secteurs d'échantillonnage et numéros d'échantillons des trois campagnes (suite du tableau sur la page suivante)

Numéro de station	Campagnes d'échantillonnage			Secteurs d'échantillonnage
	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	
1	1JW03	2JW01	3JW18	Larouche-Jonquière
2	1JW06	2JW19	3JW12	Dam-en-terre
3	1JW08	2JW02	3JW26	Caton Tremblay
4	1JW09	2JW17	3JW24	Canton Tremblay
5	1JW14	2JW05	3JW08	Sainte-Jeanne d'Arc
6	1JW15	2JW06	3JW07	Sainte-Jeanne d'Arc
7	1JW16	2JW15	3JW06	Sainte-Jeanne d'Arc
8	1JW17	2JW07	3JW05	Sainte-Jeanne d'Arc

9	1JW18	2JW14	3JW09	Péribonka
10	1JW19	2JW04	3JW11	Péribonka
11	1JW20	2JW08	3JW35	Saint-Gédéon
12	1JW21	2JW09	3JW37	Saint-Gédéon
13	1JW23	2JW12	3JW16	Pointe Chambord
14	1JW26	2JW13	3JW15	Pointe Chambord
15	1JW32	2JW10	3JW32	Roberval
16	1JW33	2JW11	3JW31	Roberval
17	1JW38	2JW03	3JW10	Péribonka
18	1JW39	2JW16	3JW14	Villebois
19	1JW04	-	3JW19	Larouche-Jonquière
20	1JW05	-	3JW20	Larouche-Jonquière
21	1JW07	-	3JW23	Canton Tremblay
22	1JW10	-	3JW25	Canton Tremblay
23	1JW11	-	3JW01	Saint-Ambroise
24	1JW12	-	3JW03	Saint-Ambroise
25	1JW13	-	3JW02	Saint-Ambroise
26	1JW22	2JW18	-	Saint-Gédéon
27	-	2JW20	3JW13	Dam-en-terre
28	1JW28	-	3JW28	Saint-Méthode
29	1JW29	-	3JW29	Saint- Méthode
30	1JW30	-	3JW34	Larouche-Kénogami
31	1JW35	-	3JW30	Saint-Prime
32	1JW01	-	-	Saint-Nazaire
33	1JW02	-	-	Saint-Nazaire
34	1JW24	-	-	Domaine du marais
35	1JW25	-	-	Domaine du marais
36	1JW27	-	-	Pointe Chambord
37	1JW31	-	-	Larouche-Jonquière
38	1JW34	-	-	Larouche-Jonquière
39	1JW36	-	-	Chambord-village
40	1JW37	-	-	Larouche-Jonquière
41	-	-	3JW04	Saint-Nazaire
42	-	-	3JW17	Pointe Chambord
43	-	-	3JW21	Saint-Nazaire
44	-	-	3JW22	Saint-Nazaire
45	-	-	3JW27	Dolbeau
46	-	-	3JW33	Larouche-Jonquière
47	-	-	3JW36	Saint-Gédéon

Lors de la campagne 1, aux mois de novembre et décembre 2004, 39 échantillons ont été prélevés. Parmi les 39 stations échantillonnées, 9 n'ont plus été échantillonnées par la suite. En février 2005, pendant la campagne 2, seulement

20 échantillons ont été prélevés. Ce petit nombre est expliqué par l'accessibilité réduite à certaines stations durant l'hiver, ainsi que par des conditions impropres à un bon échantillonnage dans certains secteurs. Parmi les 20 stations échantillonnées lors de cette campagne, 19 avaient été échantillonnées lors la campagne 1. Lors de la campagne 3 au mois de mai 2005, nous avons prélevé 37 échantillons dans autant de stations, dont 18 stations avaient été échantillonnées aux deux autres campagnes, 11 stations avaient été échantillonnées lors de la première campagne seulement et 1 station lors de la campagne 2 ; finalement, 7 stations ont été échantillonnées pour la première fois.

5.1.2 MATÉRIEL DE TERRAIN

Pour la mesure du pH et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh), un pH-mètre/millivoltmètre muni d'une électrode combinée de platine a été utilisé. Que ce soit pour le pH ou le Eh, l'électrode a été étalonnée avant chaque mesure avec deux solutions tampons de pH connu et une solution tampon de Eh connu. Deux appareils de marques différentes ont été utilisés : un appareil de marque *Hach* pour la première campagne et un pH-mètre/millivoltmètre de marque *YSI* pour la seconde et la troisième campagne. Ces appareils ont aussi permis la mesure de la température.

L'oxygène dissous, exprimée en mg/L, ou en pourcentage de saturation, a été mesuré à l'aide d'un oxymètre portatif de marque *YSI* et un oxymètre portatif de marque *Hanna*. Ces deux appareils ont été utilisés simultanément à partir de la moitié de la première campagne et lors des deux suivantes afin de valider les mesures. Avant chaque série de mesure les appareils ont été étalonnés selon les modes d'emploi.

La mesure de la conductivité électrique permet d'évaluer la minéralisation globale d'une eau. Elle est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à une température de référence généralement de 25°C . Le conductivimètre *Hach* qui a été utilisé est doté de capteurs de conductivité et de température montés sur une électrode résistante aux chocs. Il fournit une valeur de la conductivité automatiquement corrigée pour la température. De plus, cet appareil permet aussi la conversion de la conductivité de l'eau en « total des solides dissous », le TSD, exprimé en mg/L. Le facteur de conversion de la conductivité en TSD appliqué par l'appareil est 0,5. Un facteur de 0,75 doit être appliqué manuellement lorsque la teneur en sulfates est supérieure à 100 mg/L. Lorsque la teneur en chlorures est supérieure à 180 mg/L le facteur passe à 0,9. Idem lorsque la teneur en calcium ou en sodium est supérieure à 200 mg/L.

Le débit d'extraction de l'eau du puits a été estimé en mesurant le temps requis pour remplir un contenant de 20 litres. Le niveau d'eau dans le puits était mesuré à l'aide d'une sonde électrique du niveau piézométrique, laquelle émet un

signal acoustique au contact de l'eau. Lorsque l'échantillonnage était effectué dans des puits abandonnés ou un puits jaillissant, une pompe submersible de marque Waterra de type *Double stage WSP-12V-2* fonctionnant sur batteries 12V longue charge a été utilisée. Son utilisation pour l'échantillonnage d'un puits jaillissant permet de contrôler le débit d'échantillonnage. La pompe et les batteries étaient systématiquement apportées sur le terrain.

5.1.3 CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

Pour l'échantillon d'un puits, un volume minimal d'eau doit être prélevé, celui-ci doit parfois être filtré, parfois il doit être acidifié et il doit toujours être stocké adéquatement. Le tableau 5.2 présente les conditions de filtration et de stockage, ainsi que les volumes échantillonnés selon les espèces chimiques à mesurer.

Tableau 5.2: Volume échantillonné, et conditions de filtration et de stockage selon les espèces chimiques à mesurer.

Flacon	Volume (ml)	Filtration	Ajout à l'échantillon	Paramètres
A	500	Oui	Aucun	Anions
B	250	Oui	Aucun	Bromures
C	125	Oui	HNO ₃ (pH solution < 4)	Métaux
D	100	Non	Aucun	Isotopes
E	250	Non	Aucun	HCO ₃ ⁻ (titration)
F*	150	Oui	NaOH (pH solution >12)	Sulfures (H ₂ S)

*préservatif : 2 ml d'acétate de zinc 0.1M pour 100 ml

LA FITRATION

L'eau a été prélevée à travers un filtre *Waterra FHT-45* composé de polyethersulphone 0.45 micron, ce qui permet d'éviter les échanges gazeux. Cette opération retire la majorité des bactéries, la plupart des particules argileuses et une proportion des oxyhydroxydes de fer et de manganèse.

L'ACIDIFICATION

Pour l'analyse des métaux, le pH des échantillons doit être inférieur à 4 et pour l'analyse des sulfures, le pH doit être supérieur à 12. Les flacons d'échantillonnage de 125ml destinés aux analyses des ions métalliques ont été préalablement acidifiés avec 5ml de HNO_3 pour abaisser le pH à la valeur souhaitée. Dans le cas des sulfures, quelques gouttes de NaOH ont été ajoutées aux échantillons de 125ml au moment de l'échantillonnage, ce qui a permis d'augmenter suffisamment le pH. Les sulfures étant naturellement présents sous la forme gazeuse, H_2S , environ 2ml d'acétate de zinc ont été ajoutés aux échantillons pour les faire précipiter.

LE STOCKAGE

Le stockage des échantillons constitue la dernière étape de l'échantillonnage. Les échantillons ont été placés dans une glacière qui permettait de les maintenir au frais à l'aide de sac de glace et de les préserver totalement de la lumière, des poussières et des salissures. Le transport s'effectuait par courrier

express (24h). Au laboratoire, les échantillons ont été conservés au réfrigérateur entre 3 et 5°C.

5.2 PARAMÈTRES MESURÉS ET ANALYSES

Le protocole d'échantillonnage de cette étude est d'abord présenté (section 5.2.1), puis sont décrites les méthodes d'analyses et leur limite de détection pour les divers paramètres analysés en laboratoire (section 5.2.2).

5.2.1 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE

Deux volets sont distingués dans le protocole d'échantillonnage : le suivi des paramètres mesurés *in situ* lors de la purge du puits (5.2.1.1) et les autres données récoltées au moment de l'échantillonnage (5.2.1.2)

5.2.1.1 PARAMÈTRES MESURÉS *IN SITU* ET PURGE DU PUIITS

Certains paramètres, comme la température et le pH, sont très difficiles à maintenir constants pendant la conservation des échantillons et doivent être mesurés immédiatement sur le terrain. C'est aussi le cas de la conductivité électrique, du total des solides dissous (TSD), du potentiel REDOX, de l'oxygène

dissous et de l'alcalinité (HCO_3^-). Cet ensemble constitue les paramètres physico-chimiques qui doivent être mesurés *in situ*. Selon le protocole d'échantillonnage élaboré pour cette étude, les paramètres *in situ* sont suivis durant la purge du puits qui consiste en l'évacuation du volume d'eau contenu dans le tube du puits. Les mesures *in situ* sont idéalement effectuées à l'aide d'une cellule d'écoulement à débit faible et constant. Dans ce projet-ci cette cellule est constituée d'un sceau de 20 litres dans lequel coule en continu l'eau du puits. Après avoir été calibrées, les sondes mesurant les paramètres physico-chimiques sont introduites dans l'eau non turbulente et une mesure est prise environ aux 5 minutes selon la variabilité des valeurs. Lorsque les mesures se répètent, le puits est considéré purgé et l'eau peut être échantillonnée. Le tableau 5.3, tiré d'une fiche de terrain, illustre la façon dont les paramètres ont été suivis. Sur cet exemple, la purge a duré 18 minutes à 11,5 l/min. Les paramètres se sont rapidement stabilisés. Les bicarbonates (HCO_3^-) font l'objet d'une seule mesure obtenue par titration moins de 24h après l'échantillonnage. Le niveau d'eau, le débit et le volume total pompé sont aussi des paramètres de suivi de la purge du puits. La couleur, l'odeur, le goût et la turbidité sont évalués qualitativement tout au long de la purge.

Tableau 5.3: Exemple de tableau de suivi des paramètres physico-chimiques

Suivi des paramètres :										
Couleur :		Odeur :		Goût :		Turbidité :				
Heure	Niveau d'eau* (m)	Débit (l/min)	Total pompé (g)	T° (°C)	Eh (mV)	pH	O ₂ (mg/l)	Conz (µS/cm)	TDS (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)
17/11	2.7	11.5		6.5	-93.3	8.1	0	4.20	2.1	
17/11	2.7			7.3	-95.2	8.0	0	4.20	2.1	
17/11				7.3	-95.7	8.0	0	4.20	2.1	
17/11				7.4	-96.0	8.0	0	4.20	2.1	
17/11				7.4	-96.0	8.1	0	4.21	2.1	

5.2.1.2 AUTRES DONNÉES RECOLTÉES LORS DE L'ÉCHANTILLONNAGE

Le modèle de fiche de terrain élaboré dans le cadre de cette étude est présenté à l'annexe B. Les conditions météorologiques au moment de l'échantillonnage, les coordonnées GPS du puits, le numéro d'échantillon, la date de prélèvement et le nom des préleveurs ont été inscrits à chaque nouvelle station. Lorsque disponibles, des informations sur le puits sont fournies par le propriétaire de l'ouvrage de captage. Il s'agit du nom du puisatier, de la date de réalisation du puits, de la profondeur approximative du forage, de la stratigraphie des terrains traversés et de la profondeur de la pompe dans le puits. De plus, l'emplacement du puits est schématisé et photographié à des fins d'archivage. Des informations sur l'utilisation et la disponibilité de l'eau souterraine sont aussi consignées, mais à titre informatif uniquement. Les propriétaires ont aussi été interrogés sur l'utilisation

éventuelle d'adoucisseur d'eau ou d'autres systèmes de traitement de la ressource, lesquels devaient être court-circuités lors de l'échantillonnage.

5.2.2 ANALYSES CHIMIQUES ET LIMITES DE DÉTECTION

Avec la titration des bicarbonates, 5 méthodes différentes ont été utilisées pour l'analyse de 25 espèces chimiques inorganiques et des 2 isotopes stables de l'eau. Les plupart des éléments ont été analysés dans les laboratoires du MDDEP à Québec et à Montréal, la titration a été effectuée au laboratoire de géochimie de l'UQAC, les anions bromures ont été analysés dans les laboratoires de chimie du Cegep de Jonquière et les isotopes stables de l'eau ont été mesurés au laboratoire de géochimie isotopique de l'Université d'Ottawa.

5.2.2.1 ANALYSE DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS

Pour les métaux et les anions, le délai de conservation dans le flacon est de 30 jours. Les sulfures doivent être envoyés dans les 7 jours suivant l'échantillonnage, après ce délai le laboratoire ne certifie plus les résultats. Les méthodes d'analyse présentées ci-dessous peuvent être consultées en ligne à l'adresse suivante : http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/chimie_inorg.htm. Les analyses ont été effectuées pour les éléments de chimie inorganique suivants :

- Par ICP-OES (*Inductively coupled plasma – optical emission spectroscopy*): aluminium, arsenic, bore, baryum, calcium, chrome, cuivre, fer, potassium, magnésium, manganèse, sodium, nickel, plomb, zinc, silice, strontium, lithium ;
- Par colorimétrie avec chlorure ferrique et oxalate du diméthyl-p-phénylène diamine : les sulfures ;
- Par chromatographie ionique : les anions chlorures, fluorures et sulfates.

5.2.2.2 LA TITRATION DE L'ALCALINITÉ

L'alcalinité de l'eau est causée par la présence des ions carbonates et bicarbonates et correspond à la capacité de la solution à neutraliser les acides. La méthode de titration à l'acide sulfurique utilisée est décrite par Bédard (2000) et HACH (1989). La quantité d'acide utilisée pour atteindre le point d'équilibre acido-basique de la solution (pH = 7) est convertie en alcalinité totale, exprimée en mg/L de CaCO₃, qui est ensuite convertie en mg/L de HCO₃ par un facteur multiplicateur de 1,22.

5.2.2.3 L'ANALYSE DES ANIONS BROMURES

Les bromures ont été analysés par chromatographie ionique. Les échantillons d'eau sont injectés et entraînés par une solution de carbonate de sodium dans une colonne chromatographique. Les anions sont séparés en fonction de leur affinité relative pour le matériel de la colonne et sont ensuite dirigés dans une solution régénératrice. Ils sont alors convertis dans une forme fortement conductrice et dosés à l'aide d'un détecteur conductivimétrique. La conductivité mesurée est proportionnelle à la concentration des anions bromures dans l'échantillon.

5.2.2.4 LES ISOTOPES STABLES DE L'EAU

Les isotopes stables de l'oxygène (^{18}O) et de l'hydrogène (^2H) ont été analysés par spectrométrie de masse (*IRMS : Isotope ratio mass spectrometry*). Parmi les 96 échantillons prélevés pour cette étude, 43 ont été sélectionnés pour les analyses isotopiques.

6

RÉSULTATS

Une fois les résultats d'analyse obtenus, ces derniers doivent être vérifiés. Ce chapitre traite dans un premier temps du contrôle de la qualité des données (6.1), de statistiques descriptives des résultats (6.2), et de leur variabilité (6.3). Les résultats bruts des analyses chimiques sont présentés à l'annexe C.

6.1 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES DONNÉES

L'électroneutralité est une propriété fondamentale des solutions aqueuses. Cette propriété consiste en l'égalité mathématique entre la somme des cations et la somme des anions, exprimés en milliéquivalent par litre d'eau (méq/L). Les résultats fournis par le laboratoire, exprimés en milligrammes par litre d'eau (mg/L), sont convertis en méq/L en divisant la valeur en mg/L par le rapport de la masse de l'élément ou du composé sur sa valence, c'est-à-dire la masse équivalente de l'ion (Banton et Bangoy, 1999).

6.1.1 BALANCE IONIQUE DES ÉCHANTILLONS

La balance ionique s'exprime en pourcentage d'erreur et se calcule par le rapport de la différence des anions et des cations sur leur somme, le tout est multiplié par 100. soit :

$$B.I (\%) = [\Sigma (\text{cations}) - \Sigma (\text{anions}) / \Sigma (\text{cations}) + \Sigma (\text{anions})] \times 100 \quad (1)$$

La valeur du pourcentage obtenu peut être positive ou négative selon que la somme des ions la plus grande est celle des cations ou des anions. Freeze et Cherry (1979) recommande une limite supérieure de 5% d'erreur sur la balance ionique. Pour une erreur inférieure à 5%, l'analyse est considérée acceptable, dans le cas contraire, elle est rejetée ou remise en question. La figure 6.1 est un histogramme de la balance ionique, exprimée en pourcentage d'erreur, en fonction du nombre d'échantillons. Au total, 73 échantillons sont compris dans l'intervalle -5% à 5% et 23 échantillons dépassent ces limites.

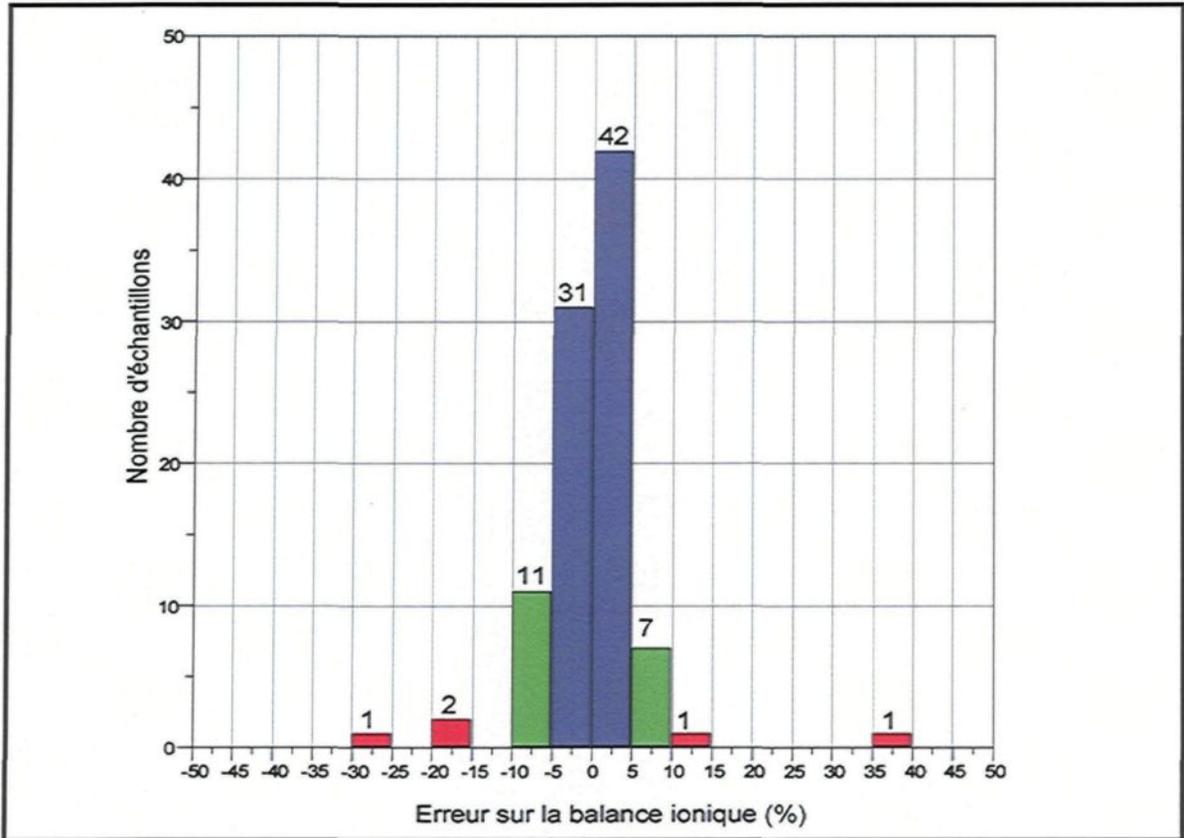


Figure 6.1: Histogramme de l'erreur sur la balance ionique (%) des 96 échantillons

6.1.2 DISCUSSION SUR LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Le déséquilibre d'une analyse à la faveur des anions ou des cations peut être expliqué par une analyse incomplète, par des erreurs lors de l'analyse ou par une eau non équilibrée avec son milieu. La seule façon de lever le doute serait de refaire une analyse (Banton et Bangoy, 1999). Il est aussi recommandé de contrôler le laboratoire d'analyse à l'aide de « blancs » et de standards insérés aléatoirement parmi les échantillons. Faute de pouvoir contrôler adéquatement les résultats, l'intervalle de fiabilité de l'erreur sur la balance ionique a été augmentée

à +/- 10%. Parmi les 96 échantillons prélevés, 5 ont été rejetés dû à un déséquilibre trop important entre les anions et les cations en solution.

6.2 STATISTIQUES DESCRIPTIVES

Pour chaque paramètre mesuré, la moyenne arithmétique et géométrique, la médiane, la valeur maximale (max), la valeur minimale (min), ainsi que le coefficient de variation (C.V) sont présentés dans le tableau 6.1 (distribution unimodale présumée). Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel WinSTAT ® Version 3.0 (Kalmia, 1991-1994) et vérifiés à l'aide des formules statistiques de valeurs centrales présentées dans le manuel de Baillargeon (1990). Il arrive que le nombre d'échantillons (N) qui a servi aux calculs soit différent de 91. Dans ce cas, il apparaît en caractère gras dans le tableau 6.1. Pour l'oxygène dissous, une des mesures n'a pas été prise sur le terrain, pour les sulfures d'hydrogène, seulement 23 échantillons ont été analysés, pour l'arsenic et le chrome, ils ont été mesurés seulement lors de la première campagne. Lorsque la valeur centrale est inférieure à 1, la moyenne géométrique ne peut être calculée, ce qui explique qu'aucune valeur n'est enregistrée pour le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), de l'oxygène dissous, du fer, du manganèse, du baryum et du bore. Le Eh n'a pas donné de coefficient de variation significatif dû à un grand nombre de valeurs négatives. Dans le cas de l'arsenic et du chrome, tous les échantillons ont donné les mêmes valeurs ce qui rend le calcul du C.V impossible.

Tableau 6.1: Mesures statistiques des résultats d'analyse des échantillons des 3 campagnes d'échantillonnage

Paramètres	N	Moyenne arithmétique	Médiane	Moyenne géométrique	Min	Max	C.V (%)
Température (°C)	91	8.1	7.5	7.9	4.9	14.1	2.2
TSD (mg/L)	91	2879	2322	1431	104	20776	12.0
Cond. Spéc. À 25°C (uS/cm)	91	3335	2580	2010	209	23085	11.2
pH	91	7.6	7.7	7.5	3.6	9.5	1.5
Eh	91	-25	-13	-	-375	180	-
Oxygène dissous (mg/L)	90	0.75	0.13	-	0	12.6	29.1
Li (mg/L)	91	0.047	0.02	0.013	0.001	0.6	22.4
K (mg/L)	91	12.8	7.1	7.0	0.26	83	13.1
Na (mg/L)	91	402	260	209	2.9	2500	12.5
Ca (mg/L)	91	224	63	52	0.04	3700	21.4
Mg (mg/L)	91	29.4	14.5	12.2	0.04	220	14.9
Fe (mg/L)	91	0.61	0.04	-	0.001	17	35.6
Mn (mg/L)	91	0.07	0.03	-	0.0006	0.77	17.9
Ni (mg/L)	91	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	5.1
Al (mg/L)	91	0.029	0.007	0.011	0.007	0.99	37.9
As (mg/L)	37	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	-
Cr (mg/L)	37	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	-
Ba (mg/L)	91	0.17	0.06	-	0.0003	2.1	20.1
Br (mg/L)	91	8.5	3.7	3.2	0.4	99.5	16.1
Cu (mg/L)	91	0.004	0.001	0.001	0.001	0.06	26
Pb (mg/L)	91	0.004	0.004	0.004	0.004	0.016	4.1
Sr (mg/L)	91	6.8	1.9	1.5	0.01	100	19.2
Zn (mg/L)	91	0.010	0.007	0.008	0.005	0.099	12.7
B (mg/L)	91	0.5	0.3	-	0.004	3.4	14.5
Cl (mg/L)	91	900	550	263	0.4	7817	14.2
F (mg/L)	91	1.2	1.3	0.8	0.04	3.2	6.3
SO ₄ (mg/L)	91	110	55	40	0.5	700	13.4
HCO ₃ (mg/L)	91	260	204	204	21	1628	8.3
SiO ₂ (mg/L)	91	6.1	5.6	5.7	1.3	11	3.6
H₂S (mg/L)	23	0.19	0.04	0.08	0.04	1.4	34.7

Les différentes valeurs de la mesure centrale présentent des écarts entre elles. L'histogramme multivariable (figure 6.2) compare la moyenne arithmétique, la médiane et la moyenne géométrique de chacun des paramètres mesurés, sauf pour le potentiel d'oxydo-réduction (Eh). Les unités des paramètres présentés sont

les mêmes que celles du tableau 6.1. La moyenne arithmétique est souvent supérieure à la moyenne géométrique, elle-même supérieure à la médiane. Pour le fer, le manganèse, le baryum et le bore, la médiane est supérieure à la moyenne arithmétique qui est supérieure à la moyenne géométrique. Dans le cas du pH et de la température, les trois valeurs de la mesure centrale se ressemblent.

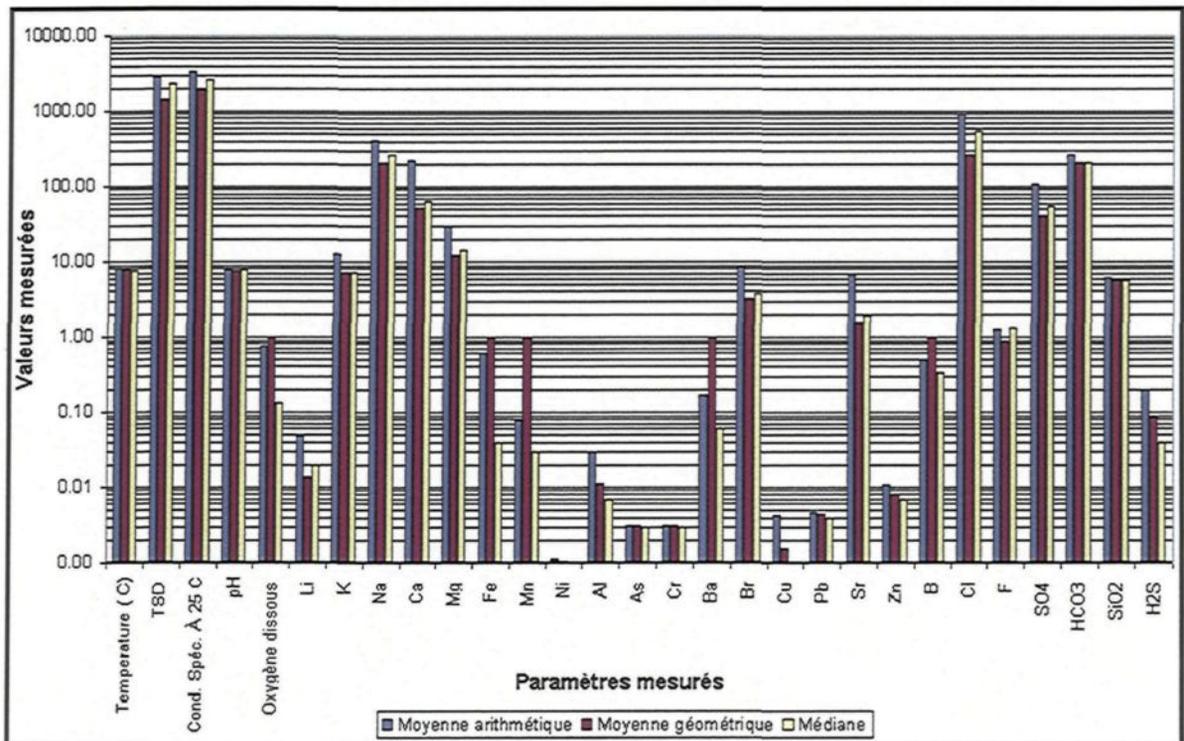


Figure 6.2: Comparaison des différentes valeurs centrales.

Le coefficient de variation (tableau 6.1) permet d'apprécier la représentativité des mesures centrales par rapport à l'ensemble des données. La valeur de la moyenne est d'autant plus représentative que les données ne sont pas trop dispersées autour de la moyenne. Plus le coefficient de variation est faible,

plus la série est homogène. Un coefficient de variation inférieur à 15% (0,15) semble être dans bien des cas, une indication d'une bonne homogénéité de la distribution des données (Baillargeon, 1990). Dans notre cas, le pH et la température, ajoutés au TSD pour les paramètres physico-chimiques et aux fluorures, aux bicarbonates, à la silice, au plomb, au zinc, au nickel, au sodium et au potassium, parmi les paramètres analysés, possèdent des valeurs de coefficient de variation inférieures à 15%. L'histogramme des teneurs mesurées pour un paramètre en fonction du nombre d'échantillons révèle deux styles de distribution : une distribution normale et une distribution log-normale. Les graphiques de distribution et les courbes cumulatives sont présentés à l'annexe D. Les paramètres qui présentent une distribution normale sont les mêmes que ceux dont le coefficient de variation est inférieur à 15%. Toutefois, les courbes cumulatives du plomb, du nickel et du zinc présentent des sauts brusques qui peuvent s'expliquer par une forte influence des limites de détection. La même observation s'applique au cas du cuivre et des sulfures dont les distributions suivent plutôt une loi log-normale comme le fer et l'aluminium.

Le tableau 6.2 reprend les paramètres chimiques mesurés avec les limites de détection des méthodes analytiques. Dans ce tableau se trouve aussi le nombre d'échantillons pour lesquels la valeur de ce paramètre est égale ou sous la limite de détection (N_{inf}), ainsi que le nombre d'échantillons pour lesquels la valeur du paramètre est au-dessus de cette limite (N_{sup}). Les lignes en caractère

gras indiquent les paramètres pour lesquels des échantillons ont présenté des valeurs sous la limite de détection. Au moins pour ces paramètres, la moyenne arithmétique semble une surestimation de la valeur centrale réelle.

Tableau 6.2: Limites de détection des méthodes analytiques

Paramètres	Limite de détection (mg/L)	N_inf (≤ Limite de détection)	N_sup (> Limite de détection)
Température (°C)	-	-	91
Eh (mV)	-	-	91
pH	-	-	91
OD (mg/L)	0.01	30	61
Cond. Spécifique à 25C (uS/cm)	-	-	91
TSD (mg/L)	-	-	91
Al (mg/L)	0.005	0	91
As (mg/L)	0.001	37	0
B (mg/L)	0.002	0	91
Ba (mg/L)	0.0003	0	91
Br (mg/L)	0.4	19	72
Ca (mg/L)	0.02	0	91
Cl (mg/L)	0.4	2	89
Cr (mg/L)	0.001	37	0
Cu (mg/L)	0.001	73	18
F (mg/L)	0.01	0	91
Fe (mg/L)	0.001	3	88
HCO ₃ (mg/L)	0.366	0	91
H₂S (mg/L)	0.04	12	11
K (mg/L)	0.03	0	91
Li (mg/L)	0.001	8	83
Mg (mg/L)	0.02	0	91
Mn (mg/L)	0.0006	4	87
Na (mg/L)	0.02	0	91
Ni (mg/L)	0.001	80	11
Pb (mg/L)	0.004	79	12
Si (mg/L)	0.03	0	91
SO ₄ (mg/L)	0.4	0	91
Sr (mg/L)	0.0002	0	91
Zn (mg/L)	0.004	0	91

À la lumière de ces observations, il apparaît que la moyenne arithmétique est plus appropriée pour une distribution normale, la moyenne géométrique pour une distribution log-normale et la médiane, dans les cas où plusieurs valeurs sont sous la limite de détection.

6.3 VARIABILITÉS DES DONNÉES

Deux types de variations ont été examinés lors de cette étude : d'une part les variations des paramètres mesurés durant l'échantillonnage (6.3.1) et d'autre part, les variations temporelles et spatiales des paramètres mesurés en laboratoire (6.3.2)

6.3.1 VARIATIONS DES PARAMÈTRES DURANT LE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS

Quatre cas de variations des paramètres mesurés sur le terrain ont été observés durant le prélèvement des échantillons (figure 6.3). La température (°C), le TSD (g/L), la conductivité spécifique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et le pH, sont montrés sur les mêmes graphiques en fonction du volume d'eau purgé (L). Les variations du TSD et la conductivité spécifique sont les mêmes, le TSD étant calculé à partir de la conductivité.

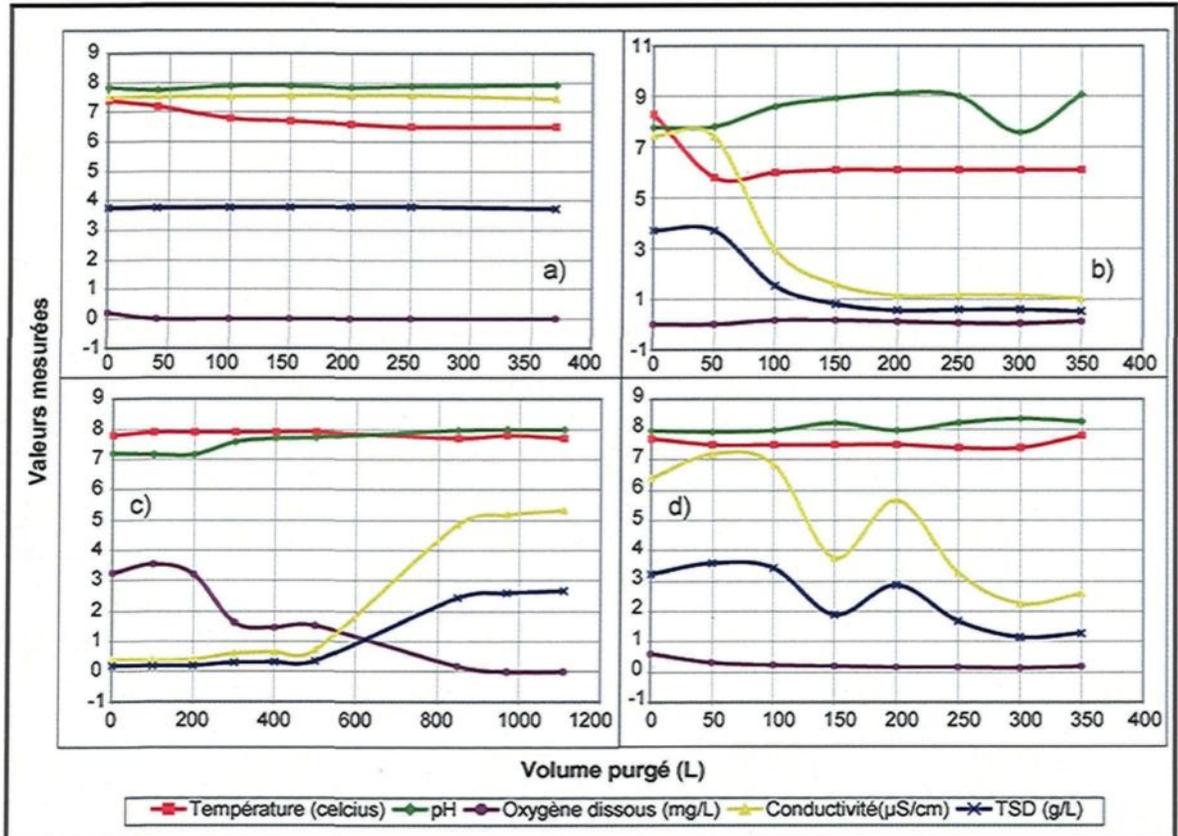


Figure 6.3: Variation des paramètres mesurés *in situ*. [a): cas le plus fréquemment rencontré, b) diminution drastique de la conductivité, c) augmentation drastique de la conductivité, d) diminution ponctuelle d'augmentations significatives de la conductivité]

La figure 6.3a illustre le cas le plus fréquemment rencontré lors des trois campagnes d'échantillonnage. Dans l'ensemble, les paramètres sont constants durant la purge. Les autres figures décrivent des situations plus rares lors desquelles d'importantes variations ont été enregistrées, particulièrement en ce qui concerne le contenu en sels dissous (TSD) et la conductivité spécifique. Dans certains cas (figure 6.3b et 6.3d), la purge du puits a conduit à une importante diminution de la conductivité de l'eau. Sur la figure 6.3d, la diminution de la

conductivité n'est pas régulière et présente des sauts significatifs ponctuels. Le cas illustré sur la figure 6.3c démontre la situation inverse, soit le passage d'une eau faiblement conductrice à une eau fortement conductrice. Dans ce cas, la teneur en oxygène dissous de l'eau décroît drastiquement jusqu'à la valeur nulle. Les causes de la variation des paramètres mesurés *in situ* n'ont pas été investiguées rigoureusement. Toutefois, l'exploitation continue de l'eau sur une durée prolongée semble avoir une influence sur la qualité de l'eau pompée.

6.3.2 VARIATIONS DES PARAMÈTRES ANALYSÉS EN LABORATOIRE

Pour être comparées entre elles, les variations des divers paramètres analysés doivent être normalisées. Dans le cadre de cette étude, les variations sont normalisées par rapport à la moyenne arithmétique des valeurs de ce paramètre pour les trois campagnes d'échantillonnage. Par exemple, si « x » est la moyenne arithmétique de toutes les valeurs des trois campagnes d'échantillonnage pour un paramètre donné et « Δ » est la variation absolue de teneur de ce paramètre entre deux campagnes, la variation relative, exprimée en pourcent, est égale à :

$$\text{Variation relative (\%)} = (\Delta \times 100) / x \quad (2)$$

Dans ce qui suit, deux types de variabilité sont distingués : la variabilité temporelle et la variabilité spatiale.

6.3.2.1 LA VARIABILITÉ TEMPORELLE

La variabilité temporelle se rapporte aux variations de la chimie de l'eau souterraine retirée d'un même puits à des périodes différentes. Les variations considérées ont des valeurs absolues supérieures ou égales à la moyenne arithmétique d'un paramètre, soit 100% et plus de variation relative entre deux campagnes. Les résultats de cette comparaison sont présentés sur la figure 6.4. L'axe des ordonnées correspond au nombre d'échantillons dont la concentration pour le paramètre indiqué augmente ou diminue d'une valeur au moins égale à la moyenne arithmétique de ce paramètre, entre deux campagnes d'échantillonnage d'un même puits. Au total, 76 échantillons présentent une variation relative de 100% et plus pour au moins un des paramètres mentionnés sur cette figure. Les fluorures sont les plus variables car 11 échantillons sur 76 montrent une variation de $\pm 1,2$ mg/L entre deux campagnes d'échantillonnage. Les fluorures sont suivis des chlorures, des sulfates, des bromures et du strontium. Parmi les 19 paramètres ayant été analysés à plus d'une reprise pour un même puits, la silice est le seul qui ne présente pas de variation supérieure ou égale à la valeur de sa moyenne arithmétique.

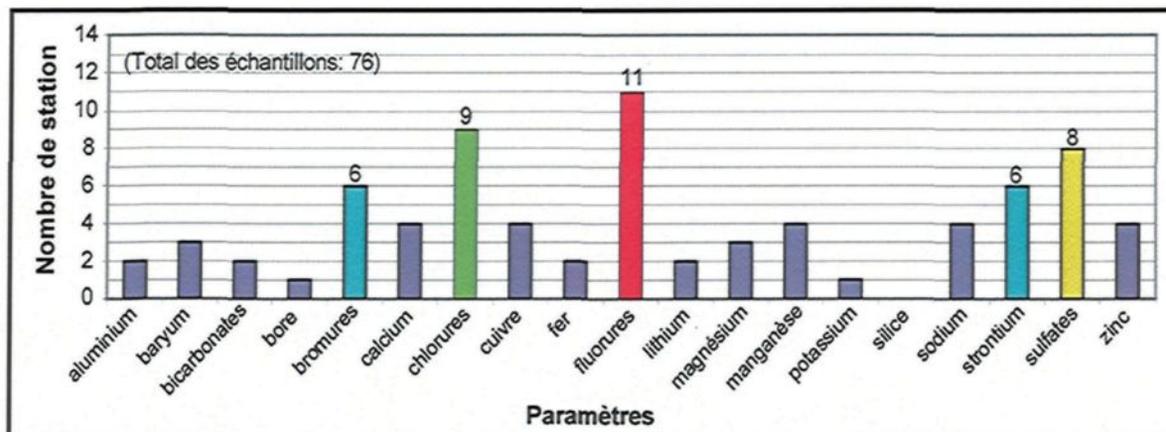


Figure 6.4: Nombre de stations variant de 100% et plus par rapport à la moyenne arithmétique des 3 campagnes d'échantillonnage (76/91 échantillons présentent de telles variation).

Une conséquence directe de la variabilité des fluorures peut être observée à la figure 6.5. La ligne horizontale, indiquée par une flèche, correspond à la teneur maximale autorisée (1,5 mg/L) par le règlement sur la qualité de l'eau potable de la loi québécoise sur la qualité de l'environnement. Les teneurs en fluorures sont présentées pour les secteurs qui ont été échantillonnés au moins deux fois lors de notre étude. Les 3 campagnes sont présentées. Les points sont reliés entre eux afin de faciliter l'observation des variations. Pour une station donnée, la teneur en fluorures peut être supérieure ou inférieure à la norme de potabilité, selon la période d'échantillonnage considérée. Les numéros de stations réfèrent au tableau 5.1 (chapitre 5).

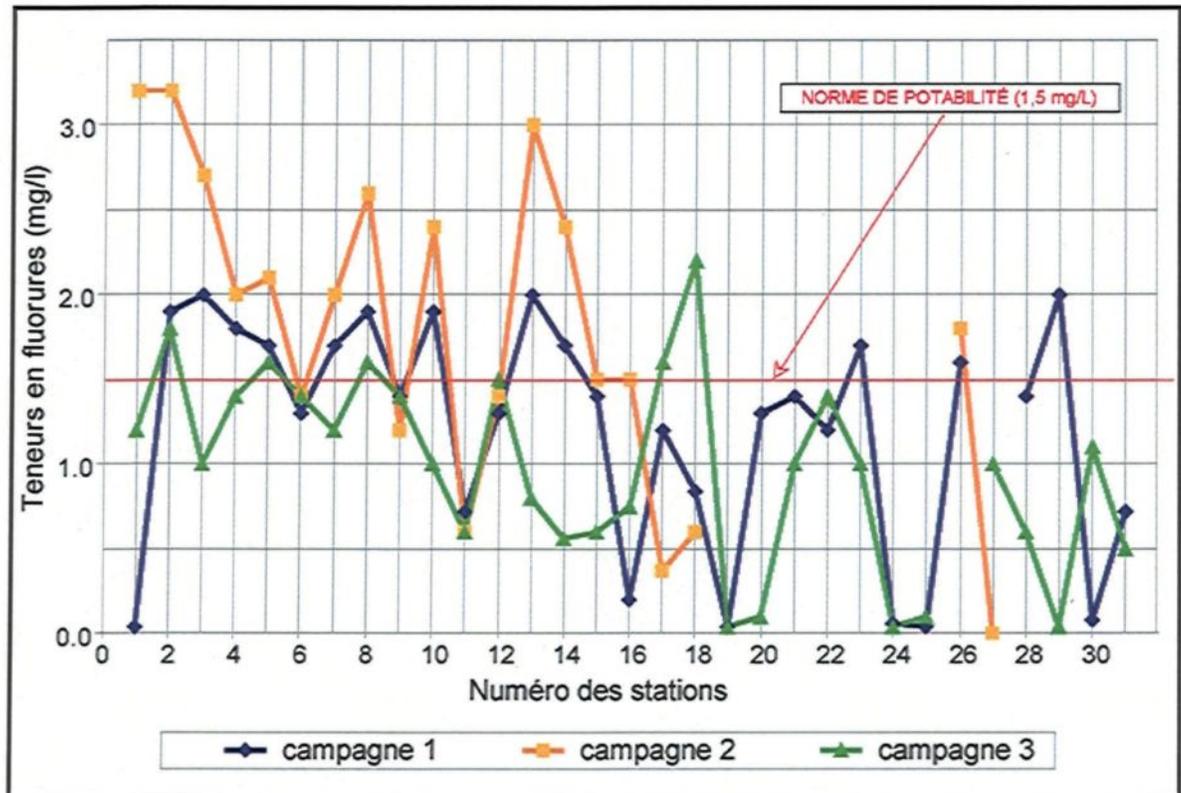


Figure 6.5: Variabilité des fluorures entre les 3 campagnes d'échantillonnage à chaque station d'échantillonnage.

Toujours sur la figure 6.5, la teneur en fluorures de la majorité des secteurs échantillonnés au moins deux fois semble généralement plus élevée lors de la seconde campagne d'échantillonnage qu'au moment des deux autres. Les moyennes arithmétiques des paramètres chimiques ont été calculées pour chacune des campagnes d'échantillonnage et présentées à l'aide d'une échelle logarithmique sur la figure 6.6.

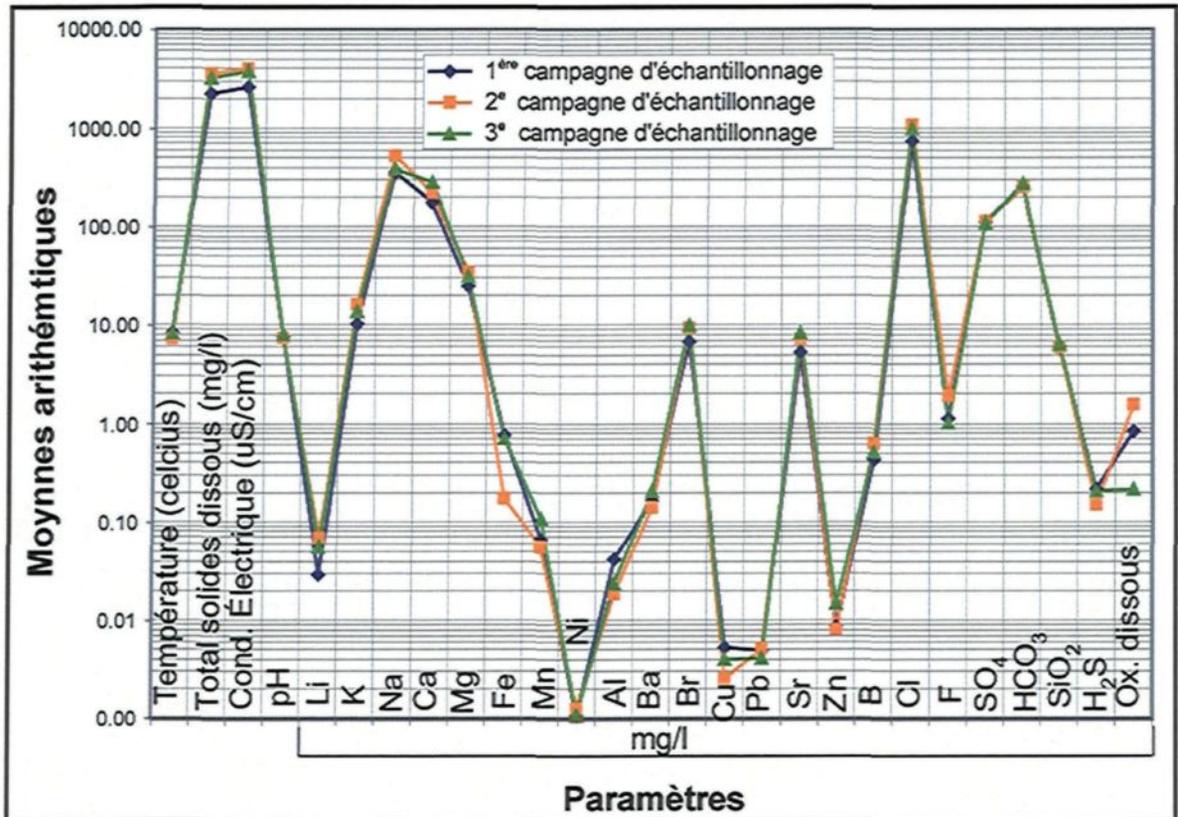


Figure 6.6: Valeurs des moyennes arithmétiques pour chacune des campagnes d'échantillonnage pour l'ensemble des paramètres mesurés plus d'une fois.

Pour plusieurs paramètres, la moyenne arithmétique de la seconde campagne d'échantillonnage est supérieure à celles des deux autres campagnes. Ces observations suggèrent que les échantillons collectés durant le mois de février sont généralement plus concentrés que les échantillons des deux autres campagnes. Même si le nombre d'échantillons qui a servi pour le calcul des moyennes présentées à la figure 6.6 est moins grand pour la seconde campagne que pour les deux autres, une hypothèse à investiguer serait la diminution de la recharge des nappes souterraines durant les mois d'hiver. Dans le cadre de cette étude, aucune investigation n'a porté sur ce sujet.

6.3.2.2 LA VARIATION SPATIALE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE

La variation spatiale se rapporte aux variations chimiques observées entre les puits qui ont été échantillonnés au moins deux fois. En d'autres termes, est ce que la variabilité temporelle identifiée diffère selon l'endroit considéré ? Ce type de variation sera caractérisé ici selon le nombre d'éléments chimiques présentant pour un même puits une variation relative d'au moins 100% entre plusieurs campagnes d'échantillonnage. Au total, 21 paramètres ont été considérés et le résultat est présenté à la figure 6.7. Plus de 50% des paramètres mesurés à la station 18, dans le secteur d'Alma-Villebois, présentent plus de 100% de variation relative. Un peu moins de 50% des paramètres des échantillons de la station 1, secteur Larouche, et environ 40% des paramètres des échantillons de la station 14, secteur de Chambord, présentent une variation relative de 100% et plus. Enfin, 30% des paramètres chimiques analysés aux stations 3 et 31, respectivement à Canton Tremblay et à Saint Prime, montrent des variations de 100% et plus. Les autres stations ont moins de 20% des paramètres qui présentent cette variation, certaines n'en ont aucun.

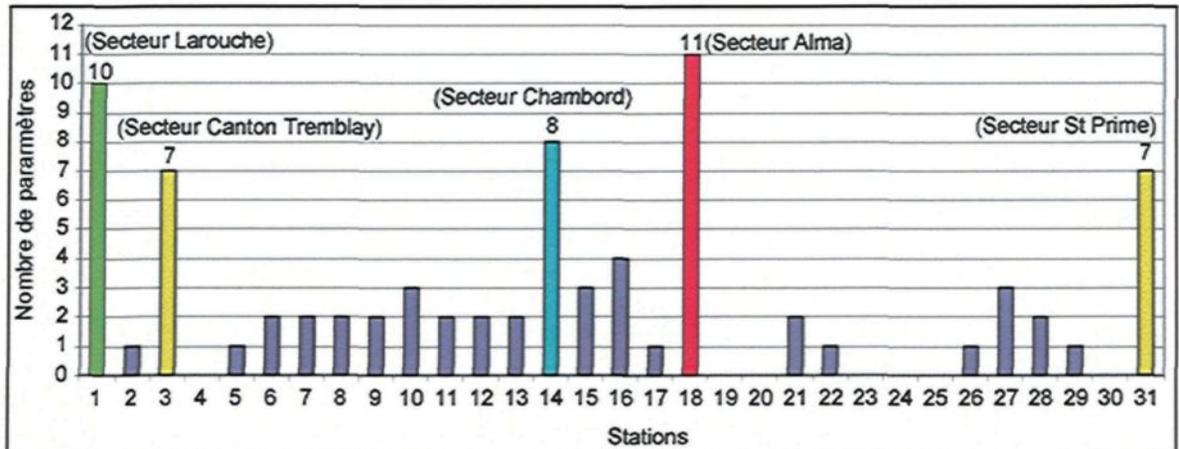


Figure 6.7: Nombre de paramètres mesurés (sur 21) à l'endroit d'une station et présentant une variation relative de 100% et plus par rapport à la moyenne arithmétique des 3 campagnes d'échantillonnage

Sur un graphique semi-log, les figures 6.8 a) et b) présentent la teneur, exprimée en mg/L, des 21 paramètres chimiques dont il est question dans la figure 6.7, pour les stations 1 et 18. Les écarts observés à la station 1 sont généralement plus importants d'une campagne à l'autre que ceux observés à la station 18 et pour les mêmes paramètres. La station 18 se distingue cependant de la station 1 par une variation plus importante du plomb et du zinc. Toujours pour les ions métalliques, le fer et le manganèse présentent des écarts plus importants à la station 1.

À noter que la première campagne d'échantillonnage de la station 1 est généralement plus concentrée en ions dissous que les deux autres. La même observation s'applique aussi à la troisième campagne d'échantillonnage de la

station 18. Ces observations pour les stations 1 et 18 ne vont pas dans le sens de ce qui a été exprimé à la section 6.3.2.1 pour l'ensemble des stations.

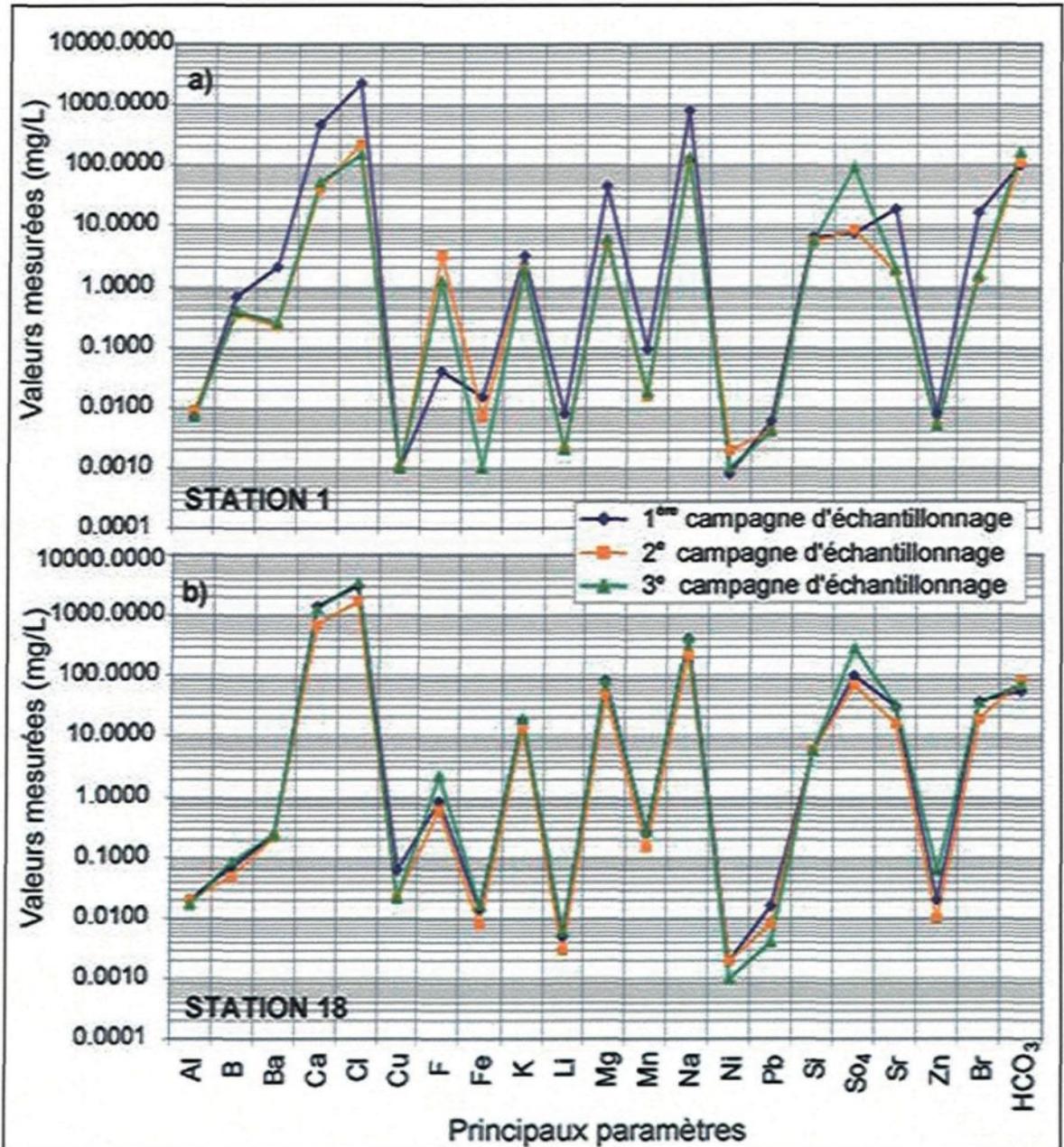


Figure 6.8: Variations en mg/L des 21 paramètres chimiques qui ont servi à la caractérisation de la variation spatiale de la variabilité temporelle des stations 1 (a) et 18 (b)

6.3.3 LES CAUSES DE VARIATIONS

Parmi les causes de variations, les variations induites peuvent être distinguées des variations naturelles qui reflètent des situations changeantes sur le terrain (Koch et Link, 1971). Les variations induites se rapportent généralement aux erreurs humaines et correspondent à des erreurs lors de l'échantillonnage, lors de la préparation des échantillons, ou lors de l'analyse. Les explications proposées ci-dessous ne sont basées sur aucun fondement scientifique, sinon celui que nous dictent notre jugement et notre bon sens à la lumière des connaissances acquises.

Les causes d'erreur induites

Au moment de l'échantillonnage, la profondeur de la pompe dans le puits ou une surexploitation de l'eau disponible peut notamment expliquer les variations des paramètres *in situ*. De plus, l'utilisation de l'eau avant l'échantillonnage n'était pas toujours connue. Lors de la préparation des échantillons, la filtration peut-être une source de contamination et altérer la qualité des échantillons.

Les intempéries peuvent gêner et influencer négativement la mise en bouteille ainsi que la prise de données. Un mauvais entreposage des échantillons dans les glacières peut induire des modifications de la chimie initiale. Au laboratoire, les multiples dilutions auxquelles sont soumis les échantillons les plus concentrés augmentent les risques d'erreur. Les changements de personnel, ainsi

que des erreurs de transcription des résultats sur les certificats d'analyse sont aussi des sources de variation. Lors de l'analyse, la représentativité de la très petite quantité de matériel utilisée pour l'analyse n'est pas garantie. De plus, la précision des méthodes et la justesse des mesures peuvent varier dans le temps. Un contrôle rigoureux du laboratoire permet généralement d'identifier ce type d'erreur (blancs, duplicatas et standards insérés aléatoirement parmi les échantillons).

Les causes naturelles de variation

Au sujet des variations temporelles, les variations saisonnières de la recharge peuvent expliquer les différences de concentration à différentes périodes de l'année car elle détermine entre autre la quantité et le type d'eau disponible à la consommation. Pour expliquer les variations spatiales, les diverses caractéristiques géologiques des milieux aquifères dont l'eau souterraine tire ses principales caractéristiques doivent être considérées.

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer des modèles de l'évolution géochimique des eaux souterraines mettant en relation les données hydrogéochimiques obtenues et l'environnement géologique d'où provient cette eau. Cette relation doit tenir compte de l'origine de l'eau, ainsi que de son évolution le long de son parcours souterrain. Ce chapitre traite premièrement des faciès hydrochimiques des échantillons (section 7.1), puis de l'origine des ions en solution (section 7.2). Finalement, une synthèse des principaux points du chapitre est présentée (section 7.3).

7.1 HYDROCHIMIE DES EAUX ECHANTILLONNÉES

L'hydrochimie se rapporte au contenu en ions dissous de l'eau souterraine dont découlent les types d'eau (7.1.1) et, dans certains cas, des dépassements des recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau potable (7.1.2).

7.1.1 LES TYPES D'EAU

Le diagramme de Durov (1948), construit sur la base des teneurs relatives (en %meq/L) des ions majeurs en solution (Figure 7.1 ;) permet de visualiser la distribution des compositions des eaux souterraines échantillonnées au Saguenay – Lac-Saint-Jean.

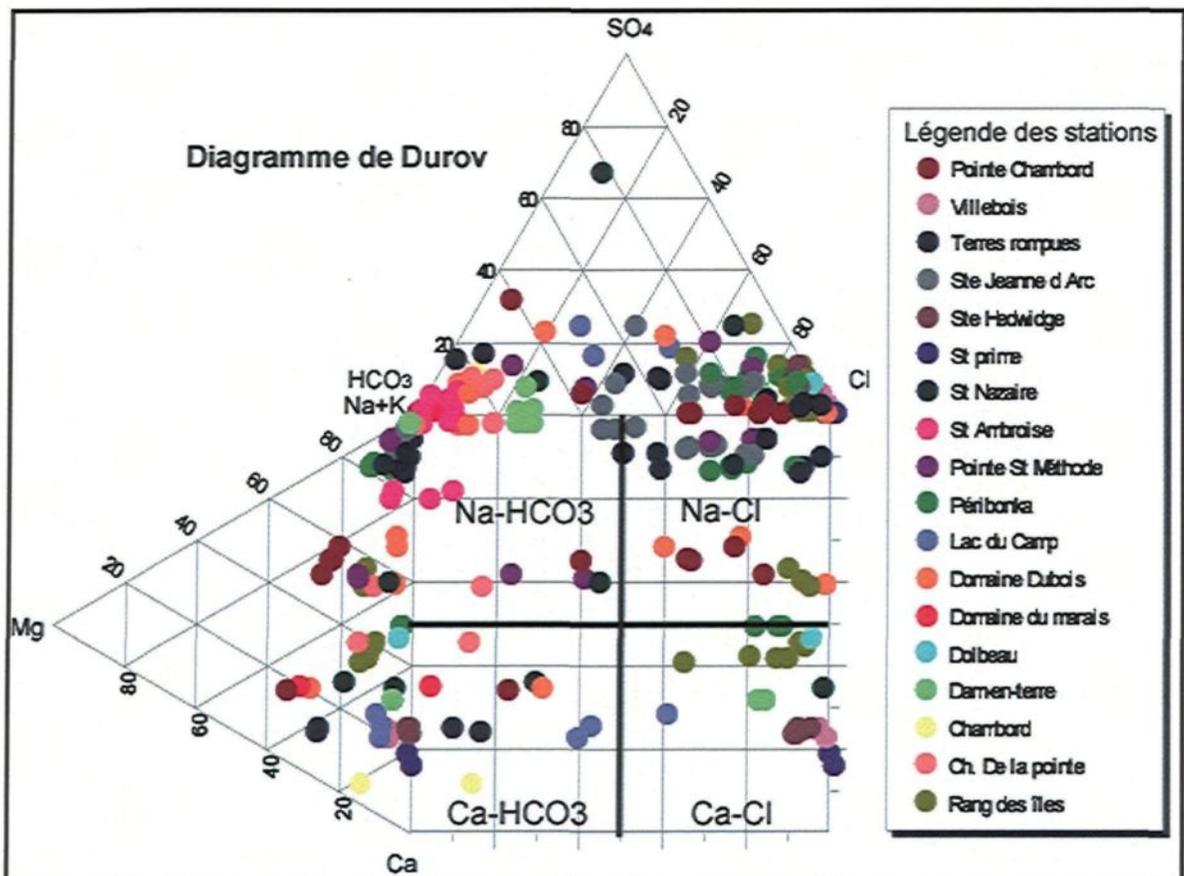


Figure 7.1: Diagramme de Durov illustrant les 4 faciès hydrochimiques des échantillons récoltés lors de cette étude.

Le pourcentage des cations majeurs (Ca^{2+} , $\text{Na}^+\text{+K}$, et Mg^{2+}) et des anions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-) sont tracés respectivement sur deux triangles distincts, puis projetés sur une grille carrée unique à la base de chaque triangle. Le graphique permet de distinguer facilement les échantillons de types Na- HCO_3 , Ca- HCO_3 , Na-Cl et Ca-Cl. La chimie des échantillons qui correspond aux types d'eau peut être précisée à l'aide des diagrammes en pointe de tarte (annexe E). Ce type de graphique, discuté ci-après, permet une représentation de l'importance relative des ions majeurs Mg^{2+} , Ca^{2+} , $\text{Na}^+\text{+K}^+$, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , exprimée en meq/L.

7.1.1.1 TYPE BICARBONATÉ

Le type bicarbonaté sodique (Na- HCO_3) et le type bicarbonaté calcique (Ca- HCO_3) correspondent selon le modèle de Gascoyne et Kamineni (1994) à des eaux souterraines récentes qui présentent typiquement de faibles concentrations en minéraux dissous. Sur le diagramme de Durov (figure 7.1), 19 échantillons correspondent au champ Na- HCO_3 et 10 échantillons correspondent au champ Ca- HCO_3 . La moyenne du TSD et de la conductivité électrique spécifique sont respectivement 354 mg/L et 709 $\mu\text{S/cm}$ pour le premier type et 298 mg/L et 596 $\mu\text{S/cm}$ pour le second. L'eau souterraine de type Ca- HCO_3 est généralement plus riche en magnésium et en sulfates que le type Na- HCO_3 . Le contenu en chlorures

est variable pour les deux types d'eau avec toutefois une légère prédominance dans le type Na-HCO₃.

7.1.1.2 TYPE CHLORURÉ

Toujours selon le modèle de Gascoyne et Kamineni (1994), le type chloruré calcique et le type chloruré sodique correspondent à des eaux profondes de types saumures nettement plus concentrés en minéraux dissous que les eaux bicarbonatées présentées précédemment. Sur le diagramme de Durov (figure 7.1), les échantillons de type Ca-Cl sont au nombre de 24 et ceux du type Na-Cl sont au nombre de 38. La moyenne du TSD et de la conductivité électrique spécifique sont respectivement: 4834 mg/L et 5440 µS/cm pour le premier type et 3585 mg/L et 4040 µS/cm pour le second. Les anions bicarbonates sont généralement plus importants dans le type Na-Cl. Il semble que ce soit aussi le cas pour le magnésium mais dans une moindre mesure. Les anions chlorures et sulfates sont en quantité variable dans les deux types d'eau. Le cation calcium peut être en très faible concentration relative, voire absent, dans le type Na-Cl, alors que le cation sodium est toujours présent en quantité remarquable dans le type d'eau Ca-Cl.

7.1.2 DÉPASSEMENTS DES RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE AU CANADA

Les dépassements du maximum acceptable de certains paramètres de l'ensemble des échantillons, d'après les critères des recommandations pour la qualité de l'eau potable de Santé Canada (2007), sont présentés en caractères gras dans le tableau 7.1. Ce tableau présente aussi le type d'eau des échantillons ainsi que le secteur d'où ils proviennent. Les éléments pour lesquels au moins un dépassement du maximum acceptable a été enregistré sont les cations aluminium (Al^{3+}), baryum (Ba^{2+}) et plomb (Pb^{2+}) et l'anion fluorure (F^-). Le sodium, qui n'est pas présenté dans ce tableau, est étroitement relié au TSD. Pour ces deux paramètres, auxquels s'en ajoutent d'autres, les limites à la qualité de l'eau correspondent à des critères esthétiques selon Santé Canada (2007). Il convient de rappeler que la problématique portant sur les eaux à salinité élevée entraîne un biais d'échantillonnage en faveur des eaux souterraines les plus minérales et donc présentant le plus de chance de dépasser les normes. Au total, 38 échantillons sur 91 présentent au moins un dépassement pour les paramètres du tableau 7.1. Parmi eux, 30 échantillons dépassent le maximum acceptable pour les fluorures (1,5 mg/L) dont la concentration ne semble pas influencée par le type d'eau car 11 échantillons sont de type Na- HCO_3 , 12 de type Na-Cl et 7 de type Ca-Cl. La valeur maximale observée pour ce paramètre est de 3,2 mg/L.

Tableau 7.1: Dépassements des Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement – Santé Canada (2007) – de l'ensemble des échantillons

Numéro d'échantillon	Type d'eau	Secteurs	TSD*	Al ³⁺	Ba ²⁺	Pb ²⁺	F ⁻
			<500 mg/L	0.1 mg/L	1 mg/L	0.01 mg/L	1.5 mg/L
Limite maximale acceptable			<500 mg/L	0.1 mg/L	1 mg/L	0.01 mg/L	1.5 mg/L
1JW03	Na-Cl	Larouche	6705	0.007	2.10	0.006	0.04
1JW06	Na-HCO ₃	Alma	609.5	0.007	0.01	0.004	1.9
1JW08	Na-Cl	Canton tremblay	1962	0.007	0.09	0.004	2
1JW09	Na-HCO ₃	Canton tremblay	359	0.007	0.06	0.004	1.8
1JW11	Na-HCO ₃	St Ambroise	150	0.18	0.02	0.004	1.7
1JW14	Na-Cl	Ste Jeanne d Arc	2385	0.007	0.04	0.004	1.7
1JW16	Na-HCO ₃	Ste Jeanne d Arc	630	0.09	0.01	0.004	1.7
1JW17	Na-Cl	Ste Jeanne d Arc	1917	0.007	0.04	0.004	1.9
1JW19	Ca-Cl	Péribonka	1656	0.007	0.02	0.005	1.9
1JW22	Ca-Cl	St Gédéon	6003	0.01	0.05	0.007	1.6
1JW23	Na-HCO ₃	Chambord	360	0.007	0.74	0.004	2
1JW26	Na-Cl	Chambord	3816	0.007	0.00	0.004	1.7
1JW29	Na-HCO ₃	St Méthode	390	0.007	0.05	0.004	2
1JW33	Ca-Cl	Ste Hedwidge	4077	0.99	0.04	0.008	0.2
1JW39	Ca-Cl	Alma	8523	0.02	0.23	0.016	0.84
2JW01	Na-HCO ₃	Larouche	510	0.009	0.22	0.004	3.2
2JW02	Na-Cl	Terres rompues	7119	0.007	0.16	0.004	2.7
2JW04	Ca-Cl	Péribonka	3330	0.007	0.02	0.004	2.4
2JW05	Na-Cl	Ste Jeanne d Arc	2529	0.007	0.04	0.004	2.1
2JW07	Na-Cl	Ste Jeanne d Arc	1935	0.007	0.04	0.004	2.6
2JW12	Na-Cl	Chambord	1413	0.007	0.76	0.004	3
2JW13	Na-Cl	Chambord	3834	0.007	0.00	0.004	2.4
2JW15	Na-HCO ₃	Ste Jeanne d Arc	624.5	0.15	0.01	0.004	2
2JW17	Na-HCO ₃	Terres rompues	425	0.009	0.06	0.004	2
2JW18	Ca-Cl	St Gédéon	6741	0.02	0.06	0.008	1.8
2JW19	Na-HCO ₃	Alma	622.5	0.007	0.01	0.004	3.2
2JW20	Ca-Cl	Alma	743.5	0.02	0.31	0.008	2.3
3JW01	Na-HCO ₃	St Ambroise	220	0.19	0.02	0.004	1
3JW02	Na-HCO ₃	St Ambroise	195	0.19	0.02	0.004	0.1
3JW05	Na-Cl	Ste Jeanne d Arc	1800	0.007	0.04	0.004	1.6
3JW06	Na-HCO ₃	Ste Jeanne d Arc	535	0.12	0.01	0.004	1.2
3JW08	Na-Cl	Ste Jeanne d Arc	2502	0.007	0.04	0.004	1.6
3JW10	Na-Cl	Péribonka	3762	0.007	0.08	0.004	1.6
3JW12	Na-HCO ₃	Alma	630	0.007	0.01	0.004	1.8
3JW14	Ca-Cl	Villebois	9414	0.017	0.24	0.004	2.2
3JW15	Na-Cl	Chambord	3744	0.007	1.30	0.004	0.56
3JW17	Na-Cl	Chambord	4617	0.007	1.80	0.004	1.2
3JW27	Ca-Cl	Dolbeau	5751	0.007	0.11	0.004	1.7

* Objectif esthétique

Le maximum acceptable pour l'aluminium (0,1 mg/L) est dépassé par 6 échantillons dont 5 sont de type Na-HCO₃. La limite acceptable pour ce paramètre est dépassée par un facteur dix par le seul échantillon de type Ca-Cl. Pour le baryum, 3 échantillons de type Na-Cl dépassent par un facteur 2 environ la limite acceptable (1 mg/L). Pour le plomb, 1 échantillon de type Ca-Cl présente une teneur supérieure à la limite acceptable de ce paramètre (0,01 mg/L).

7.2 ORIGINES DES ESPÈCES CHIMIQUES DISSOUTES

Les quatre types d'eau définis plus haut sont localisés sur la figure 7.2. Chacune des étoiles rouges représente entre 2 et 4 secteurs d'échantillonnage (où le nombre d'échantillons prélevés varie entre 1 et 3). Sur cette figure la présence ou l'absence d'argile ne semble pas déterminante pour un type d'eau plutôt qu'un autre. Une étude approfondie de la chimie de l'eau souterraine est requise pour expliquer le contenu minéral des échantillons et afin de proposer des corrélations avec l'environnement géologique. Une revue de la littérature scientifique sur la géochimie des eaux souterraines (7.2.1) permet d'identifier certains processus à l'origine d'ions dissous. De ces processus se dégage l'interdépendance de certains ions, ce qui permet, à l'aide de diagrammes binaires, de vérifier les mécanismes probables qui en sont à l'origine (7.2.2). La géochimie des isotopes stables de l'eau apporte aussi plusieurs pistes de réflexion (7.2.3).

7.2.1 REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LA GÉOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

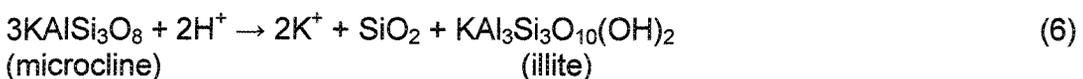
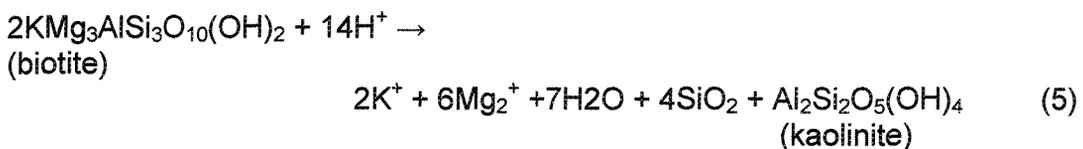
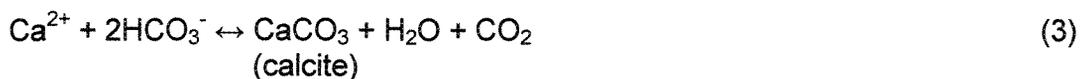
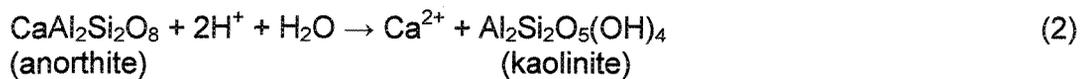
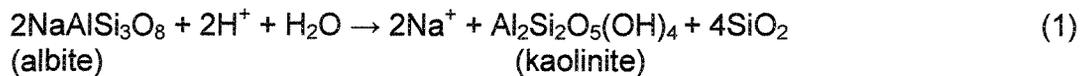
Les concentrations en éléments dissous dans les eaux souterraines n'évoluent pas de façon indépendante les unes des autres. Bien au contraire, elles sont souvent corrélées pour des raisons chimiques ou physiques (Blum et al., 2001). Par exemple, l'équilibre électrique devant être respecté, toute augmentation d'un cation dans l'eau sera balancée par celle d'un anion, et vice versa. La matrice de corrélation des 62 échantillons de type chloruré est présentée à l'annexe F. Cette matrice fait ressortir des corrélations de certains éléments entre eux (K vs Na, Mg vs HCO_3 , Ca vs Sr, Na vs Mg, Sr vs Br, ...) mais surtout, elle met en lumière plusieurs fortes corrélations de certains éléments (Ca, Br, Sr, Cl) avec le TSD. Selon la littérature, l'accroissement du TSD accompagne généralement une augmentation de la profondeur et aucune valeur de TSD inférieure à 1 000 mg/L n'est observée à des profondeurs supérieures à 300 m (Gascoyne et Kamineni, 1994).

Parmi les espèces chimiques dissoutes, les chlorures ainsi que les bromures sont parmi les espèces les plus conservatrices en phase aqueuse (Nordstrom et al., 1985 ; Edmunds et al., 1985) car ils ne sont pas impliqués dans la précipitation de minéraux secondaires (Beaucaire et al., 1999), comme par exemple les fluorures qui sont le plus souvent contrôlés par la saturation de la fluorite, ou le calcium contrôlé par la précipitation des carbonates. Généralement,

dans les environnements aquifères cristallins, le ratio molaire Cl/Br est compris entre 200 et 400 (Frape et al. 1984). Dans l'eau de mer, quel que soit son stade évaporatoire, ce rapport est de l'ordre de 289 (Blum et al., 2001). Le rapport de ces deux espèces chimiques obtenu dans les eaux souterraines est couramment comparé à celui de l'eau de mer pour caractériser l'origine de l'eau et de sa minéralisation. Il arrive souvent que ce rapport soit différent de celui de l'eau de mer. Dans ce cas, si l'eau de mer fossile est la principale source de la salinité, cette eau aura dû subir d'importantes modifications pour effacer la signature chimique originelle. Ces modifications sont parfois le résultat de l'interaction entre l'eau et la roche (Frape and Fritz, 1982) dont les processus et leur cinétique diffèrent d'un environnement géologique à l'autre. Par exemple, le retrait du magnésium et son remplacement par le calcium dans l'eau lors de la dolomitisation peut se produire dans les environnements sédimentaires mais est peu probable dans les roches ignées.

La région du Saguenay-Lac-Saint-Jean est principalement caractérisée par la présence de roches cristallines (cf. chap. 2). Les feldspaths plagioclases, calciques et sodiques, sont des minéraux très communs des roches constitutives de la région telles que les granites, les syénites, les monzonites, les granodiorites, les diorites, les gabbros et les anorthosites. Dans ces roches, l'hydrolyse des feldspaths plagioclases (équations 1 et 2 plus bas) permet d'expliquer la présence de sodium et de calcium en solution (Gascoyne et Kamineni, 1994). La perte de

calcium peut provenir de la précipitation de la calcite (équation 3) présente dans les fractures et/ou de l'échange ionique avec le sodium sur les minéraux argileux (équation 4). Dans l'équation 4, Na-X représente un cation sodium adsorbé sur un minéral argileux (Gascoyne et Kamineni, 1994). L'inverse de l'équation 4, l'albitisation, entraîne un gain de calcium (Frape et Fritz, 1982). La biotite et les feldspaths potassiques font aussi partie des principaux constituants de ce type de roche et leur altération entraîne la libération en solution du potassium et du magnésium (équation 5 et 6) (Gascoyne et Kamineni, 1994).



L'altération des biotites et autres micas permet aussi d'expliquer les teneurs en bore et en lithium des eaux souterraines (Edmunds et al., 1984). Pour le bore, les autres sources sont les argiles océaniques et la croûte océanique altérée

(Vidal, 1998). Le bore inorganique n'est toutefois pas considéré comme un élément conservateur au même titre que les chlorures et les bromures (Bottomley et al., 1994). À l'inverse, le lithium est difficilement soustrait par précipitation des minéraux secondaires ou par échanges ioniques, ce qui en fait un bon indicateur de l'interaction eau-roche et du temps de résidence dans l'eau (Edmunds et al., 1986). Cette observation est aussi valable pour le strontium (Frape et Fritz, 1987 ; Blum et al., 2001) qui influence fortement le contenu en éléments trace des eaux souterraines lorsqu'il est contenu dans les plagioclases (Edmunds et Savage, 1987). Le ratio Ca/Sr moyen des roches ignées constitutives de la croûte terrestre est environ 50 (Stober et Bucher, 2000) et des valeurs de ce ratio estimées dans les plagioclases varient entre 100 et 200 (Beaucaire et Michard, 1982).

7.2.2 ÉTUDE DES DIAGRAMMES BINAIRES

Ces informations renseignent sur l'origine de certains éléments dissous (Br, Cl, Na, Ca, HCO_3 , K, Mg, B, Li) et peuvent être testées à l'aide des diagrammes binaires des éléments impliqués dans les processus décrits plus haut. Le raisonnement qui suit est fondé sur une telle démarche et appliqué ici aux échantillons de cette étude. Il débute par l'étude des rapports Br/Cl, Na/Cl et Ca/Cl (7.2.2.1), suivis de l'étude du diagramme Ca/Na et des origines possibles du calcium (7.2.2.2). Une discussion sur le potassium et le magnésium est ensuite présentée (7.2.2.3), suivie d'une discussion sur le bore et le lithium (7.2.2.4).

7.2.2.1 ÉTUDE DES RAPPORTS Br/Cl, Na/Cl ET Ca/Cl

La relation entre la teneur en chlorures et celle en bromures, exprimée en mg/L, pour les 62 échantillons de type chloruré de cette étude est montrée à la figure 7.3. Sur cette figure, 18 échantillons ont un rapport Br/Cl qui correspond à celui de l'eau de mer. Ils sont tous du type Na-Cl. Les autres montrent un enrichissement en bromures (ou un appauvrissement en chlorures) par rapport à l'eau de mer. Leur relation linéaire indique une origine commune aux bromures et aux chlorures.

La figure 7.4 présente les concentrations, exprimées en mg/L, du sodium en fonction des chlorures (a) et du calcium en fonction des chlorures (b). Sur la figure 7.4a, les 18 échantillons discutés plus haut ainsi que 12 échantillons supplémentaires s'alignent le long de la droite de dilution de l'eau de mer pour le sodium. La zone ombragée des figures 7.4a et b contient les 32 autres échantillons. Sur la figure 7.4b, les mêmes 30 échantillons que ceux de la figure 7.4a s'alignent le long de la droite de dilution de l'eau de mer pour le calcium et ils sont tous du type Na-Cl. Cette observation suggère la signature marine de ces échantillons. Les 32 autres échantillons présentent un appauvrissement en sodium (figure 7.4a) et un enrichissement en calcium (figure 7.4b) par rapport aux chlorures.

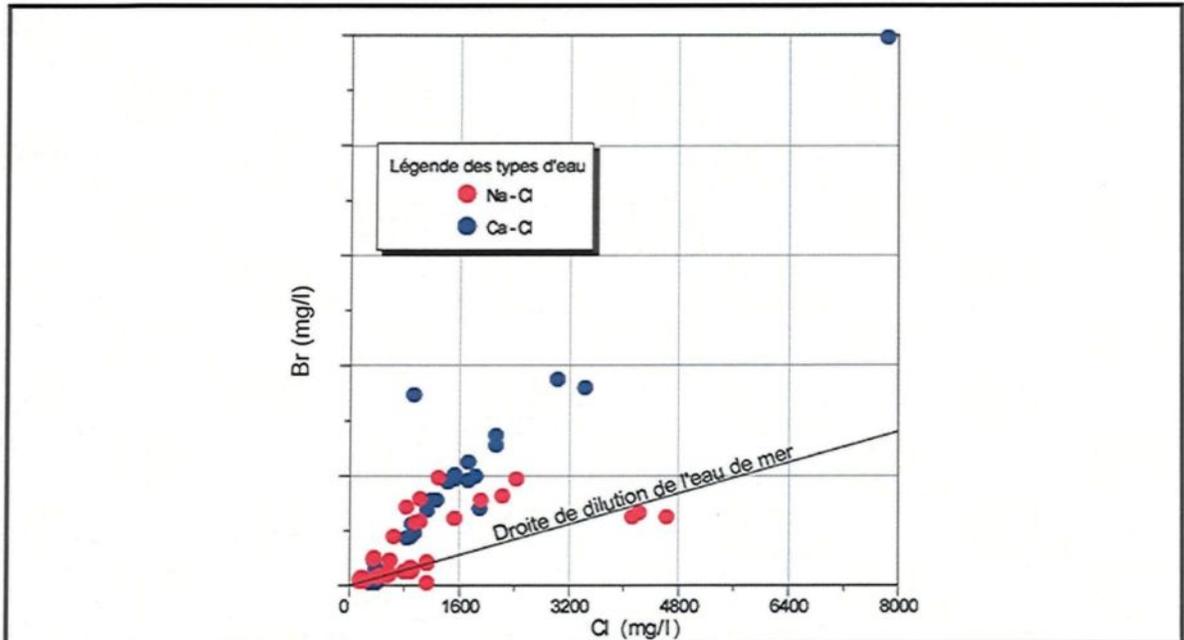


Figure 7.3: Relation entre les bromures (Br) et les chlorures (Cl) par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer.

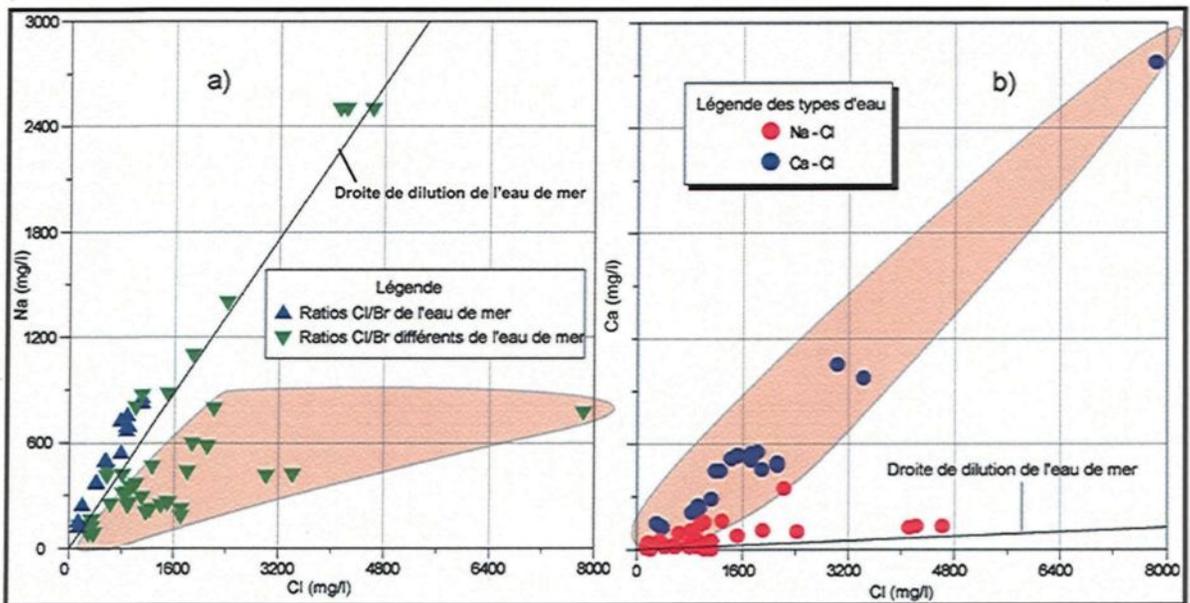


Figure 7.4: a) Relation entre le sodium (Na) et les chlorures (Cl) et b) entre le calcium (Ca) et les chlorures (Cl).

7.2.2.2 DIAGRAMME Ca/Na ET DISCUSSION SUR LE CALCIUM

Le diagramme des teneurs en calcium en fonction des teneurs en sodium (figure 7.5) permet de mettre en évidence 3 populations distinctes d'échantillons: 1) une population d'échantillons pour lesquels la signature marine de certains éléments a été identifiée (droite z, population z), 2) une population dont le rapport Ca/Na est supérieur à celui de la population précédente mais inférieur à 1 (droite y, population y), et 3) une population qui présente un rapport Ca/Na supérieur à 1 (population wx). À noter que cette troisième population pourrait se diviser en 2 sous-populations : une dont le rapport Ca/Na se rapproche de 1 (droite x), et l'autre dont le rapport Ca/Na est largement supérieur à 1 (droite w). Toutefois, cette distinction ne s'est pas avérée utile pour la suite du raisonnement.

La figure 7.6 présente la relation entre le calcium et les bicarbonates qui sont liés par la dissolution de la calcite (éq. 3). La corrélation négative observée sur cette figure suggère plutôt l'hydrolyse des plagioclases calciques (éq. 2) pour expliquer la présence de calcium dans ces échantillons. Les eaux sodiques marquées d'une signature d'eau de mer sont généralement plus riches en bicarbonates que les eaux calciques ce qui peut s'expliquer par une composante d'eau de recharge plus importante pour ces échantillons et la perte de calcium par substitution ionique (éq. 4).

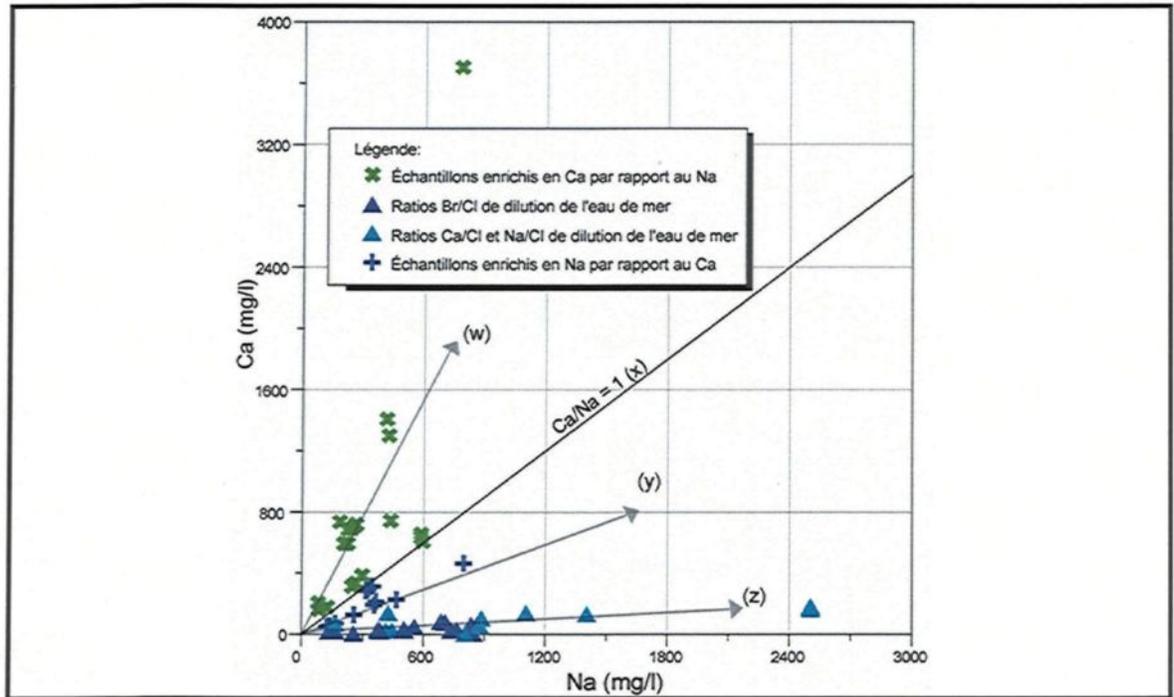


Figure 7.5: Relation entre le calcium et le sodium. Trois populations définies par les droite z (population z, ▲), y (population y, +), w et x (population wx, ✖)

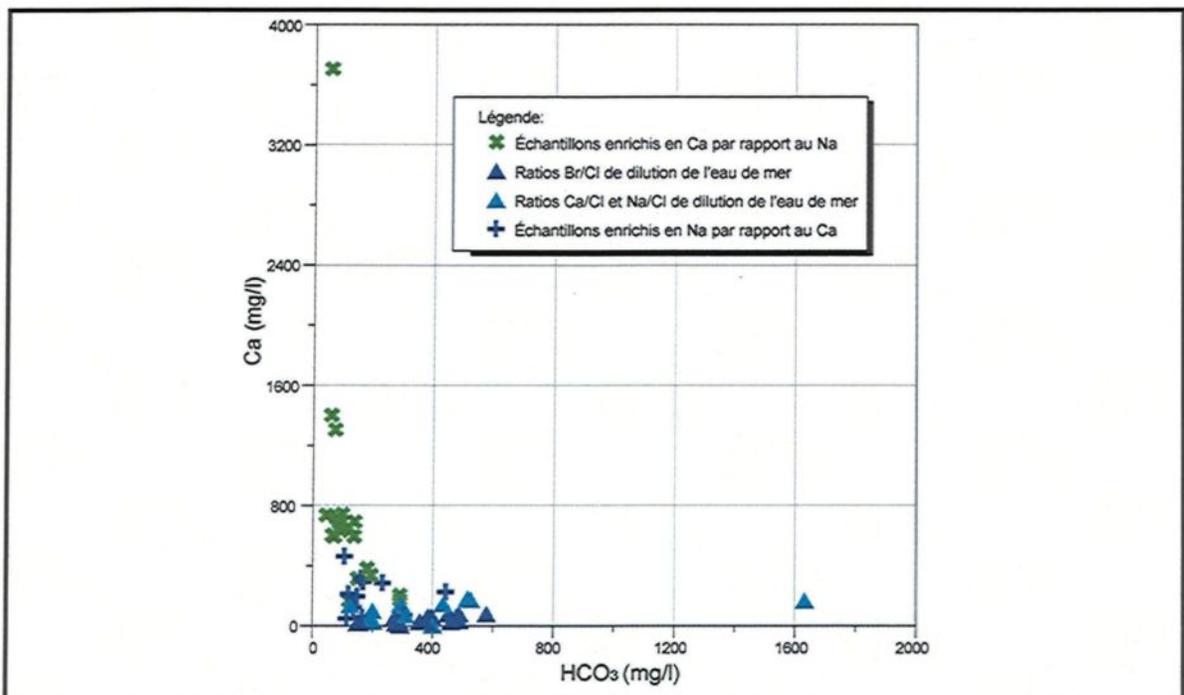


Figure 7.6: Relation entre le calcium et les bicarbonates. La corrélation négative observée suggère que la dissolution de la calcite n'est pas à l'origine du calcium dans les échantillons.

La figure 7.7 présente la relation entre le calcium et le strontium. Les échantillons marqués d'une signature marine (population z) se distinguent par des rapports Ca/Sr plus faibles que les autres échantillons. La relation linéaire des échantillons des populations wx et y (zone ombragée de la figure 7.7) suggère que le calcium et le strontium ont la même origine ou sont simultanément retirés de la solution par la précipitation de minéraux secondaires (Beucaire et al., 1999). De plus, la correspondance avec un rapport Ca/Sr mesuré dans les roches ignées de la croûte (section 7.2.1) suggère l'interaction avec ce type de roches présente dans la région. Pour ces échantillons, l'hydrolyse des plagioclases (éq. 2) sera considérée à l'origine du calcium dans l'eau.

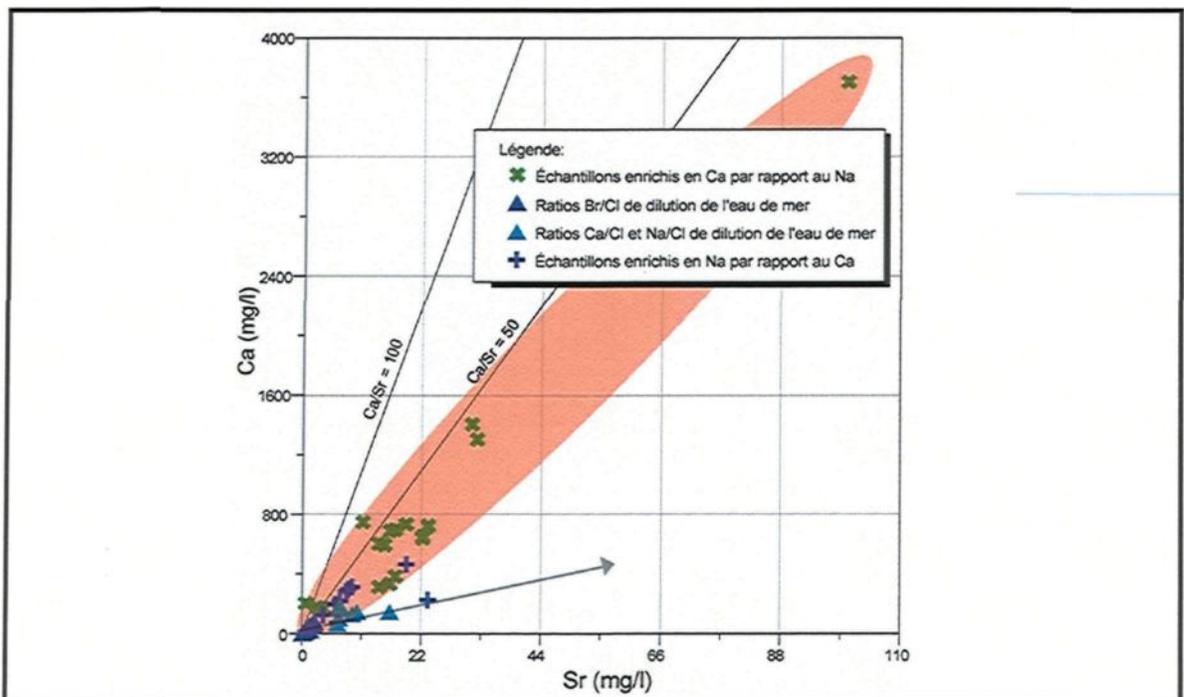


Figure 7.7: Relation entre le calcium et le strontium. Deux tendances se distinguent: 1) les échantillons dont le ratio Ca/Sr s'approche de 50 et 2) les échantillons dont ce ratio est nettement plus faible (flèche). Le ratio Ca/Sr =100 correspond aux mesures faites dans les plagioclases (section 7.2.1)

7.2.2.3 DISCUSSION SUR LE POTASSIUM ET LE MAGNÉSIUM

La figure 7.8 illustre la relation entre la teneur en potassium et celle en magnésium. Les échantillons contenus dans la zone ombragée de cette figure correspondent à ceux dont le rapport Ca/Sr se rapproche de celui mesuré dans les roches de la croûte (zone ombragée de la figure 7.7). Les nombreuses tendances observées pour ces échantillons indiquent une relation ambiguë entre le potassium et le magnésium (combinaison de plusieurs processus comme l'altération des feldspaths? des micas? dilution de l'eau de mer?, etc.) et *a priori*, moins évidente que celle des échantillons marqués d'une signature marine (population z de la figure 7.5). Les échantillons de la population z présentent une bonne corrélation positive entre le potassium et le magnésium. À ces échantillons s'ajoutent deux échantillons de la population y. Pour ces derniers, le rapport Ca/Sr (figure 7.7) coïncide aussi avec celui de la population z. Cette observation suggère une origine commune au potassium et au magnésium des échantillons marqués d'une signature marine (population z) auxquels s'ajoutent deux échantillons de la population y pour lesquels la signature marine n'a pas été identifiée à l'aide des diagrammes Br/Cl, Ca/Cl et Na/Cl.

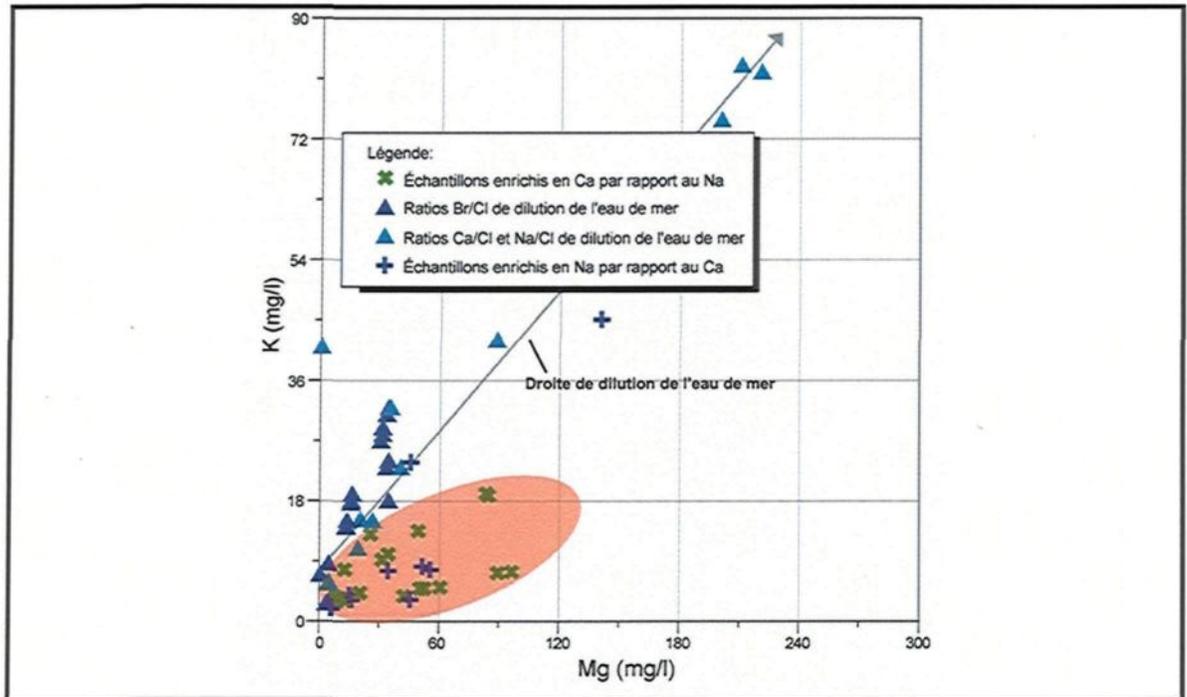


Figure 7.8: Relation entre le potassium et le magnésium. Les échantillons marqués d'une signature marine (\blacktriangle) et 2 échantillons de la population y ($+$) montrent une bonne corrélation positive (flèche).

7.2.2.4 DISCUSSION SUR LE BORE ET LE LITHIUM

La figure 7.9 illustre la relation entre le lithium et les chlorures. La caractéristique conservatrice du lithium peut être évoquée pour expliquer l'alignement le long de la droite de dilution de l'eau de mer de plusieurs échantillons pour lesquels une signature d'eau de mer a été identifiée. Les 2 échantillons de la population y dont le rapport K/Mg correspond à celui des échantillons de la population z (figure 7.8) présentent des teneurs enrichies en lithium par rapport à l'eau de mer. À ces 2 échantillons s'ajoutent 4 échantillons de

la population z (triangles dans la région ombragée sur la figure 7.9 et 7.10). Une distribution similaire est observée pour le bore (figure 7.10). Comme pour le lithium, l'absence de tendance claire entre le bore et les chlorures suggère plusieurs sources éventuelles et plusieurs mécanismes de contrôle de la chimie, mais pour Vengosh et al. (1991), un ratio B/Cl supérieur à l'eau de mer et présentant une valeur de 8×10^{-4} (figure 7.10) est caractéristique des saumures provenant d'une intense évaporation de l'eau de mer. Pour Bottomley (1994), les environnements de faible perméabilité, où le lessivage et l'évacuation du bore sont des processus moins efficaces, accumulent le bore dans l'eau souterraine.

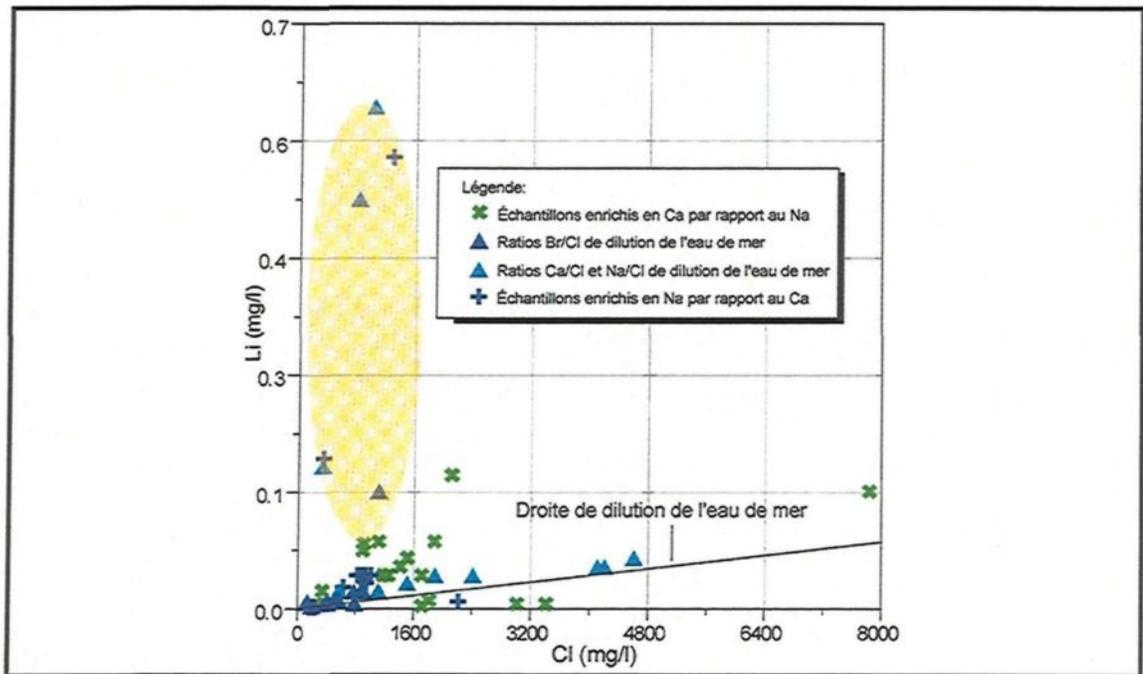


Figure 7.9: Relation entre le lithium et les chlorures. Les échantillons anormaux en lithium le sont aussi en bore (figure suivante).

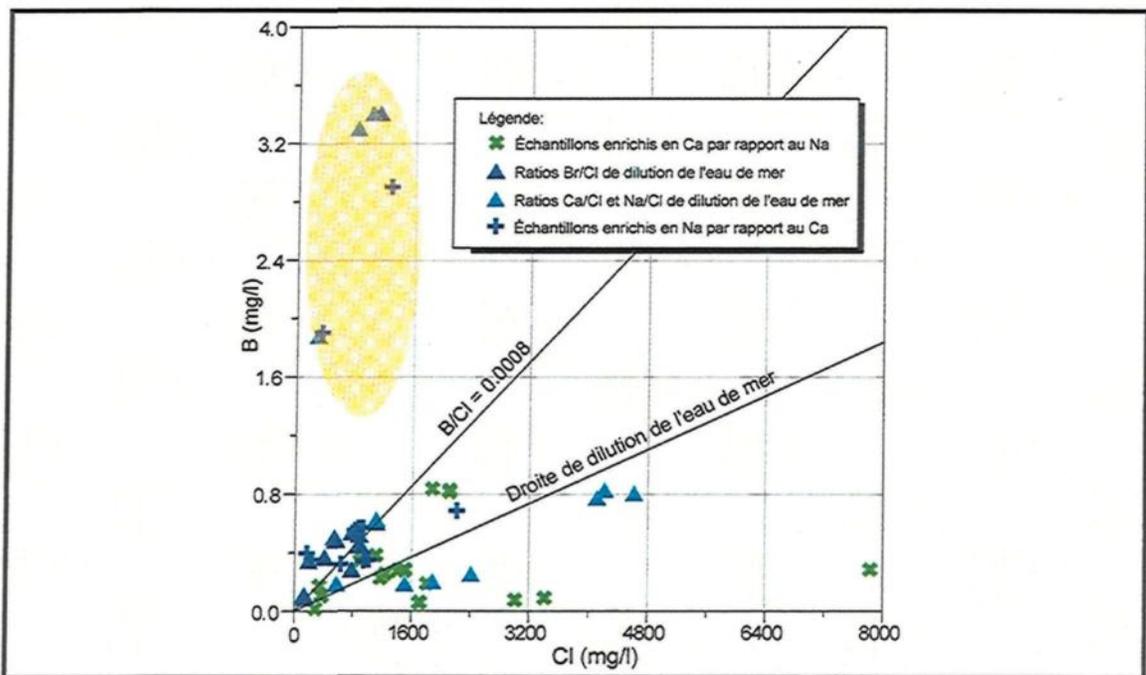


Figure 7.10: Relation entre le bore et les chlorures. Les échantillons anormaux en bore proviennent tous du même secteur d'échantillonnage : Pointe Chambord.

7.2.3 ÉTUDE DES ISOTOPES STABLES DE L'EAU : ^{18}O ET ^2H

Les saumures provenant de roches cristallines présentent généralement des valeurs de $\delta^2\text{H}$ supérieures à -35‰ et de $\delta^{18}\text{O}$ inférieures à 0‰ (Fritz et Lodmann, 1990). Leur origine - météoritique, océanique ou magmatique - reste encore incertaine car leur signature isotopique initiale a été effacée (Clark, 1997).

La figure 7.11, sur laquelle sont placées les analyses isotopiques effectuées dans cette étude, est tirée de Frapet et Fritz (1987). Sur cette figure, la droite des eaux météoritiques (*Global meteoritic water line : GMWL*) suit l'équation générale de Graig (1961). Des échantillons provenant de divers environnements géologiques d'Amérique du Nord y sont aussi représentés et permettent de définir les tendances isotopiques générales des saumures contenues dans ces milieux (Bouclier Canadien, principaux bassins sédimentaires). Considérant les précisions de la méthode analytique (cf. chap 5), soit $\pm 2\text{‰}$ pour le $\delta^2\text{H}$ et $\pm 0.15\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$, certains échantillons analysés se trouvent sur la droite des eaux de pluie. Pour ces échantillons, la tendance est à l'accroissement pour le $\delta^2\text{H}$ et pour le $\delta^{18}\text{O}$ le long de la droite météoritique, en direction du pôle de l'eau de mer ($\delta^2\text{H} = -5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$). Cette évolution traduit le mélange entre l'eau de mer et l'eau météoritique. Pour les autres échantillons, la tendance générale suggère un enrichissement en ^2H et un appauvrissement en $\delta^{18}\text{O}$ par rapport à l'eau de pluie. Cette tendance situe nos échantillons dans le champ des saumures du Bouclier

Canadien en direction d'une composition isotopique éventuelle d'une source commune aux saumures du Bouclier Canadien telle que proposée par Frapé et al. (1984) et Frapé et Fritz (1987).

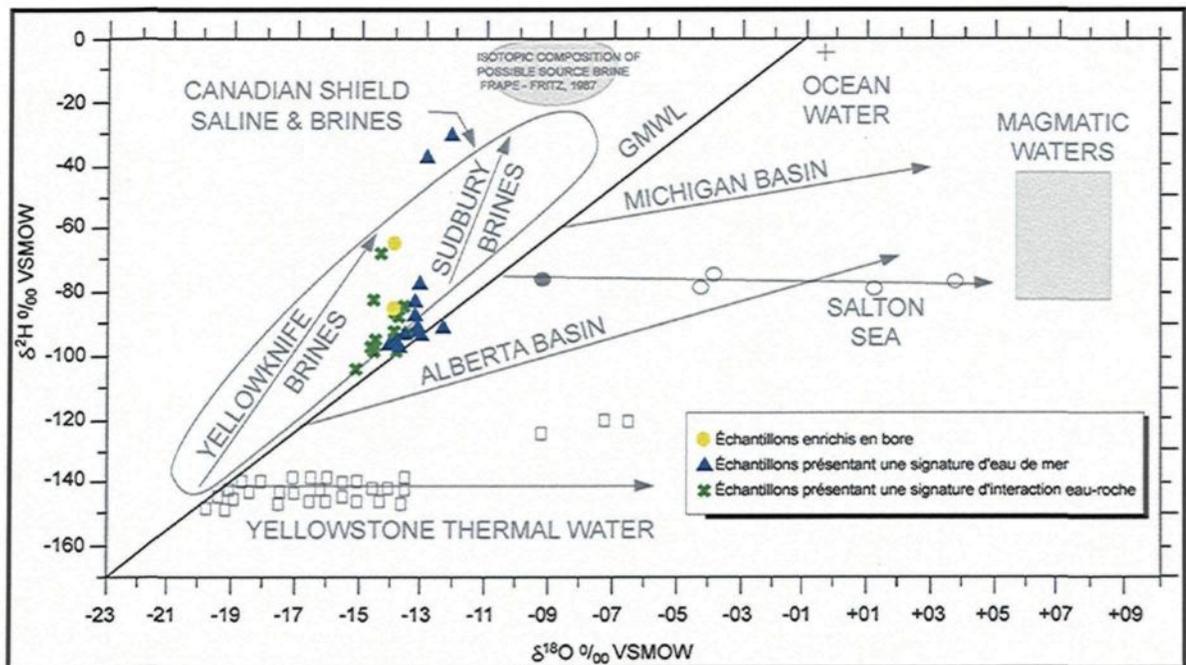


Figure 7.11: Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (‰) (modifiée de Frapé et Fritz, 1987).

7.3 DISCUSSION

La figure 7.12 illustre le raisonnement qui a servi à dégager les principales conclusions sur les processus à l'origine de la chimie des échantillons. Parmi les 62 échantillons de types (Na-Ca)-Cl, la relation entre les bromures et les chlorures de 18 échantillons de type Na-Cl suggère l'origine marine de ces 2 éléments. Parmi les 44 restant, 12 échantillons de type Na-Cl présentent des rapports Na/Cl

et Ca/Cl de l'eau de mer. Ces observations suggèrent que la salinité de 30 échantillons sur 62 tire son origine de l'eau de mer. Pour 30 échantillons des 32 qui restent, la relation entre le calcium et le strontium corrèle positivement. Dans leur cas, la salinité semble avoir une origine crustale acquise par l'interaction entre l'eau et la roche (argilisation des plagioclases et dissolution). Les 2 échantillons restant montrent une relation Ca/Sr et K/Mg similaire aux échantillons dont la composante marine a été mise en évidence. De plus, ces 2 échantillons et 4 échantillons présentant une signature d'eau de mer se distinguent des autres par des teneurs plus importantes en bore et en lithium. Les 6 échantillons proviennent tous de Chambord où sont identifiées des roches sédimentaires paléozoïques à grain fin d'origine marine (shale). Pour ces échantillons, les processus d'interaction entre l'eau et la roche permettent d'expliquer une partie de leur chimie, sans toutefois expliquer leur signature marine.

Les échantillons qui répondent à l'une ou l'autre des 3 origines possibles de la salinité, de même que les échantillons de type (Na-Ca)-HCO₃, sont placés sur une carte de la région ou sont aussi présentés les dépôts meubles et le socle rocheux (figure 7.13). À la lumière de cette figure et d'après les connaissances existantes dans la littérature (section 3.3), deux hypothèses sont retenues pour expliquer la salinité de l'eau souterraine autour du lac Saint-Jean : l'évolution de l'eau souterraine contenue dans le socle rocheux (7.3.1) et le lessivage des argiles de la mer Laflamme (7.3.2)

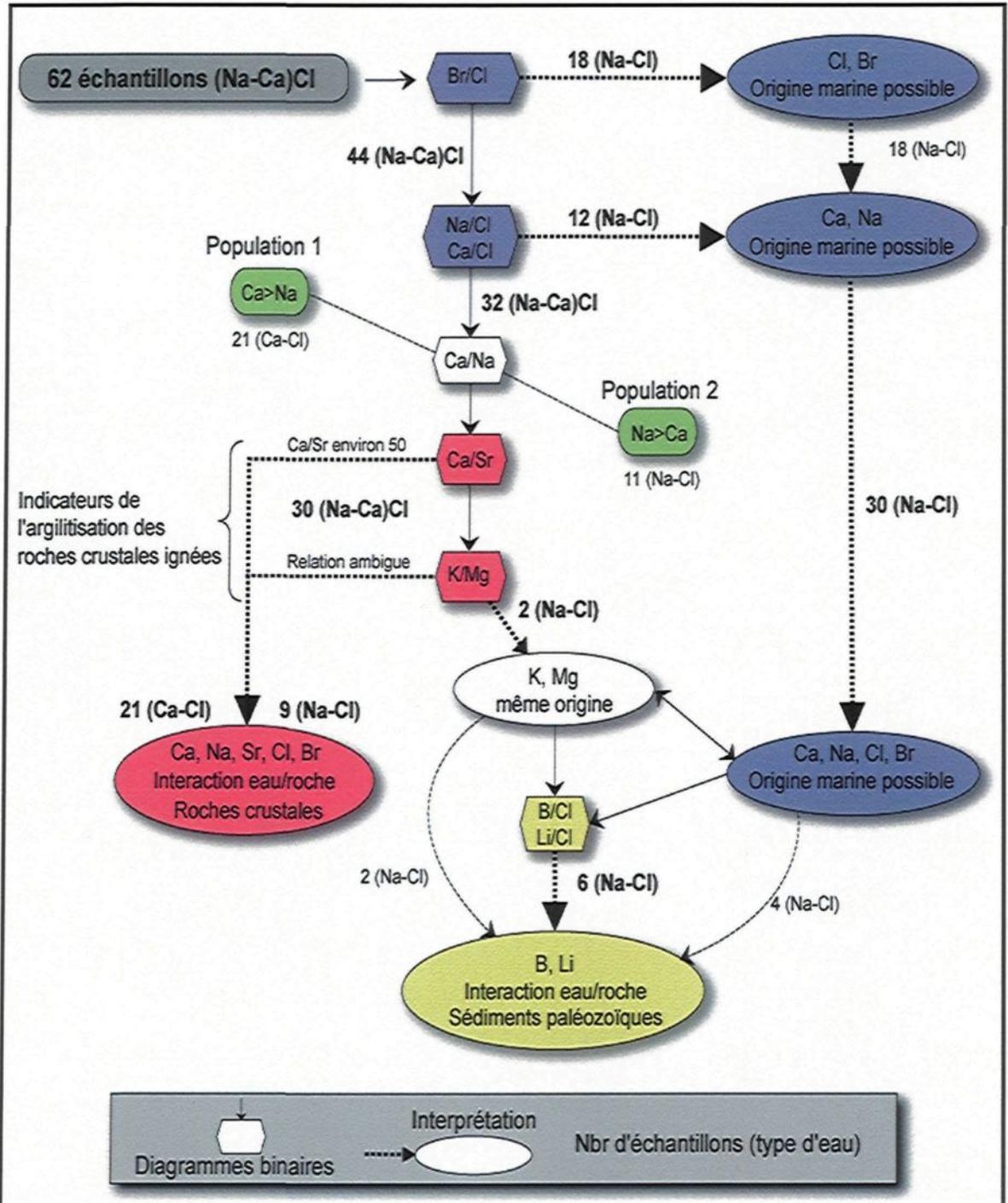


Figure 7.12: Raisonnement appliqué dans le cadre de cette étude.

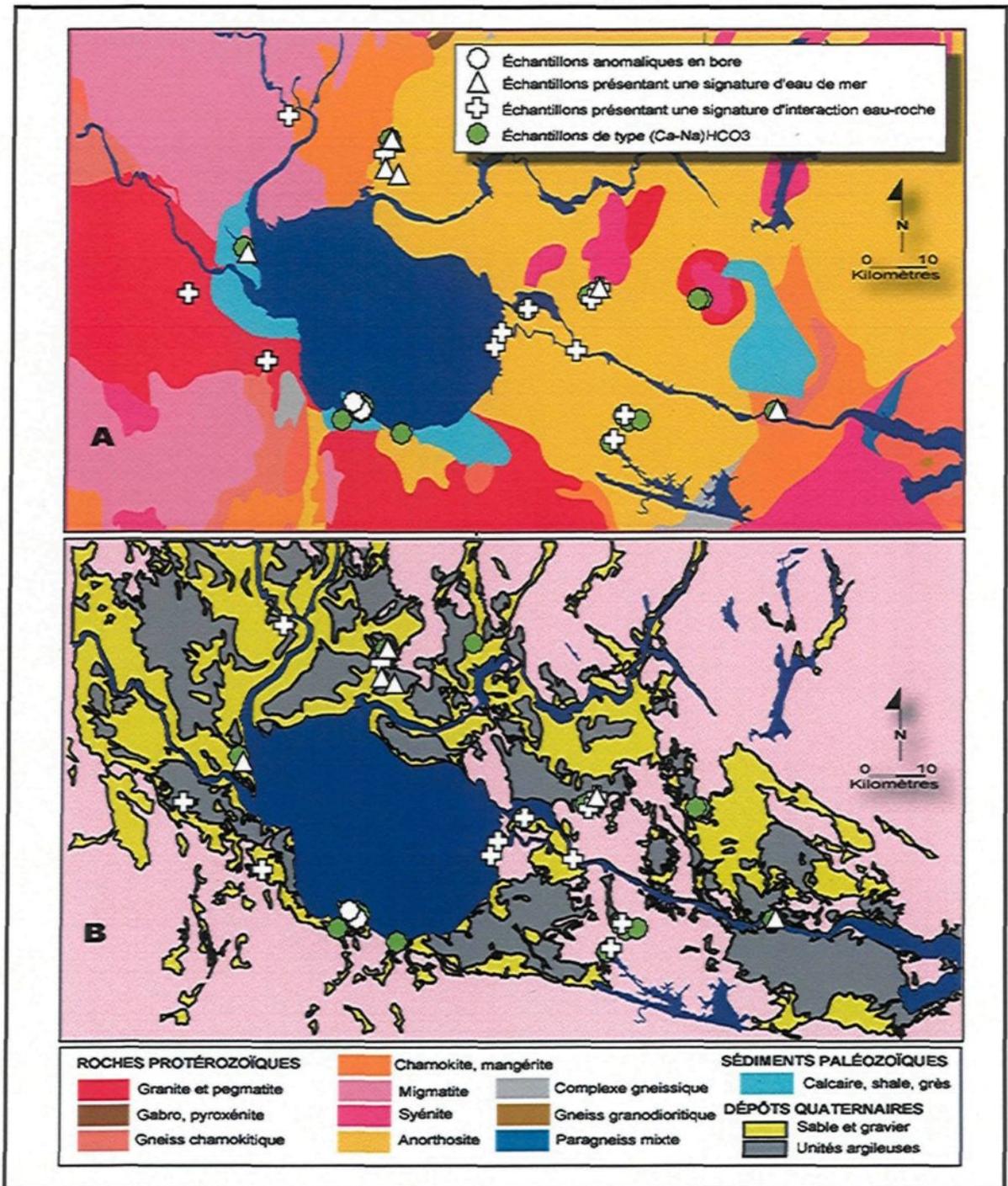


Figure 7.13: Localisation des échantillons anormaux en bore, présentant une signature d'eau de mer, présentant une signature d'interaction eau/roche et de type (Na-Ca)-HCO₃ sur A) la carte du socle rocheux modifiée de Avramtchev (1993) et B) la carte des dépôts meubles simplifiée de Lasalle et Tremblay (1978) tirée de Mc Cormack (1985)

7.3.1 ÉVOLUTION DE L'EAU SOUTERRAINE DU SOCLE ROCHEUX

Selon le modèle de Gascoyne et Kamineni (1994) schématisé à la figure 7.14 et qui se veut applicable aux différents types de roches plutoniques, les eaux souterraines récentes sont faiblement concentrées, légèrement acides et du type Ca-HCO₃. Leur évolution le long de leur parcours amène ces eaux au type Na-HCO₃, avec une augmentation de l'acidité suite à l'interaction avec le plagioclase, la précipitation de la calcite et les échanges ioniques avec les minéraux argileux. Ces eaux bicarbonatées se rencontrent principalement dans les premiers 100 à 200 m de profondeur. Ces eaux sont généralement de très bonne qualité. Plusieurs échantillons de cette étude, bien que biaisée par la problématique des eaux minéralisées, présentaient une telle signature (figure 7.14). Par la suite, ces eaux peuvent devenir sulfatées, notamment en présence de minéraux sulfurés. À de plus grandes profondeurs, les eaux deviennent du type chloruré et leur salinité augmente. Cette évolution est observée en fonction de la profondeur ou en fonction de la distance de parcours le long d'une trajectoire d'écoulement, et ce quel que soit le type de roche (plutons de granite, de gabbro et de gneiss). À noter que la figure de Gascoyne et Kamineni (1994) illustre une zone de recharge uniquement, ce qui a pour effet l'augmentation du temps et de la distance de parcours en fonction de la profondeur. Pour certains échantillons de cette étude, ce modèle est une hypothèse permettant d'expliquer la chimie acquise par l'interaction entre l'eau et les roches crustales (figure 7.12)

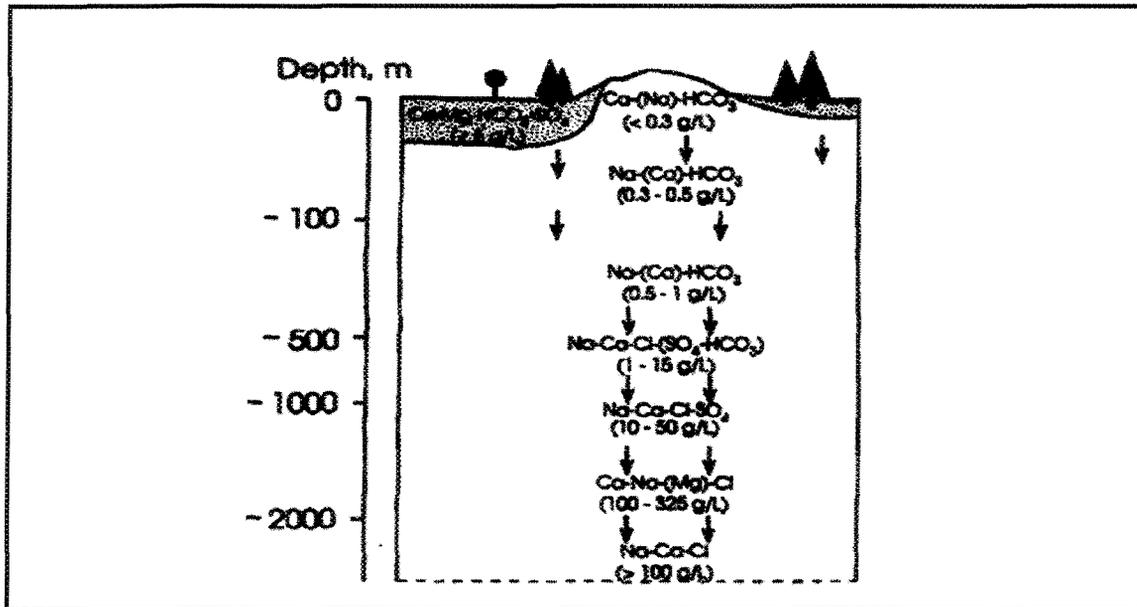


Figure 7.14 Évolution géochimique des fluides dans les roches cristallines en fonction de la profondeur (Gascoyne et Kamineni, 1994).

Tòth (1984) suggère que la qualité des eaux souterraines est en relation directe avec leur régime hydraulique, de même que la taille de la cellule d'écoulement, laquelle peut être locale, intermédiaire ou régionale. Contrairement à Gascoyne et Kamineni (1994), il met davantage l'accent sur l'écoulement, incluant des zones de recharge et des zones de décharge pour expliquer l'évolution de l'eau souterraine. Tout au long de leur trajet, les eaux souterraines interagissent avec leur environnement. L'écoulement sert de mécanisme de mobilisation, de transport (distribution) et d'accumulation. La figure 7.15, tirée de Tòth (1999), représente un bassin idéalisé avec, d'une part une cellule unique d'écoulement sous un relief relativement " plat ", illustré dans la partie gauche de la figure, et d'autre part une topographie irrégulière produisant des cellules de trois échelles différentes, illustrées dans la partie droite de la figure. La topographie en

cuvette de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, avec au centre le lac Saint-Jean, peut concentrer les zones de décharge d'eaux souterraines profondes autour du lac Saint-Jean (écoulement régional de la figure 7.15). Leurs zones de recharge seraient situées dans les hautes terres de la région (chapitre 1). Toutefois, sans une bonne connaissance de la dynamique des eaux souterraines aux endroits échantillonnés, ce modèle ne peut être affiné.

Tòth (1999) considère aussi la présence de vestiges d'eau de salinité différente et généralement plus élevée, comme l'eau de mer, dans des unités géologiques de plus faible perméabilité. Ces eaux « fossiles » constituent une source à long terme pour certaines substances en solution (Tòth, 1999). Dans cette étude, dans un secteur d'échantillonnage de Chambord, un environnement de faible perméabilité (horizon de shale) a été décrit dans un forage du *SIH* (chapitre 4). C'est aussi dans ce secteur que les échantillons enrichis en bore ont été échantillonnés (figure 7.13). Pour ces échantillons, des processus d'interaction entre l'eau et la roche ont été proposés pour expliquer l'origine de la salinité, de même que la participation de l'eau de mer (figure 7.12). Appuyé par le modèle de Tòth (1999), l'hypothèse de la présence de vestiges d'eau de mer et leur mélange avec une eau minéralisée profonde du Bouclier Canadien faisant résurgence à Chambord peut être proposée pour expliquer la chimie de ces échantillons. L'étude isotopique menée dans le cadre de ce projet ne va pas à l'encontre de cette hypothèse, ni d'ailleurs ne l'appuie. Cependant, la seule indication de shale dans

un forage du *SIH* ne suffit pas à confirmer qu'il s'agit d'un milieu propice aux phénomènes décrits plus haut.

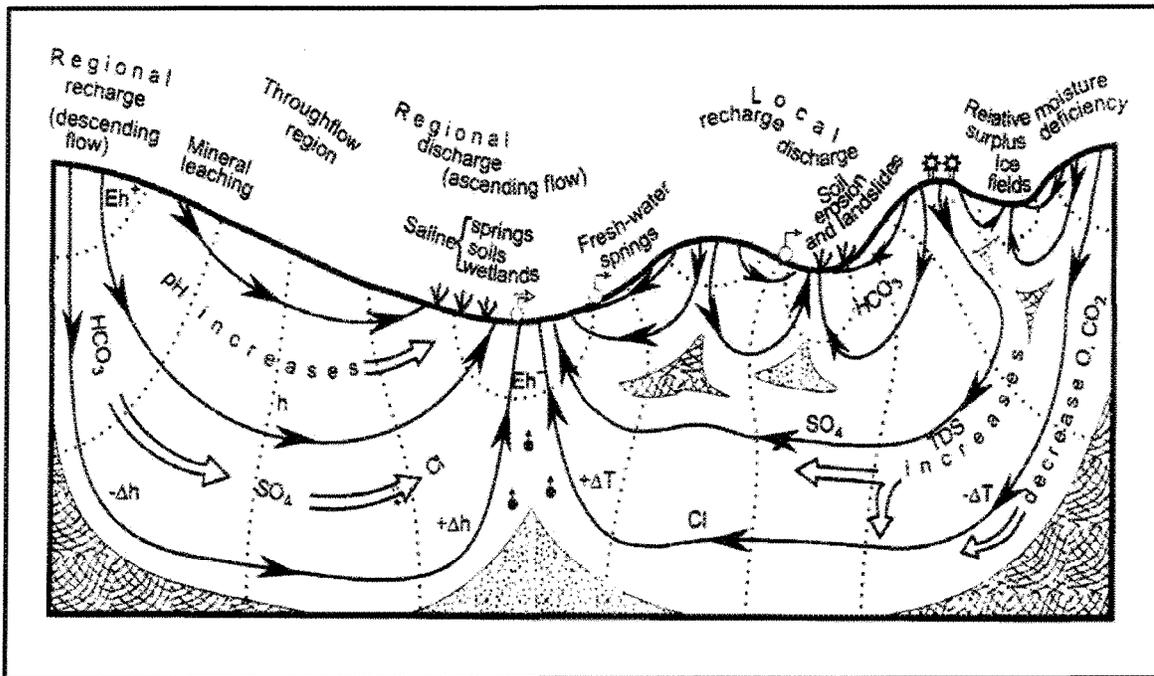


Figure 7.15: Cellules d'écoulement et influence d'une topographie irrégulière sur la taille de ces cellules (locale, intermédiaire et régionale) (tirée de Tóth, 1999).

Dans les modèles de Tóth (1999) et de Gascoyne et Kamineni (1994), la possibilité que certaines composantes puissent venir de la base de la croûte ou même du manteau n'est pas considérée. Cette hypothèse est notamment évoquée pour des sources minérales de l'Europe centrale (Babuska et Plomerova, 2003).

7.3.2 LESSIVAGE DES ARGILES DE LA MER LAFLAMME

L'hypothèse du lessivage des argiles d'origine marine a été évoquée par Dessureault (1975) pour expliquer la salinité des eaux souterraines dans les graviers fluvio-glaciaires et dans la roche en place au Saguenay-Lac-Saint-Jean. La salinité actuelle de l'eau interstitielle des argiles de la mer Laflamme varie de 0.2 à 16 g/L, que l'on peut comparer à l'eau de mer dont la salinité est l'ordre de 34 g/L (Bouchard et al., 1993). Ceci suggère soit d'importants apports locaux d'eau douce au cours du dépôt de ces argiles, ou bien des phénomènes de délavage ou de diffusion après leur dépôt (Bouchard et al., 1993). Il est intéressant de constater que les échantillons de type Na-Cl pour lesquels une composante marine a été identifiée sont majoritairement situés dans les environnements où les argiles sont présentes, le plus souvent dans la portion nord du territoire sous étude (figure 7.13). De plus, certains secteurs échantillonnés (Sainte-Jeanne-d'Arc et Péribonka) dans ces environnements montrent souvent d'importantes épaisseurs d'argile marine dans les forages du *SIH* (chapitre 4) qui recouvrent des sables et graviers dans lesquels au moins un puits échantillonné aboutit (eau salée). Ces observations ajoutées à la géochimie dégagée du raisonnement appliqué à cette étude (figure 7.12) suggèrent la participation de la mer Laflamme pour expliquer la chimie des échantillons de type NaCl en bleu sur la figure 7.12.

CONCLUSION

Les eaux souterraines de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean sont l'objet d'une première étude géochimique et isotopique, avec accent sur les aquifères de roc fracturé. La démarche employée dans cette étude permet de déterminer l'origine la plus probable pour certains éléments chimiques à la lumière de processus faisant intervenir ces éléments.

Au total, 17 secteurs et sous-secteurs ont été visités, chacun présentant entre 1 et 7 stations. Pour ces secteurs, une connaissance sommaire et approximative de la géologie a été possible grâce aux informations contenues dans la banque de données du *SIH (Système d'Information Hydrogéologique)* du MDDEP. Les prélèvements d'eau souterraine ont été effectués à trois périodes de l'année, soit aux mois de novembre et décembre 2004, au mois de février 2005 et au mois de mai 2005, pour un total de 96 échantillons.

Considérant un intervalle de fiabilité basé sur l'erreur sur la balance ionique de +/- 10%, 5 échantillons sur les 96 de cette étude ont été rejetés dû à un

déséquilibre trop important entre les anions et les cations en solution. Les 91 échantillons restants ont fait l'objet d'une étude statistique montrant parfois d'importantes différences entre les diverses valeurs centrales (moyennes arithmétiques, géométriques et médiane). Pour être comparées entre elles, les variations des divers paramètres analysés ont été normalisées par rapport à la moyenne arithmétique des valeurs de ce paramètre pour les trois campagnes d'échantillonnage. Trois types de variations ont été observés dans cette étude : 1) la variation des paramètres mesurés *in situ*, 2) les variations temporelles des résultats d'analyse et 3) les variations spatiales des résultats d'analyse. Parmi les paramètres analysés en laboratoire, les fluorures sont les plus variables car 11 échantillons sur 76 montrent une variation de $\pm 1,2$ mg/L (moyenne arithmétique des trois campagnes pour cet élément, variation relative de 100%) entre deux campagnes d'échantillonnage. Parmi les causes de variations, les variations induites peuvent être distinguées des variations naturelles qui reflètent des situations changeantes sur le terrain.

L'étude des résultats analytiques permet de définir deux principaux faciès hydrochimiques sur les portions du territoire à l'étude : un type bicarbonaté (Na-Ca)-HCO₃ dont le TSD moyen est de 300 mg/L (29 échantillons) et un type chloruré (Na-Ca)-Cl dont le TSD moyen est de 4000 mg/L (62 échantillons). Plusieurs dépassements des maximums acceptables fixés par Santé Canada (2007) sont observés pour les échantillons de cette étude, ce qui s'explique très

bien par le fait que l'échantillonnage était délibérément biaisé en faveur des eaux souterraines à fort contenu en minéraux dissous. Parmi eux, notons toutefois le cas de 30 échantillons qui dépassent le maximum acceptable pour les fluorures (1,5 mg/L) dont la concentration ne semble pas influencée par le type d'eau.

Parmi les 62 échantillons de type chloruré, trois types de salinité ressortent de la démarche proposée : 1) une salinité propre à l'eau de mer, 2) une salinité qui reflète l'interaction entre l'eau et la roche, et 3) une salinité qui reflète l'interaction entre l'eau et la roche conjuguée à une composante marine. Les modèles de Gascoyne et Kamineni (1994) et de Tòth (1999) sont évoqués pour expliquer le type 2) et 3). Toutefois, ces modèles, en particulier celui de Tòth (1999), implique une meilleure connaissance de la dynamique d'écoulement des systèmes aquifères échantillonnés, ce qui permettrait de tirer des conclusions plus détaillées sur l'origine des processus responsables de la salinité observée en situant les échantillons dans les cellules d'écoulement. Sans cette dimension très importante, les conclusions apportées par cette étude restent au stade d'hypothèses. Pour le premier type de salinité observé (signature d'eau de mer), la description des secteurs échantillonnés vont dans le sens de Dessureault (1975), qui suggère le lessivage des argiles de la mer Laflamme comme source de la salinité. Dans ce cas, l'analyse chimique et isotopique de l'eau interstitielle contenue dans les argiles en comparaison avec l'analyse chimique et isotopique de l'eau souterraine permettrait sans doute d'éclaircir ce point.

De façon générale, une analyse isotopique plus systématique de l'ensemble des échantillons d'une telle étude préciserait certainement les résultats obtenus. De plus, plusieurs auteurs s'entendent pour dire que la géochimie des isotopes du bore est aussi un bon traceur de l'évolution naturelle des eaux souterraines (Bottomley et al., 1994). Ce type d'analyse permettrait notamment d'approfondir le cas des échantillons anormaux en bore et en lithium du secteur de Chambord.

Aussi, les diverses populations présentes dans l'échantillonnage pourraient être identifiées à l'aide d'analyses statistiques multidimensionnelles (analyses en grappes ou en composantes principales). Parmi les autres populations distinctes possibles, mentionnons les 3 ou 4 lignes horizontales plus ou moins continues et définies entre les pôles Cl et HCO₃ qui se distinguent par leur rapport Na/Ca de la figure 7.1. De plus, les échantillons hivernaux, plus concentrés, devraient se distinguer.

Enfin, un portrait plus complet de l'hydrogéochimie des eaux souterraines au Saguenay-Lac-Saint-Jean pourrait être obtenu par une étude visant la cartographie régionale de la qualité de l'eau souterraine avec mesure systématique de la dureté et de la salinité selon une maille d'échantillonnage homogène à l'échelle du territoire et avec un meilleur contrôle du milieu échantillonné.

RÉFÉRENCES

- Avramtchev L.;** 1993. Carte minérale de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Ministère de l'énergie et des ressources du Québec, 1 carte. PRO9307.
- Babuska V. et Plomerova J.;** 2003. Seismic experiment searches for active magmatic source in deep lithosphere, Central Europe; EOS Transactions, American Geophysical Union, Vol.84 no.40, Oct 7 2003, p.409, 416-417.
- Baillargeon G.;** 1990. Méthodes statistiques de l'ingénieur, vol1, 3^e édition, Trois-Rivières, Les Éditions SMG, 686 pages + annexes.
- Barth S.R.;** 2000. Stable isotope geochemistry of sediment-hosted groundwater from a late Paleozoic-early Mesozoic section in Central Europe. Journal of Hydrology, V. 235 no 1-2, pp. 72-87.
- Beaucaire C., Michard G.;** 1982. Origin of dissolved minor elements (Li, Rb, Sr, Ba) in superficial waters in a granitic area. Geochemical. Journal, vol.16, pp. 247-258.
- Beaucaire C., Gassama N., Tresonne N., Louvat D.;** 1999. Saline groundwaters in the hercynian granites (Chardon Mine, France : geochemical evidence for the salinity origin. Applied Geochemistry, vol 14, pp. 67-84.
- Bédard P.;** 2000. L'utilisation des appareils HACH pour la géochimie de l'eau. Document interne non publié, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Qc, Canada, 32 p.
- Blum A., Barbier J., Chery L., Petelet-Giraud E.;** 2001. Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. BRGM / RP-51093-FR.
- Brady P.V., Walther J.V.;** 1989. Controls on silicate dissolution rates in natural and basic pH solutions at 25°C. Geochimica and Cosmochimica. Acta, 53, pp 2823 – 2830.
- Bottomley D.J., Grégoire D.C., Raven K.G.;** 1994. Saline groundwaters and brines in the Canadian Shield: geochemical and isotopic evidence for a residual evaporate brine component. Geochimica. and Cosmochimica. Acta 58, pp 1483 – 1498.

- Bouchard R., Dion D.J., Tavenas F.;** 1983. Origine de la préconsolidation des argiles du Saguenay, Québec. *Can. Geotech. J.*, vol. 20, pp. 315-328.
- Clark I.D.;** 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Lewis Publishers, pp. 328.
- Dessureault R.;** 1975. *Hydrogéologie du Lac Saint-Jean – Partie nord-est*, Québec. Ministère des Richesses naturelles.
- Durov S.A.;** 1948. Klassifikatsia prirodnykh vod i graficheskoe izobrazhenie ikh sostava. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, V. 59 no 1, pp. 87-90.
- Edmunds W.M., Andrews J.N., Burgess W.G., Kay R.L.F., Lee D.J.;** 1984. The evolution of saline and thermal groundwaters in the Carnmenelis granite. *Mineralogical Magazine*, v. 48, pp. 407-424.
- Edmunds W.M., Kay R.L.F., McCartney R.A.;** 1985. Origin of saline groundwaters in the Canmenelis granite : Natural processes and reaction during Hot Dry Rock reservoir circulation. *Chemical Geology*, v. 49, pp 287 – 302.
- Edmunds W.M., Cook J.M., Miles D.L.;** 1986. Lithium mobility and cycling in dilute continental waters. *Proc. 6th Int. Symp. Water-Rock Interaction*. Orkustofnun, Reykjavick, pp. 187-191.
- Edmunds W.M, Key R.M.;** 1996. Hydrogeochemistry as an aid to geological interpretation: the Glen Roy area, Scotland. *Journal of the Geological Society*, London, vol. 153, pp. 839-852.
- ENCOM;** 2001. *Discover*, version 4.02. Encom Technology Pty Ltd., Sydney, Australia.
- Fontes J. Ch., Louvat D., Michelot J.L. ;** 1989. Aqueous sulfate from the Stripa groundwater system. *Geochemica and Cosmochimica. Acta* 53, pp. 1783-1789.
- Frape S.K., Fritz P., McNutt R.H.;** 1984. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the canadian shield. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 48, pp. 1617 – 1627.
- Frape S.K., Fritz P.;** 1987. Geochemical trends for groundwaters from the Canadian Shield. *Geological Association of Canada Special paper* 33, pp. 19 – 38.

- Freeze R.A., Cherry J.A. ;** 1979. Groundwater. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 604p.
- Fritz P., Frape S.K;** 1982. The Chemistry and isotopic composition of saline groundwaters from the Sudbury Basin, Ontario. Can. J. Earth Sci., v.19, pp 615 – 661.
- Fritz P., Lodemann M.;** 1990. Die salieren Tiefenwässer des KTB-Vorbohrung. Geowissenschaften 8, pp. 273-278.
- 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, vol. 12, pp- 851-856.
- Gascoyne M., Davidson C.C., Ross J.D., Pearson R.;** 1987. In: Fritz, P., Frape S.K. (Eds) Saline Waters and Gases in Cristalline Rocks. Geological Association of Canada, Special paper 33, 53-69.
- Gascoyne M., Kamineni D.C.;** 1994. The hydrogeochemistry of fractured plutonic rocks in the Canadian Shield. Applied Hydrogeology v. 2/94, pp. 43 – 49.
- Gauthier M-J., Bouchard L-M. ;** 1980. Atlas régional du Saguenay-Lac-Saint-Jean, Chicoutimi, Les Laboratoires de géographie. Université du Québec à Chicoutimi, Gaétan Morin édition, 98 planches.
- Graig H.;** 1961. Isotoppic variations in meteoric waters. Science vol 133, pp. 1702-1703, Washington.
- Gravel J.;** 1974. Minéralogie de l'argile Champlain de Saint-Jean-Vianney. Thèse de maîtrise, département de géologie, Université Laval, Québec, Qué.
- Gustafson G., Krásný J.;** 1994. Cristalline rock aquifers: their occurrence, use and importante. Applied Hydrogeology vol. 2 pp. 64-75.
- HACH;** 1989. Water Analysis Handbook. Hach Company, CO, USA, 690 p.
- Hébert C., Lacoste P.;** 1998a. Géologie de la région de Jonquière et Chicoutimi. Ministère des Ressources naturelles du Québec, RG 97-08.
- Higgins M.D., Van Breemen O.;** 1996. Three generations of AMCG magmatism, contact metamorphism ant tectonism in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region, Grenville Province, Canada. Precambrien Research, vol 79, pp. 327-346.

- Kalmia**; 1991-1994. *WINSTAT* Statistic for Windows, Versions 3.0, Kalmia Co. Inc.
- Koch G.S. et Link R.F.**; 1971. *Statistical Analysis of Geological Data*; 2 vol. Dover Publ.
- Kumarapeli P.S.**; 1985. Vestiges of lapetan rifting in the craton west of the northern Appalachians. *Geoscience Canada*, vol. 12, pp 54-57.
- Laaksoharju L., Smelie J., Nilson A. Ch., Skarman Ch.**; 1995. Goundwater sampling and chemical characterisation of the Laxemar deep borehole. Swed. Nuclear Fue and Waste Management Co. SKB Tech. Rep. 95-05 pp. 74.
- Lamontagne E.**; 1993. Étude de la fracturation au lac Saint-Jean. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de la terre, pp. 212.
- LaSalle P., Tremblay G.**; 1978. Dépôts meubles Saguenay-Lac-Saint-Jean. Rapport géologique 191, Ministère des Richesses naturelles du Québec, Québec, Qué., 61p.
- Laurin A.F., Sharma K.N.M.**; 1975. Région des rivières Mistassini, Péribonka et Saguenay. Ministère des mines et des ressources du Québec, rapport géologique 161, 89 p.
- MENVQ** ; 1999. Portrait régional de l'eau, Saguenay-Lac-Saint-Jean (Région administrative 02), Ministère de l'Environnement du Québec, Gouvernement du Québec.
[http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region02/02-saglac\(suite\).htm](http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/regions/region02/02-saglac(suite).htm) , consulté le 7 mai 2007
- MDDEP** ; 2006. Système d'information hydrogéologique (SIH), Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm> , consulté le 15 janvier 2008.
- Nordstrom D.K., Andrews J.N., Carlsson L., Fontes J.C, Fritz P., Moser H., Olssen T.**; 1985. Hydrogeological and hydrogeochemical investigations in boreholes – final report of the phase 1 geochemical investigations of the Stripa groundwaters : SKB Stripa Project. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Compagny, Report 85-06, 250p.
- Rasmussen H., Rouleau A. et Chevalier S.** (éditeurs), 2006 (2^e éd.). *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captage d'eau souterraine*; Centre d'études sur les ressources minérales, UQAC, et

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, mars 2006, 385 pages.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protoc/index.htm>

Rivers T., Martignole J., Gower C., Davidson T.; 1989. New Tectonic divisions of the Grenville province. Southeast Canadian shield. *Tectonic*, vol. 8, pp. 63-84.

Roy D.W., Rouleau A.; 1999. Les eaux souterraines au Saguenay-Lac-Saint-Jean, mise en valeur et protection. Document synthèse, Conseil régional de concertation et de développement, Centre d'étude sur les ressources minérales, 41p.

Roy D.W.; 1996. Voyage géologique au Saguenay-Lac-Saint-Jean. *Saguenayensia*, vol. 38, no2, pp. 27-38.

Roy D.W., Schmitt L., Woussen G., DuBerger R.; 1993. Lineaments from airborne SAR Images and the 1988 Saguenay Earthquake, Québec, Canada. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 59/8, pp. 1299-1305.

Santé Canada; 2007. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire. 2007, 15p.
En ligne : <http://www.waterquality.ec.gc.ca/FR/4851/4865/4872/4874.htm> I; consulté le 15 septembre 2007.

Simard, G. and Des Rosiers, R.; 1979. Qualité des eaux souterraines du Québec, Rap. H.G.-13, Service des eaux souterraines, Ministère de l'Environnement, 161p.

Stober I., Bucher K.; 1999. Deep groundwater in the cristalline basement of the Black Forest region. *Applied Geochemistry* 14, pp. 237-254.

Stober I., Bucher K.; 2000. Hydrogeology of crystalline rocks. Kluwer Academic Publishers, pp. 141-175.

Thivierge S., Roy D.W., Chown E.H., et Gauthier A.; 1983. Évolution du complexe alcalin de St Honoré (Québec) après sa mise en place. *Mineralium Deposita*, v. 18, pp. 267-283.

Tòth J.; 1984. The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of ground water. In: Hitchon B. and Wallick EI (Eds) *Proc First Canadian/American Conference om Hydrogeology. Practical Applications of Ground Water Geochemistry*, Worthington, Ohio. 1984, National Water Well Association and Alberta Research Council, pp. 3-39.

- Tóth, J.;** 1999. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations, *Hydrogeology Journal*, 7, pp. 1-14.
- Tremblay G.;** 1976. Géologie et géomorphologie quaternaires, partie Est du Lac-Saint-Jean et Saguenay supérieur. Guide d'excursion, Département de géographie - Université Laval, Québec, 227p.
- Vengosh A., Starinsky A., Kolodny Y., Chivas A.R.;** 1991. Boron isotope geochemistry as a tracer for the evolution of brines and associated hot springs from the Dead Sea, Israel. *Geochemica and Cosmochimica. Acta* 55, pp. 1689 – 1695.
- Vidal P.;** 1998. Géochimie. 2^e édition, Dunod, 188 pages.
- WHI;** 2005. Aquachem, version 5.0. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Ont, Canada.

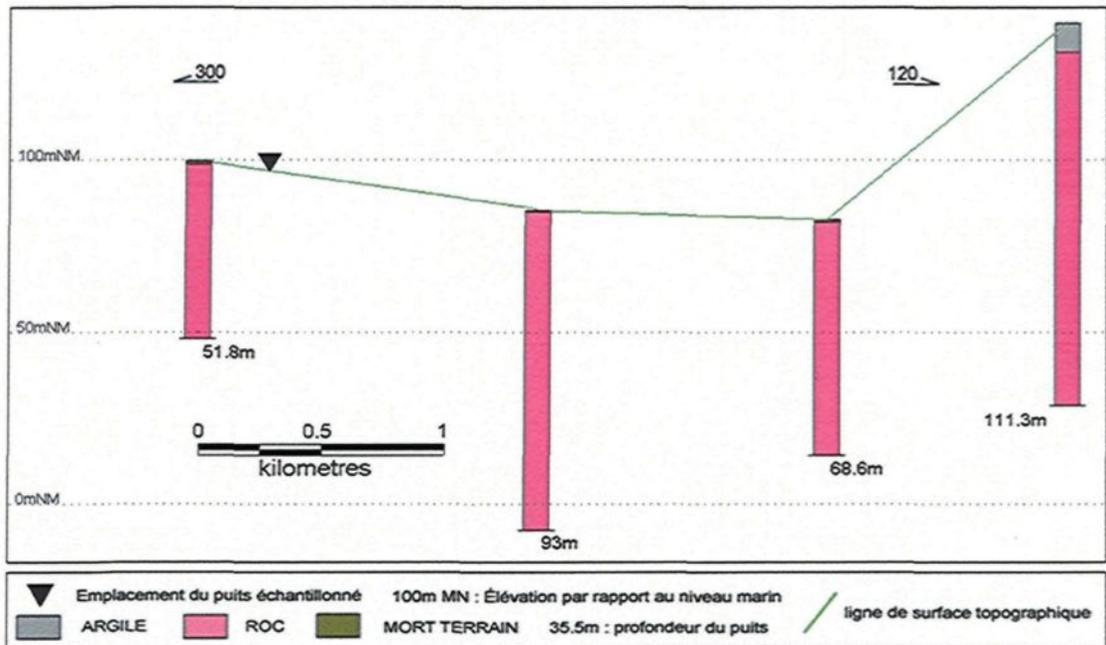
ANNEXE A: Coupes stratigraphiques

Cette annexe contient les coupes stratigraphiques effectuées dans les secteurs d'échantillonnage (chap. 4) à l'aide de puits identifiés dans la banque de données du système d'information hydrogéologique (SIH). Les sections sont obtenues par projection des puits contenus dans une enveloppe rectangulaire de dimension minimum 250m et de dimension maximale 500m de chaque côté de la ligne de coupe. Les profondeurs correspondent aux valeurs données dans la banque de données du SIH. Ces coupes sont produites à l'aide du logiciel ENCOM (2001) Discover, version 4.02.

SOMMAIRE DE L'ANNEXE A

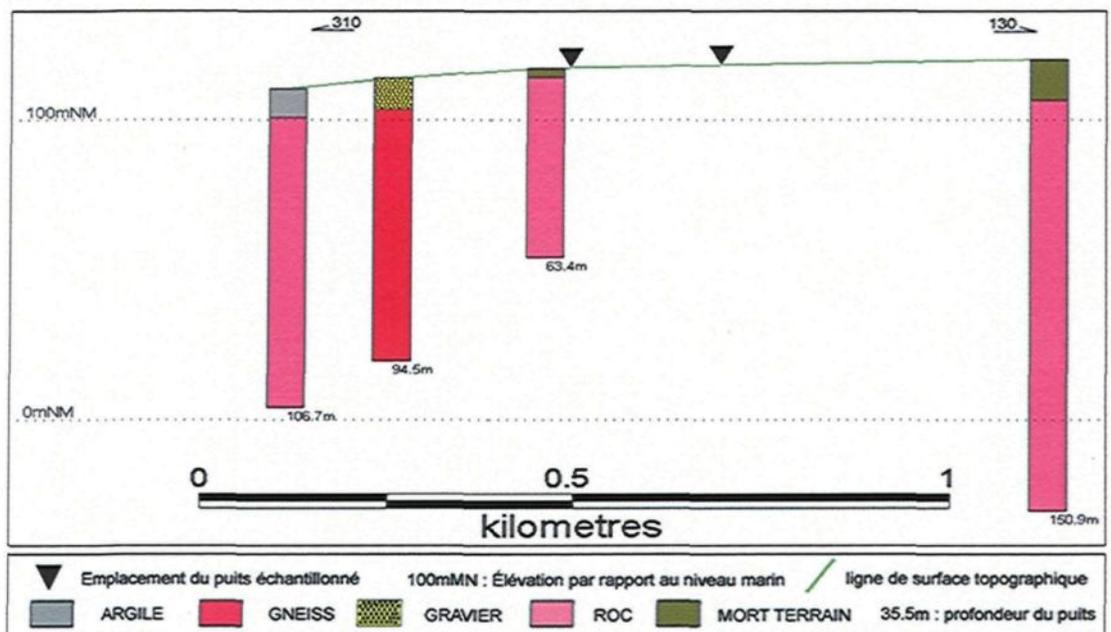
Secteurs vu en coupe	pages
Vue en coupe du secteur d'Alma – Villebois	113
Vue en coupe du secteur d'Alma – Dam-en-Terre	113
Vue en coupe du secteur de Chambord – Domaine du Marais	114
Vue en coupe du secteur de Chambord village et Pointe Chambord	114
Vue en coupe du secteur de Dolbeau	115
Vue en coupe du secteur de Larouche – Jonquière	115
Vue en coupe du secteur de Larouche – Lac Kénogami	116
Vue en coupe du secteur de Péribonka	116
Vue en coupe du secteur de Saint-Ambroise	117
Vue en coupe du secteur de Saint-Gédéon	117
Vue en coupe du secteur de Roberval	118
Vue en coupe du secteur de Sainte-Jeanne D'Arc	118
Vue en coupe du secteur de Saint-Méthode	118
Vue en coupe du secteur de Saint-Nazaire	119
Vue en coupe du secteur de Saint-Prime	119

Vue en coupe du secteur d'Alma – Villebois



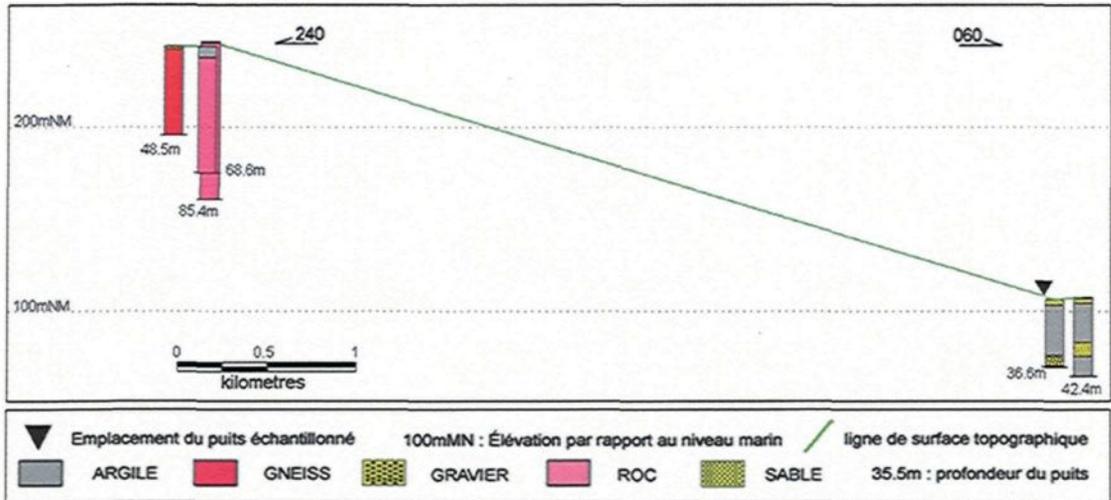
Le puits échantillonné correspond à la station 18

Vue en coupe du secteur d'Alma – Dam-en-Terre



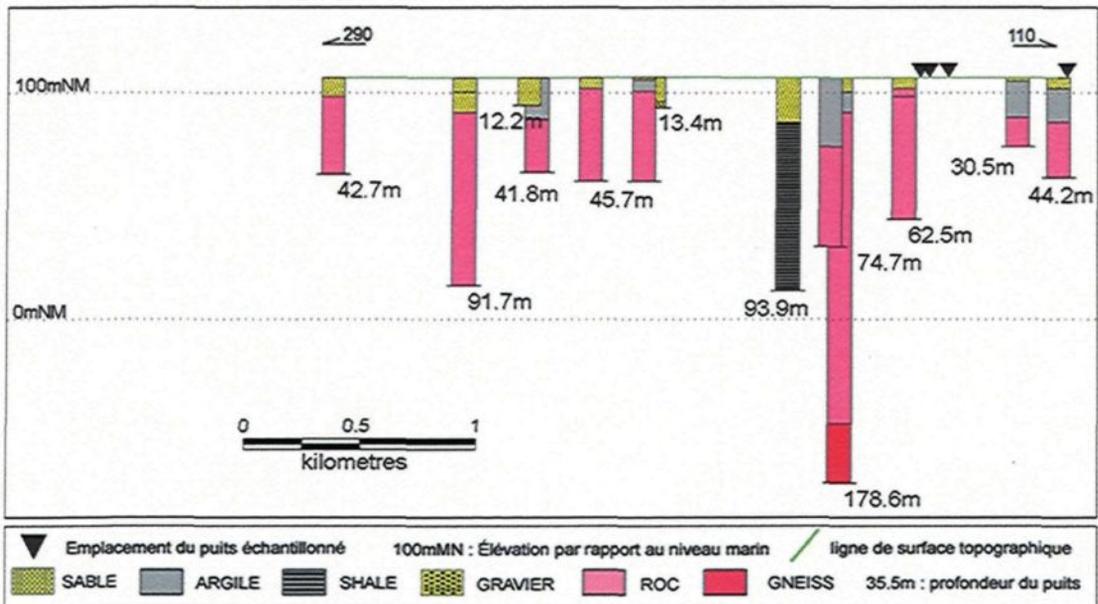
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 2 et 27

Vue en coupe du secteur de Chambord – Domaine du Marais



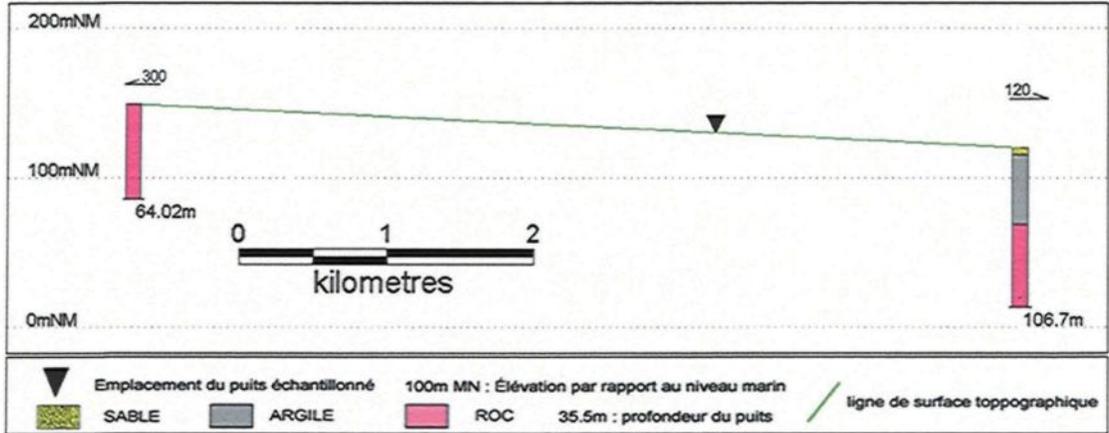
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 34 et 35

Vue en coupe du secteur de Chambord village et Pointe Chambord



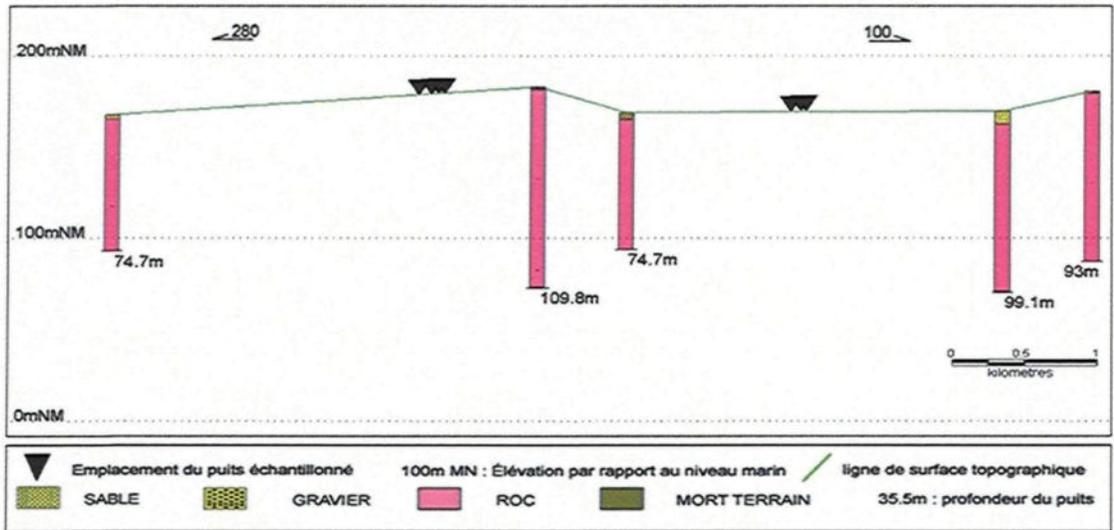
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 39, 13, 14, 36 et 42

Vue en coupe du secteur de Dolbeau



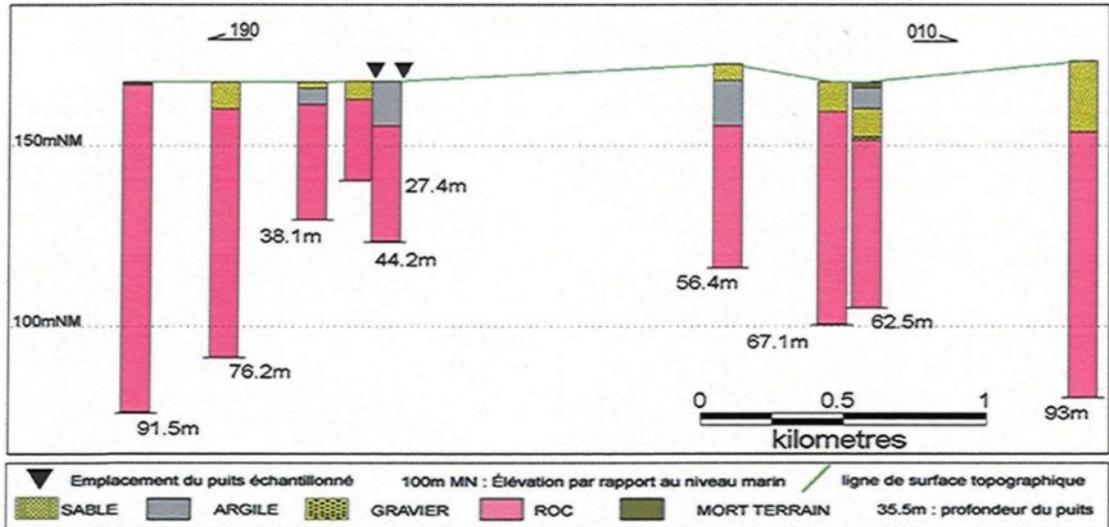
Le puits échantillonné correspond à la station 45

Vue en coupe du secteur de Larouche – Jonquière



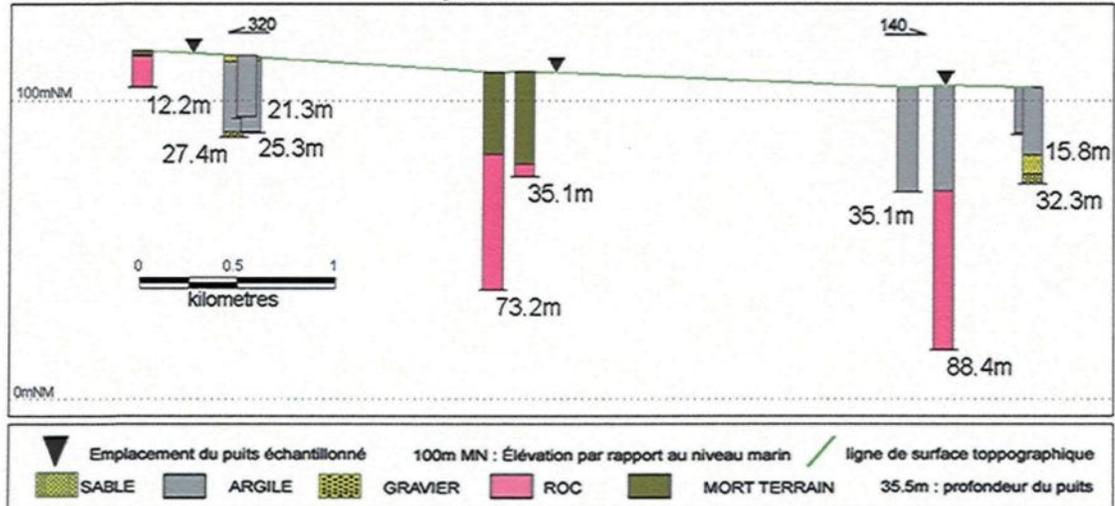
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 1, 19, 20, 37, 38, 40 et 46

Vue en coupe du secteur de Larouche – Lac Kénogami



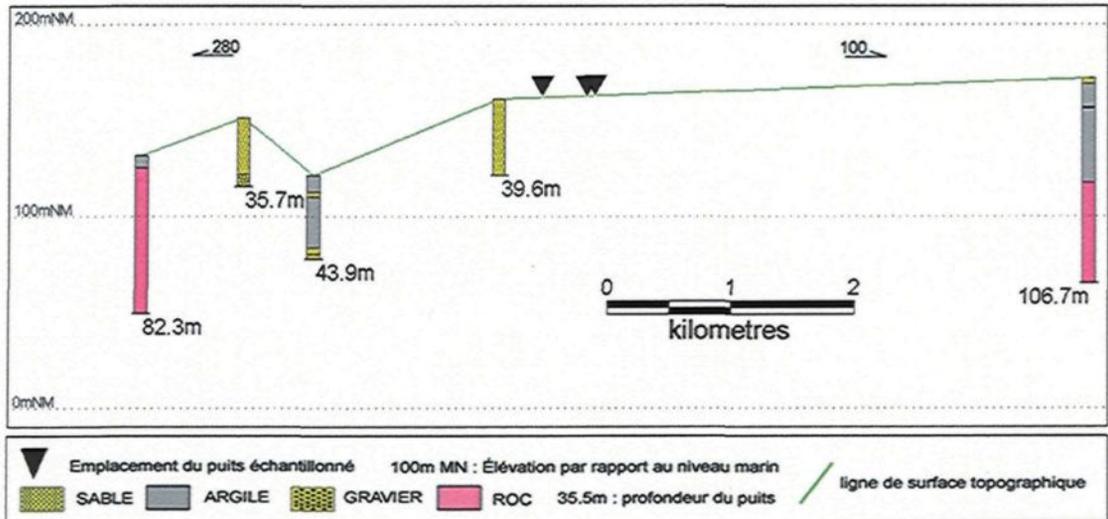
Le puits échantillonné correspond à la station 30

Vue en coupe du secteur de Péribonka



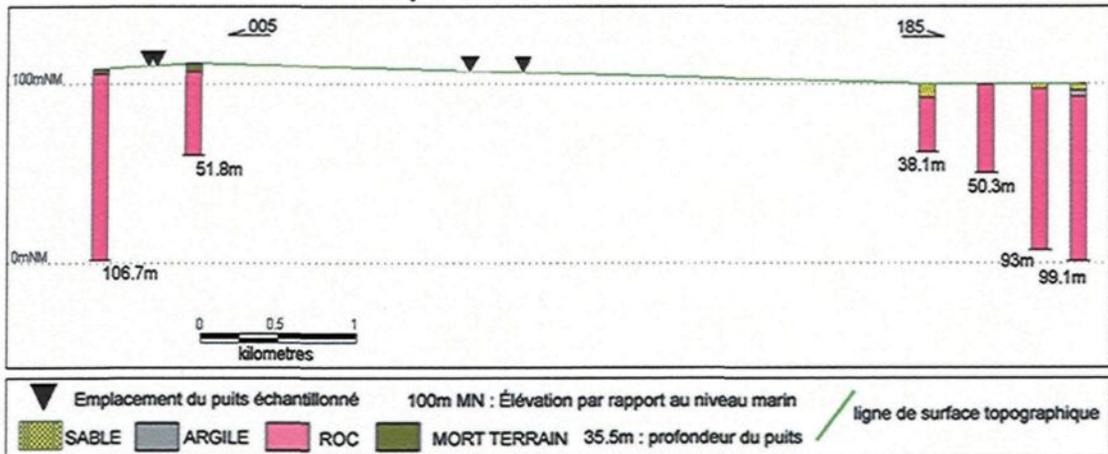
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 9, 10 et 17

Vue en coupe du secteur de Saint-Ambroise



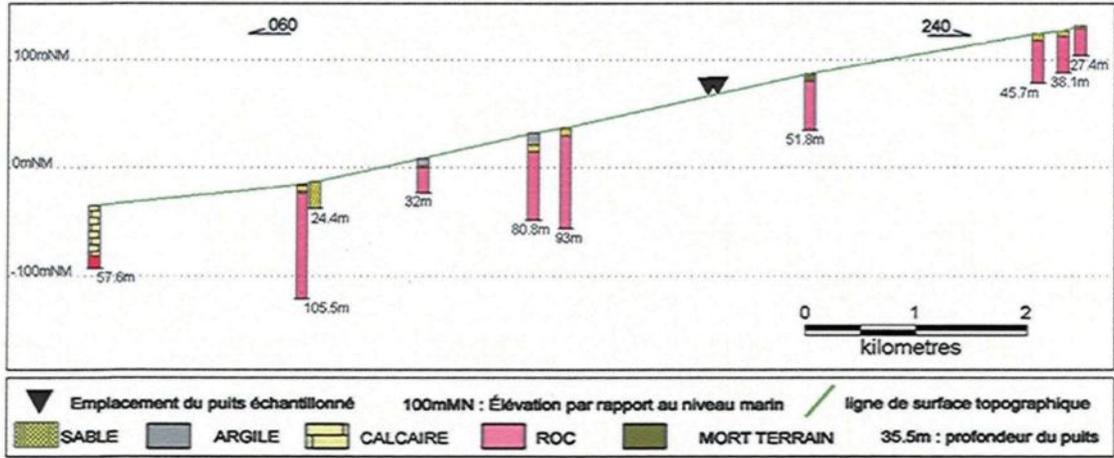
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 23, 24 et 25

Vue en coupe du secteur de Saint-Gédéon



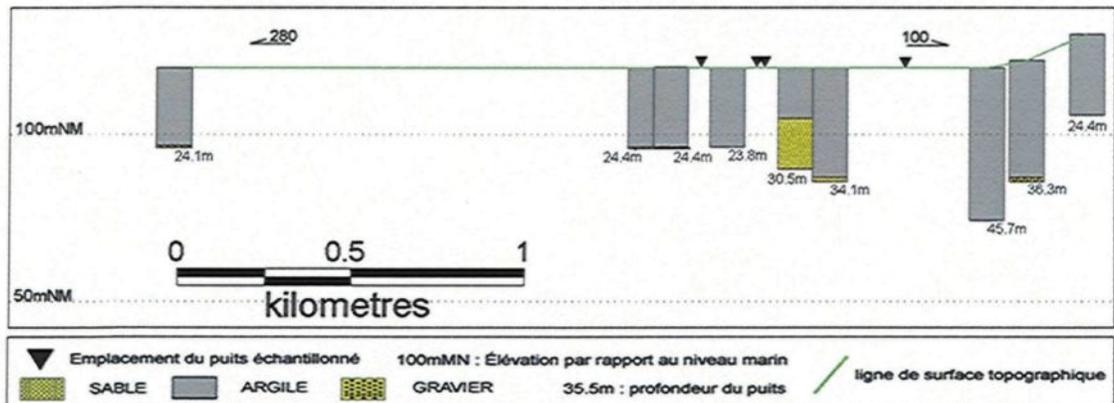
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 11, 12, 26 et 47

Vue en coupe du secteur de Roberval



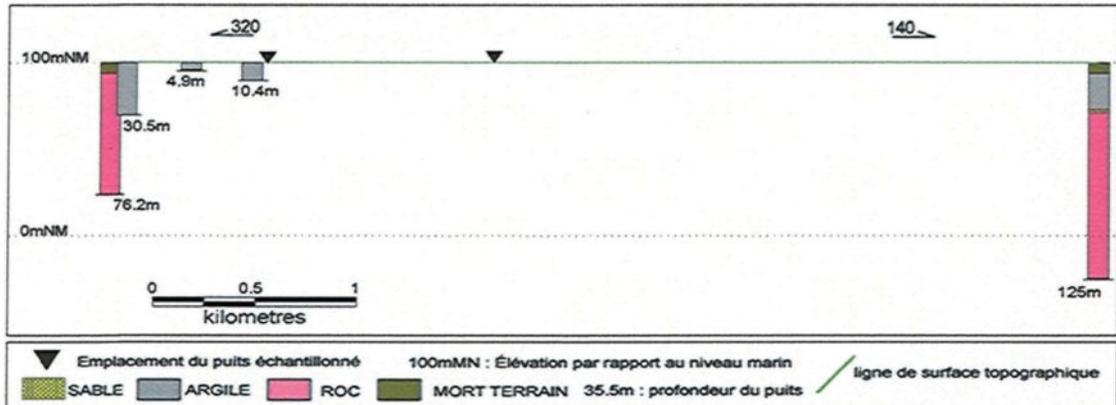
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 15 et 16

Vue en coupe du secteur de Sainte-Jeanne D'Arc



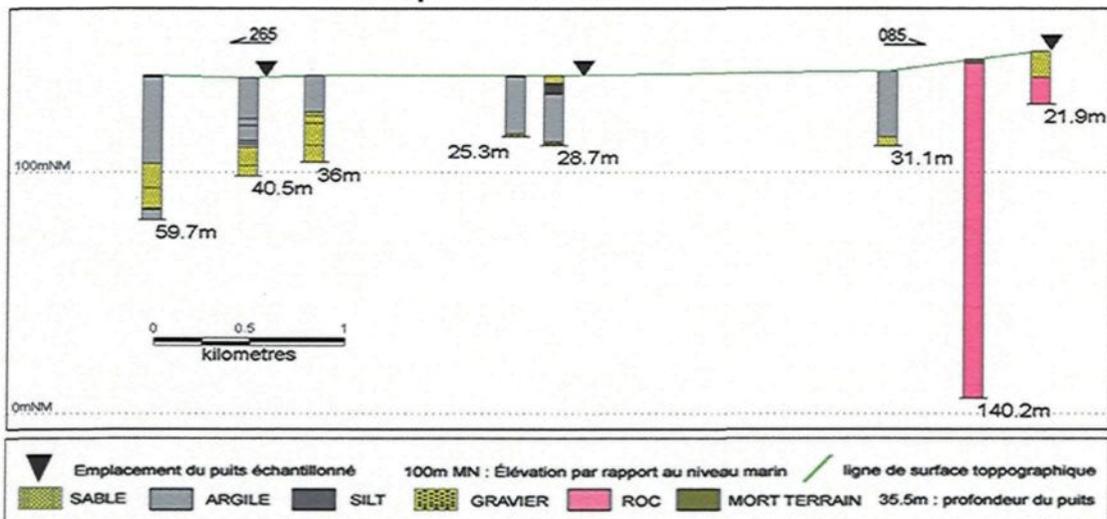
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 5, 6, 7 et 8

Vue en coupe du secteur de Saint-Méthode



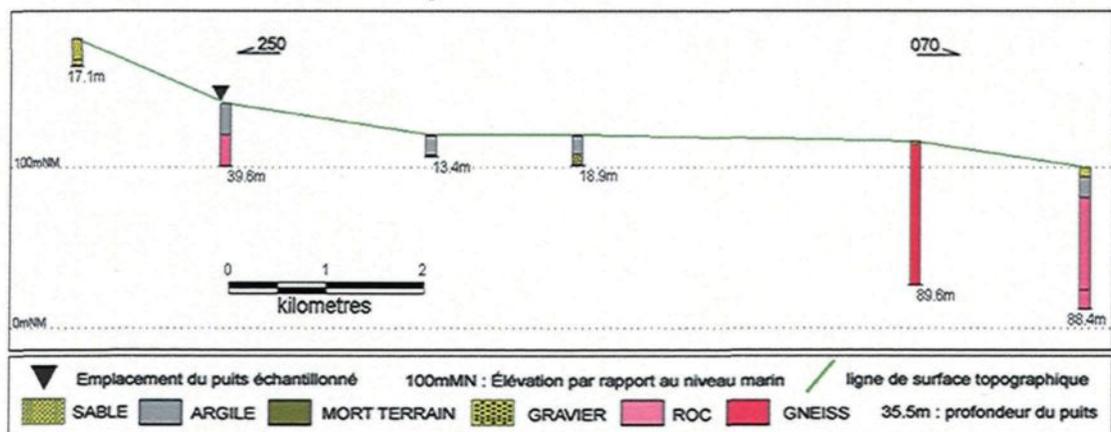
Les puits échantillonnés correspondent aux stations 28 et 29

Vue en coupe du secteur de Saint-Nazaire



Les puits échantillonnés correspondent aux stations 32, 33, 41, 43 et 44

Vue en coupe du secteur de Saint-Prime



Les puits échantillonnés correspondent aux stations 31

ANNEXE B: Fiche terrain

Cette annexe contient le modèle de fiche de terrain élaboré et utilisé dans le cadre de ce projet et lorsqu'un puits était échantillonné pour la première fois.

Échantillonnage :				
Lettre	Volume (ml)	Filtration (0,45µm)	Acidification	Paramètres à mesurer
A				
B				
C				
D				

Données sur la ressource :
Utilisation de l'eau : _____
Nombre d'utilisateur : _____
Disponibilité de la ressource : _____
Variation de la qualité de l'eau disponible : _____
Analyse chimique de l'eau : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non
Copie des résultats d'analyse disponible : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non
Type de traitement de l'eau : _____

Schéma d'aménagement :
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>
Commentaires : _____ _____ _____ _____ _____

Photos :	
1. _____	2. _____
3. _____	4. _____
5. _____	6. _____

ANNEXE C: Données brutes

Cette annexe contient l'ensemble des résultats bruts des mesures *in situ* et des analyses en laboratoire de l'eau souterraine des 96 échantillons collectés dans le cadre de cette étude. En plus de ces paramètres, les tableaux suivants contiennent aussi le type d'eau tel que déterminé à l'aide du logiciel *Aquachem* de Waterloo Hydrogeologic (2005), de même que la balance ionique, la somme des anions et la somme des cations.

SOMMAIRE DE L'ANNEXE A

Secteurs vu en coupe	pages
AC-1 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés <i>in situ</i> (1/4)	124
AC-2 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés <i>in situ</i> (2/4)	125
AC-3 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés <i>in situ</i> (3/4)	126
AC-4 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés <i>in situ</i> (4/4)	127
AC-5 : Paramètres mesurés <i>in situ</i> et paramètres analysés en laboratoire (1/4)	128
AC-6 : Paramètres mesurés <i>in situ</i> et paramètres analysés en laboratoire (2/4)	129
AC-7 : Paramètres mesurés <i>in situ</i> et paramètres analysés en laboratoire (3/4)	130
AC-8 : Paramètres mesurés <i>in situ</i> et paramètres analysés en laboratoire (4/4)	131
AC-9 : Paramètres analysés en laboratoire (1/4)	132
AC-10 : Paramètres analysés en laboratoire (2/4)	133
AC-11 : Paramètres analysés en laboratoire (3/4)	134
AC-12 : Paramètres analysés en laboratoire (4/4)	135
AC-13 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (1/4)	136
AC-14 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (2/4)	137
AC-15 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (3/4)	138
AC-16 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (4/4)	139

AC-1 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés in situ (1/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Type d'eau	date de collecte	X UTM Nad27	Y UTM Nad27	profondeur des puits (m)	Temp (Celsius)	Eh (mV)	pH
1JW01		St Nazaire	Na-Ca-SO4-HCO3	2004-11-01	315331.00	5368556.00	127	8.00	-375.60	8.37
1JW02		St Nazaire	Na-Cl-SO4	2004-11-01	311445.00	5388896.00	40	5.80	-326.00	8.48
1JW03		Larouche - Jonquière	Na-Ca-Cl	2004-11-02	315331.00	5368556.00	106.68	6.50	-258.50	7.92
1JW04		Larouche - Jonquière	Ca-Mg-HCO3	2004-11-02	316071.00	5367829.00	82.296	6.60	-134.20	5.90
1JW05		Larouche - Jonquière	Na-HCO3	2004-11-02	315281.00	5368622.00	131.064	10.70	-99.40	9.19
1JW06		Alma - Dam-en-ferre	Na-HCO3-Cl	2004-11-04	299552.00	5385861.00	93.2688	8.30	-151.10	8.88
1JW07		Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl	2004-11-15	340471.00	5368709.00	50.292	7.70	100.60	7.99
1JW08		Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl	2004-11-15	340170.00	5368752.00	91.44	8.00	57.90	9.11
1JW09		Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl-HCO3	2004-11-15	340117.00	5368790.00	36.576	7.60	11.60	9.11
1JW10		Canton Tremblay (Terres Rompues)	Ca-Mg-HCO3	2004-11-15	339979.00	5368802.00	21.9456	10.20	180.40	7.73
1JW11		St Ambroise	Na-HCO3	2004-11-16	328191.00	5386721.00	50.292	7.40	-225.80	9.43
1JW12		St Ambroise	Na-HCO3	2004-11-16	327860.00	5386814.00	54.864	7.20	-196.60	9.56
1JW13		St Ambroise	Na-HCO3	2004-11-16	328143.00	5386731.00	82.296	8.70	-220.90	9.53
1JW14		Ste Jeanne d Arc	Na-Cl-HCO3	2004-11-22	718023.00	5413395.00	60.96	14.10	-65.50	8.25
1JW15		Ste Jeanne d Arc	Na-Cl	2004-11-22	718033.00	5413251.00	32.9184	9.40	-8.30	8.09
1JW16		Ste Jeanne d Arc	Na-Cl-HCO3-SO4	2004-11-22	717986.00	5413189.00	25.908	9.80	-189.60	8.79
1JW17		Ste Jeanne d Arc	Na-Cl-HCO3	2004-11-22	718282.00	5413106.00	22.86	9.50	-60.60	8.40
1JW18		Peribonka	Na-Cl	2004-11-25	719470.00	5407859.00		9.00	-243.00	7.41
1JW19		Peribonka	Ca-Na-Cl	2004-11-25	717119.00	5410973.00	56.9976	12.80	176.00	8.36
1JW20		Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Na-Ca-Cl	2004-11-29	293976.00	5379519.00	91.44	7.20	11.70	8.15
1JW21		Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Ca-Na-Cl	2004-11-29	295191.00	5382150.00		7.30	62.50	8.03
1JW22		Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Ca-Na-Cl	2004-11-29	295118.00	5382210.00	91.44	9.40	125.10	7.91
1JW23		Pointe Chambord	Na-Mg-Ca-HCO3-Cl	2004-11-30	716296.00	5370973.00	38.1	9.70	58.10	7.60
1JW24		Chambord - Domaine du Marais	Ca-Mg-HCO3	2004-11-30	278668.00	5366893.00		7.30	147.70	3.62
1JW25		Chambord - Domaine du Marais	Ca-Mg-Na-HCO3	2004-11-30	278707.00	5366914.00		7.40	104.10	7.83
1JW26		Pointe Chambord	Na-Cl	2004-11-31	715894.00	5371376.00		13.30	44.70	6.93

AC-2 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés in situ (2/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Type d'eau	date de collecte	X UTM Nad27	Y UTM Nad27	profondeur des puits (m)	Temp (Celcius)	Eh (mV)	pH
1JW27		Pointe Chambord	Ca-Mg-HCO3-SO4	2004-11-31	715795.00	5371401.00	20.1168	9.00	163.00	9.20
1JW28		Pointe St Methode	Na-Cl	2004-12-03	695786.00	5394199.00	73.152	7.40	-46.20	8.10
1JW29		Pointe St Methode	Na-Ca-HCO3	2004-12-03	695146.00	5395023.00	85.344	6.70	-25.20	7.70
1JW30		Larouche - Kénogamie (Lac du camp)	Ca-HCO3-Cl-SO4	2004-12-06	313111.00	5364550.00	30.48	7.70	159.50	4.38
1JW31		Ch. De la pointe	Na-HCO3	2004-12-06	318020.00	5367942.00	76.2	6.80	100.90	5.48
1JW32		Ste Hedwidge	Ca-Na-Cl	2004-12-07	699800.00	5377208.00	106.68	6.80	-13.40	7.64
1JW33		Ste Hedwidge	Ca-Na-Cl	2004-12-07	699921.00	5377167.00	64.008	6.90	1.20	7.36
1JW34		Ch. De la pointe	Na-Ca-HCO3	2004-12-07	317938.00	5367921.00	60.96	8.00	53.40	6.34
1JW35		StPrime	Ca-Cl	2004-12-10	686382.00	5387344.00		6.10	108.40	5.18
1JW36		Chambord - Village	Ca-HCO3	2004-12-10	712815.00	5368671.00		5.90	8.20	7.22
1JW37		Larouche - Jonquiere	Ca-Na-HCO3	2004-12-10	317845.00	5368044.00	106.68	10.60	8.30	7.22
1JW38		Péribonka	Na-Cl-HCO3	2004-12-13	717281.00	5408647.00		7.20	53.60	6.37
1JW39		Alma - Alma - Villebois	Ca-Cl	2004-12-13	307310.00	5378900.00		8.10	50.80	6.31
2JW01	1JW03	Larouche - Jonquiere (Larouche - Jonquiere)	Na-Ca-Cl-HCO3	2005-02-07	315331.00	5368556.00	106.68	6.10	38.70	9.08
2JW02	1JW08	Canton Tremblay (Canton Tremblay (Terres Rompues))	Na-Cl	2005-02-07	340170.00	5368752.00	91.44	6.70	-23.00	7.68
2JW03	1JW38	Péribonka	Na-Cl-HCO3	2005-02-08	717281.00	5408647.00		7.00	-41.60	8.03
2JW04	1JW19	Péribonka	Ca-Na-Cl	2005-02-08	717119.00	5410973.00	56.9976	11.30	-12.00	7.66
2JW05	1JW14	Ste Jeanne d Arc	Na-Cl-HCO3	2005-02-11	718023.00	5413395.00	60.96	7.50	101.80	5.32
2JW06	1JW15	Ste Jeanne d Arc	Na-Cl	2005-02-11	718033.00	5413251.00	32.9184	6.90	47.80	6.36
2JW07	1JW17	Ste Jeanne d Arc	Na-Cl-HCO3	2005-02-11	718282.00	5413106.00	22.86	6.90	45.50	6.41
2JW08	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Na-Ca-Cl	2005-02-14	293976.00	5379519.00	91.44	7.10	-13.00	7.62
2JW09	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Ca-Na-Cl	2005-02-15	295191.00	5382150.00		7.40	-1.30	7.33
2JW10	1JW32	Ste Hedwidge	Ca-Na-Cl	2005-02-15	699800.00	5377208.00	106.68	6.80	-13.10	7.59
2JW11	1JW33	Ste Hedwidge	Ca-Na-Cl	2005-02-15	699921.00	5377167.00	64.008	6.90	3.20	7.26
2JW12	1JW23	Pointe Chambord	Na-Mg-Ca-Cl-HCO3	2005-02-16	716296.00	5370973.00	38.1	7.50	39.90	6.47
2JW13	1JW26	Pointe Chambord	Na-Cl	2005-02-16	715894.00	5371376.00		6.90	21.50	6.82

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Type d'eau	date de collecte	X UTM Nad27	Y UTM Nad27	profondeur des puits (m)	Temp (Celsius)	Eh (mV)	pH
2JW14	1JW18	Péribonka	Na-Cl	2005-02-18	719470.00	5407859.00		4.90	3.90	7.19
2JW15	1JW16	Site Jeanne d'Arc	Na-HCO3-Cl	2005-02-18	717986.00	5413189.00	25.908	7.30	8.00	7.10
2JW16	1JW39	Alma - Villebois	Ca-Cl	2005-02-18	307310.00	5378900.00		7.30	29.30	6.71
2JW17	1JW09	Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl-HCO3	2005-02-21	340117.00	5368790.00	36.576	7.30	-65.40	8.66
2JW18	1JW22	Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Ca-Na-Cl	2005-02-21	295118.00	5382210.00	91.44	7.60	-20.90	7.70
2JW19	1JW06	Alma - Dam-en-terre	Na-HCO3-Cl	2005-02-23	299552.00	5385861.00	93.2688	8.10	-40.00	8.23
2JW20		Alma - Dam-en-terre	Ca-Na-Cl	2005-02-23	299552.00	5385861.00		7.30	-12.80	7.60
3JW01	1JW11	St Ambroise	Na-HCO3	2005-05-17	328191.00	5386721.00	50.292	8.90	-131.80	9.42
3JW02	1JW13	St Ambroise	Na-HCO3	2005-05-17	328143.00	5386731.00	82.296	9.00	-119.90	9.19
3JW03	1JW12	St Ambroise	Na-HCO3	2005-05-17	327860.00	5386814.00	54.864	8.90	-111.50	9.09
3JW04		St Nazaire	Ca-Na-Cl	2005-05-17	310055.00	5387090.00	118.872	8.30	-32.50	7.74
3JW05	1JW17	Site Jeanne d'Arc	Na-Cl-HCO3	2005-05-18	718282.00	5413106.00	22.86	9.40	-75.30	8.47
3JW06	1JW16	Site Jeanne d'Arc	Na-HCO3-Cl-SO4	2005-05-18	717986.00	5413189.00	25.908	9.60	-88.50	8.69
3JW07	1JW15	Site Jeanne d'Arc	Na-Cl	2005-05-18	718033.00	5413251.00	32.9184	8.70	-53.80	8.10
3JW08	1JW14	Site Jeanne d'Arc	Na-Cl-HCO3	2005-05-18	718023.00	5413395.00	60.96	10.30	-65.70	8.30
3JW09	1JW18	Péribonka	Na-Cl	2005-05-18	719470.00	5407859.00		9.00	-8.50	7.34
3JW10	1JW38	Péribonka	Na-Cl-HCO3	2005-05-18	717281.00	5408647.00		9.20	-47.10	7.99
3JW11	1JW19	Péribonka	Ca-Na-Cl	2005-05-18	717119.00	5410973.00	56.9976	12.90	-39.90	7.87
3JW12	1JW06	Alma - Dam-en-terre	Na-HCO3-Cl	2005-05-19	299552.00	5385861.00	93.2688	10.90	-94.40	8.79
3JW13	2JW20	Alma - Dam-en-terre	Ca-Na-Cl	2005-05-19	299552.00	5385861.00		9.10	-54.90	8.12
3JW14	1JW39	Alma - Villebois	Ca-Cl	2005-05-19	307310.00	5378900.00		9.30	15.50	6.93
3JW15	1JW26	Pointe Chambord	Na-Mg-Ca-Cl-HCO3	2005-05-24	715894.00	5371376.00		9.80	-0.20	7.00
3JW16	1JW23	Pointe Chambord	Na-Mg-Ca-Cl-HCO3	2005-05-24	716296.00	5370973.00	38.1	9.20	-15.90	7.26
3JW17		Pointe Chambord	Na-Mg-Ca-Cl	2005-05-24	715847.00	5371609.00	48.768	7.70	0.70	6.99
3JW18	1JW03	Larouche - Jonquières	Na-Ca-Cl-HCO3-SO4	2005-05-24	315331.00	5368566.00	106.68	6.20	-98.80	8.78
3JW19	1JW04	Larouche - Jonquières	Ca-HCO3-Cl	2005-05-24	316071.00	5367829.00	82.296	6.90	80.00	5.62
3JW20	1JW05	Larouche - Jonquières	Na-HCO3	2005-05-24	315281.00	5368622.00	131.064	6.70	-123.10	9.03
3JW21		St Nazaire	Ca-HCO3-Cl	2005-05-27	309651.00	5387646.00	115.824	6.70	28.30	6.41
3JW22		St Nazaire	Na-HCO3-Cl	2005-05-27	309633.00	5387660.00	91.44	6.90	-33.70	7.69
3JW23	1JW07	Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl	2005-05-27	340471.00	5368709.00	50.292	7.50	-49.20	7.99
3JW24	1JW09	Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl-HCO3	2005-05-27	340117.00	5368790.00	36.576	7.40	-110.00	9.22

AC-3 :Caractéristiques des stations et paramètres mesurés *in situ* (3/4)

AC-4 : Caractéristiques des stations et paramètres mesurés in situ (4/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Type d'eau	date de collecte	X UTM Nad27	Y UTM Nad27	profondeur des puits (m)	Temp (Celsius)	Eh (mV)	pH
3JW25	1JW10	Canton Tremblay (Terres Rompues)	Ca-Mg-HCO3	2005-05-27	339979.00	5368802.00	21.9456	7.00	-24.50	7.52
3JW26	1JW08	Canton Tremblay (Terres Rompues)	Na-Cl	2005-05-27	340170.00	5368752.00	91.44	6.90	-100.00	9.01
3JW27		Dolbeau	Ca-Na-Cl	2005-05-30	701100.00	5416296.00	91.44	6.70	-77.20	8.56
3JW28	1JW28	Pointe St Méthode	Na-Cl-HCO3	2005-05-30	695786.00	5394199.00	73.152	7.80	6.60	6.91
3JW29	1JW29	Pointe St Méthode	Na-Ca-HCO3-Cl	2005-05-30	695146.00	5395023.00	85.344	7.10	-24.00	7.53
3JW30	1JW35	StPrime	Ca-Cl	2005-05-30	686382.00	5387344.00		7.40	-9.40	7.21
3JW31	1JW33	Ste Hedwidge	Ca-Na-Cl	2005-05-30	699921.00	5377167.00	64.008	6.90	-35.20	7.73
3JW32	1JW32	Ste Hedwidge	Ca-Na-Cl	2005-05-30	699800.00	5377208.00	106.68	6.90	-40.20	7.82
3JW33		Larouche - Kenogamie (Lac du camp)	Ca-Na-Cl-HCO3	2005-05-31	313314.00	5364662.00		7.00	-8.80	7.20
3JW34	1JW30	Larouche - Kenogamie (Lac du camp)	Ca-HCO3-Cl	2005-05-31	313111.00	5364550.00	30.48	7.80	7.10	6.90
3JW35	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Na-Ca-Cl	2005-05-31	293976.00	5379519.00	91.44	7.80	-62.50	8.26
3JW36		Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Ca-Na-Cl-HCO3	2005-05-31	294028.00	5379964.00	32	8.40	-31.40	7.66
3JW37	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des Iles)	Ca-Na-Cl-SO4	2005-05-31	295191.00	5382150.00		7.40	-49.20	8.00

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Oxygène Dissous (mg/L)	Conductivité Spécifique à 25°C (µS/cm)	TSD corr (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Ba (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)
1JW01		St Nazaire	0.00	840.00	420.00	0.0120	0.0010	0.2000	0.0800	57.0000	29.0000
1JW02		St Nazaire	2.24	3380.00	3042.00	0.0070	0.0010	0.2800	0.0500	44.0000	770.0000
1JW03		Larouche - Jonquières	0.00	7450.00	6705.00	0.0070	0.0010	0.6800	2.1000	460.0000	2200.0000
1JW04		Larouche - Jonquières	7.50	881.00	440.50	0.0090	0.0010	0.0040	0.0200	7.4000	4.0000
1JW05		Larouche - Jonquières	0.00	315.00	157.50	0.0070	0.0010	0.0400	0.0200	1.8000	4.0000
1JW06		Alma - Dam-en-Terre	0.00	1219.00	609.50	0.0070	0.0010	0.5700	0.0100	2.5000	100.0000
1JW07		Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.00	5320.00	4788.00	0.0070	0.0010	0.1800	0.1700	100.0000	1500.0000
1JW08		Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.00	2180.00	1962.00	0.0070	0.0010	0.1800	0.0900	21.0000	560.0000
1JW09		Canton Tremblay (Terres Rompues)	1.24	718.00	359.00	0.0070	0.0010	0.1100	0.0600	12.5000	120.0000
1JW10		Canton Tremblay (Terres Rompues)	2.11	376.00	188.00	0.0070	0.0010	0.0090	0.1000	52.0000	2.0000
1JW11		St Ambraise	0.00	300.00	150.00	0.1800	0.0010	0.1600	0.0200	1.1000	8.0000
1JW12		St Ambraise	0.00	260.00	130.00	0.0270	0.0010	0.0400	0.0400	7.0000	6.5000
1JW13		St Ambraise	0.00	350.00	175.00	0.1900	0.0010	0.1600	0.0200	1.2000	1.0000
1JW14		Ste Jeanne d'Arc	0.00	2650.00	2385.00	0.0070	0.0010	0.4800	0.0400	25.0000	550.0000
1JW15		Ste Jeanne d'Arc	0.00	4570.00	4113.00	0.0070	0.0010	0.6000	0.0600	58.0000	1100.0000
1JW16		Ste Jeanne d'Arc	0.79	1260.00	630.00	0.0910	0.0010	0.3400	0.0070	4.7000	180.0000
1JW17		Ste Jeanne d'Arc	0.00	2130.00	1917.00	0.0070	0.0010	0.3600	0.0400	18.9000	390.0000
1JW18		Pénbonka	0.00	4240.00	3816.00	0.0070	0.0010	0.7700	0.0300	160.0000	4100.0000
1JW19		Pénbonka	0.00	1840.00	1656.00	0.0070	0.0010	0.5600	0.0200	290.0000	860.0000
1JW20		Saint-Gedeon (Rang des Iles)	0.00	3600.00	3240.00	0.0070	0.0010	0.3500	0.5100	210.0000	1000.0000
1JW21		Saint-Gedeon (Rang des Iles)	0.00	3140.00	2826.00	0.0070	0.0010	0.3400	0.1700	310.0000	880.0000
1JW22		Saint-Gedeon (Rang des Iles)	4.05	6670.00	6003.00	0.0100	0.0010	0.8200	0.0500	630.0000	2100.0000
1JW23		Pointe Chambord	0.00	720.00	360.00	0.0070	0.0010	1.9000	0.7400	66.0000	320.0000
1JW24		Chambord - Domaine du Marais	0.00	209.00	104.50	0.0070	0.0010	0.2000	0.1000	34.0000	4.0000
1JW25		Chambord - Domaine du Marais	0.00	331.00	165.50	0.0070	0.0010	0.2000	0.0800	29.0000	4.0000
1JW26		Pointe Chambord	0.00	4240.00	3816.00	0.0070	0.0010	3.4000	0.0005	0.0400	1100.0000

AC-5 : Paramètres mesurés *in situ* et paramètres analysés en laboratoire (1/4)

AC-6 : Paramètres mesurés in situ et paramètres analysés en laboratoire
(2/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Oxygène Dissous (mg/L)	Conductivité Spécifique à 25C (µS/cm)	TSD corr (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Ba (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)
1JW27		Pointe Chambord	0.00	680.00	340.00	0.0070	0.0010	0.4100	0.4200	63.0000	15.0000
1JW28		Pointe St Méthode	0.00	4210.00	3789.00	0.0070	0.0010	0.5200	0.0200	19.6000	870.0000
1JW29		Pointe St Méthode	0.00	780.00	390.00	0.0070	0.0010	0.1900	0.0500	51.0000	48.0000
1JW30		Larouche - Kénogamie (Lac du camp)	0.00	1060.00	530.00	0.0070	0.0010	0.0200	0.2200	170.0000	110.0000
1JW31		Ch. De la pointe	0.00	439.00	219.50	0.0110	0.0010	0.5200	0.0300	1.7000	16.0000
1JW32		Ste Hedwidge	0.00	5400.00	4860.00	0.0070	0.0010	0.2700	0.0500	710.0000	150.0000
1JW33		Ste Hedwidge	0.00	4530.00	4077.00	0.9900	0.0010	0.2200	0.0400	590.0000	1800.0000
1JW34		Ch. De la pointe	1.62	610.00	305.00	0.0140	0.0010	0.0500	0.2800	41.0000	24.0000
1JW35		StPrime	0.00	5390.00	4851.00	0.0070	0.0010	0.0600	0.1000	730.0000	1700.0000
1JW36		Chambord - Village	0.00	460.00	230.00	0.0070	0.0010	0.0070	0.0200	72.0000	13.0000
1JW37		Larouche - Jonquières	2.73	280.00	140.00	0.0080	0.0010	0.0400	0.0500	22.0000	5.6000
1JW38		Péribonka	0.00	4120.00	3708.00	0.0070	0.0010	0.4400	0.0700	72.0000	890.0000
1JW39		Aima - Aima - Villebois	8.70	9470.00	8523.00	0.0200	0.0010	0.0700	0.2300	1400.0000	30.0000
2JW01	1JW03	Larouche - Jonquières (Larouche - Jonquières)	12.60	1020.00	510.00	0.0090		0.3500	0.2200	41.0000	220.0000
2JW02	1JW08	Canton Tremblay (Canton Tremblay (Terres Rompues))	0.70	7910.00	7119.00	0.0070		0.2500	0.1600	130.0000	2400.0000
2JW03	1JW38	Péribonka	2.30	4180.00	3762.00	0.0070		0.4400	0.0800	74.0000	860.0000
2JW04	1JW19	Péribonka	9.90	3700.00	3330.00	0.0070		0.5600	0.0200	310.0000	920.0000
2JW05	1JW14	Ste Jeanne d Arc	0.70	2810.00	2529.00	0.0070		0.4800	0.0400	26.0000	540.0000
2JW06	1JW15	Ste Jeanne d Arc	0.80	3970.00	3573.00	0.0070		0.6000	0.0600	58.0000	1100.0000
2JW07	1JW17	Ste Jeanne d Arc	0.09	2150.00	1935.00	0.0070		0.360000	0.0400	19.6000	400.0000
2JW08	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.12	3280.00	2952.00	0.0100		0.3400	0.4700	190.0000	930.0000
2JW09	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.13	4170.00	3753.00	0.0120		0.3800	0.1800	380.0000	1100.0000
2JW10	1JW32	Ste Hedwidge	0.23	5380.00	4842.00	0.0200		0.2800	0.0500	720.0000	1500.0000
2JW11	1JW33	Ste Hedwidge	0.08	4470.00	4023.00	0.0200		0.2700	0.0400	690.0000	1400.0000
2JW12	1JW23	Pointe Chambord	0.05	1570.00	1413.00	0.0070		1.9000	0.7600	66.0000	330.0000
2JW13	1JW26	Pointe Chambord	0.23	4260.00	3834.00	0.0070		3.4000	0.0005	0.0500	1000.0000

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Oxygène Dissous (mg/L)	Conductivité Spécifique à 25°C (µS/cm)	TSD corr (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Ba (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)
2JW14	1JW18	Peribonka		14880.00	13392.00	0.0200		0.8200	0.0300	170.0000	4200.0000
2JW15	1JW16	Ste Jeanne d'Arc	0.08	1249.00	624.50	0.1500		0.3500	0.0080	4.6000	170.0000
2JW16	1JW38	Alma - Villebois	0.39	5240.00	4716.00	0.0200		0.0500	0.2200	680.0000	1700.0000
2JW17	1JW09	Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.79	850.00	425.00	0.0090		0.1100	0.0600	12.3000	130.0000
2JW18	1JW22	Saint-Gédéon (Rang des Iles)	0.08	7490.00	6741.00	0.0200		0.8100	0.0600	650.0000	2100.0000
2JW19	1JW06	Alma - Dam-en-terre	0.22	1245.00	622.50	0.0070		0.5800	0.0100	2.6000	110.0000
2JW20		Alma - Dam-en-terre	0.16	1487.00	743.50	0.0200		0.1000	0.3100	160.0000	360.0000
3JW01	1JW11	St Ambroise	0.16	440.00	220.00	0.1900		0.1700	0.0230	1.2000	7.2000
3JW02	1JW13	St Ambroise	0.05	390.00	195.00	0.1900		0.1700	0.0230	1.3000	0.4000
3JW03	1JW12	St Ambroise	0.05	260.00	130.00	0.0230		0.0430	0.0460	7.8000	0.4000
3JW04		St Nazaire	0.14	6790.00	6111.00	0.0070		0.1800	0.0400	740.0000	1800.0000
3JW05	1JW17	Ste Jeanne d'Arc	0.11	2000.00	1800.00	0.0070		0.3600	0.0430	21.0000	390.0000
3JW06	1JW16	Ste Jeanne d'Arc	0.77	1070.00	535.00	0.1200		0.3500	0.0080	5.5000	190.0000
3JW07	1JW15	Ste Jeanne d'Arc	0.25	4820.00	4338.00	0.0070		0.6200	0.0610	61.0000	1100.0000
3JW08	1JW14	Ste Jeanne d'Arc	0.19	2780.00	2502.00	0.0070		0.5000	0.0390	27.0000	530.0000
3JW09	1JW18	Peribonka	0.27	14620.00	13158.00	0.0070		0.8000	0.0300	180.0000	460.0000
3JW10	1JW38	Peribonka	0.17	4180.00	3762.00	0.0070		0.4500	0.0800	77.0000	860.0000
3JW11	1JW19	Peribonka	0.36	2940.00	2646.00	0.0090		0.5500	0.0170	280.0000	810.0000
3JW12	1JW06	Alma - Dam-en-terre	0.24	1260.00	630.00	0.0070		0.5900	0.0110	2.6000	100.0000
3JW13	2JW20	Alma - Dam-en-terre	0.13	1490.00	745.00	0.0070		0.1000	0.3100	160.0000	3500.0000
3JW14	1JW39	Alma - Villebois	0.78	10460.00	9414.00	0.0170		0.0850	0.2400	1300.0000	3400.0000
3JW15	1JW26	Pointe Chambord	0.04	4160.00	3744.00	0.0070		3.3000	1.3000	140.0000	800.0000
3JW16	1JW23	Pointe Chambord	0.08	1680.00	1512.00	0.0070		1.9000	0.7400	65.0000	180.0000
3JW17		Pointe Chambord	0.13	5130.00	4617.00	0.0070		2.9000	1.8000	220.0000	760.0000
3JW18	1JW03	Larouche - Jonquières	0.18	1040.00	520.00	0.0070		0.3900	0.2500	51.0000	660.0000
3JW19	1JW04	Larouche - Jonquières	0.72	90.00	45.00	0.0150		0.0080	0.0140	6.0000	10.0000
3JW20	1JW05	Larouche - Jonquières	0.12	340.00	170.00	0.0070		0.4100	0.0210	1.5000	10.0000
3JW21		St Nazaire	0.13	340.00	170.00	0.0070		0.0360	0.0390	34.0000	32.0000
3JW22		St Nazaire	0.19	1170.00	585.00	0.0070		0.0690	0.0005	1.5000	66.0000
3JW23	1JW07	Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.30	6880.00	6192.00	0.0070		0.2000	0.2000	140.0000	880.0000
3JW24	1JW09	Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.08	770.00	385.00	0.0070		0.0900	0.0670	15.2000	200.0000

AC-7 : Paramètres mesurés *in situ* et paramètres analysés en laboratoire (3/4)

(4/4) AC-8 : Paramètres mesurés *in situ* et paramètres analysés en laboratoire

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Oxygène Dissous (mg/L)	Conductivité Spécifique à 25C (µS/cm)	TSD corr (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Ba (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)
3JW25	1JW10	Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.15	430.00	215.00	0.0070		0.0100	0.1000	53.0000	100.0000
3JW26	1JW08	Canton Tremblay (Terres Rompues)	0.26	2610.00	2349.00	0.0070		0.1800	0.0720	22.0000	160.0000
3JW27		Dolbeau	0.13	6390.00	5751.00	0.0070		0.8300	0.1100	600.0000	300.0000
3JW28	1JW28	Pointe St Méthode	0.61	4180.00	3762.00	0.0070		0.5300	0.0230	21.0000	60.0000
3JW29	1JW29	Pointe St Méthode	0.08	890.00	445.00	0.0070		0.2000	0.0550	53.0000	110.0000
3JW30	1JW35	StPrime	0.21	23085.00	20776.50	0.0250		0.2800	0.1200	3700.0000	1200.0000
3JW31	1JW33	Ste Hedwidge	0.09	4580.00	4122.00	0.0140		0.2500	0.0320	590.0000	810.0000
3JW32	1JW32	Ste Hedwidge	0.23	3640.00	3276.00	0.0070		0.2300	0.0370	470.0000	700.0000
3JW33		Larouche - Kénogamie (Lac du camp)	0.11	1800.00	1620.00	0.0100		0.0100	0.2300	200.0000	100.0000
3JW34	1JW30	Larouche - Kénogamie (Lac du camp)	0.16	1250.00	625.00	0.0090		0.0240	0.2300	170.0000	170.0000
3JW35	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.18	2580.00	2322.00	0.0180		0.3200	0.2900	120.0000	280.0000
3JW36		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.42	1880.00	1410.00	0.0140		0.1700	0.1200	170.0000	180.0000
3JW37	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.14	2770.00	2493.00	0.0140		0.3700	0.1700	330.0000	900.0000

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	F (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Na (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)
1JW01		St Nazaire	0.0030	0.0020	1.1000	0.0500	1.6000	0.0100	7.4000	0.0310	100.0000	0.0030	0.0040
1JW02		St Nazaire	0.0030	0.0010	1.1000	0.0530	18.1000	0.0060	34.0000	0.0340	550.0000	0.0020	0.0040
1JW03		Larouche - Jonquières	0.0030	0.0010	0.0400	0.0150	3.2000	0.0080	45.0000	0.0930	790.0000	0.0008	0.0050
1JW04		Larouche - Jonquières	0.0030	0.0040	0.0400	0.0130	1.0000	0.0010	2.7000	0.0170	2.9000	0.0030	0.0040
1JW05		Larouche - Jonquières	0.0030	0.0010	1.3000	0.0010	0.2600	0.0020	0.3400	0.0006	69.0000	0.0008	0.0040
1JW06		Alma - Dam-en-terre	0.0030	0.0009	1.9000	0.0530	9.0000	0.0040	3.4000	0.0030	270.0000	0.0006	0.0040
1JW07		Canton Tremblay (Terres Rempues)	0.0030	0.0070	1.4000	0.0050	11.0000	0.0300	18.8000	0.0690	880.0000	0.0008	0.0040
1JW08		Canton Tremblay (Terres Rempues)	0.0030	0.0009	2.0000	0.0870	5.6000	0.0200	4.6000	0.0160	410.0000	0.0008	0.0040
1JW09		Canton Tremblay (Terres Rempues)	0.0030	0.0009	1.8000	0.0040	2.7000	0.0080	3.1000	0.0050	160.0000	0.0008	0.0040
1JW10		Canton Tremblay (Terres Rempues)	0.0030	0.0070	1.2000	0.0130	3.1000	0.0010	13.8000	0.0020	9.4000	0.0008	0.0040
1JW11		St Ambroise	0.0030	0.0010	1.7000	0.0150	3.2000	0.0010	0.5500	0.0040	91.0000	0.0008	0.0040
1JW12		St Ambroise	0.0030	0.0009	0.0600	0.0030	2.7000	0.0010	1.9000	0.0040	40.0000	0.0008	0.0040
1JW13		St Ambroise	0.0030	0.0009	0.0400	0.0340	3.4000	0.0010	0.6200	0.0040	82.0000	0.0008	0.0040
1JW14		Ste Jeanne d'Arc	0.0030	0.0010	1.7000	0.0670	17.8000	0.0100	15.3000	0.0220	500.0000	0.0008	0.0040
1JW15		Ste Jeanne d'Arc	0.0030	0.0020	1.3000	0.1900	31.0000	0.0200	33.0000	0.0670	830.0000	0.0008	0.0040
1JW16		Ste Jeanne d'Arc	0.0030	0.0010	1.7000	0.0180	8.7000	0.0030	4.3000	0.0090	250.0000	0.0008	0.0040
1JW17		Ste Jeanne d'Arc	0.0030	0.0010	1.9000	0.0440	14.1000	0.0060	13.0000	0.0170	380.0000	0.0008	0.0040
1JW18		Pérbonka	0.0030	0.0010	1.4000	0.8700	75.0000	0.0500	200.0000	0.0370	2500.0000	0.0008	0.0050
1JW19		Pérbonka	0.0030	0.0010	1.9000	0.0580	3.1000	0.0400	15.0000	0.0990	320.0000	0.0008	0.0050
1JW20		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.0030	0.0010	0.7200	0.0120	7.6000	0.0400	55.0000	0.1100	360.0000	0.0008	0.0050
1JW21		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.0030	0.0010	1.3000	0.0160	4.8000	0.0700	50.0000	0.0310	240.0000	0.0008	0.0050
1JW22		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	0.0030	0.0010	1.6000	0.0140	7.1000	0.1600	89.0000	0.0580	580.0000	0.0008	0.0070
1JW23		Pointe Chambord	0.0030	0.0010	2.0000	1.8000	23.0000	0.1800	41.0000	0.0200	160.0000	0.0008	0.0040
1JW24		Chambord - Domaine du Marais	0.0050	0.0010	0.4500	0.1000	4.7000	0.0100	13.4000	0.0040	12.1000	0.0030	0.0040
1JW25		Chambord - Domaine du Marais	0.0030	0.0010	0.4200	0.1400	4.9000	0.0100	14.1000	0.0030	13.0000	0.0010	0.0040
1JW26		Pointe Chambord	0.0030	0.0010	1.7000	0.0080	6.9000	0.1400	0.0400	0.0003	840.0000	0.0008	0.0040

AC-9 : Paramètres analysés en laboratoire (1/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	F (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Na (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)
1JW27		Pointe Chambord	0.0030	0.0010	0.3700	1.7000	11.7000	0.0300	28.0000	0.1100	17.2000	0.0008	0.0040
1JW28		Pointe St Mathias	0.0030	0.0010	1.4000	0.2700	23.0000	0.0200	33.0000	0.0150	760.0000	0.0008	0.0040
1JW29		Pointe St Mathias	0.0030	0.0010	2.0000	0.0290	5.1000	0.0200	16.7000	0.0480	100.0000	0.0010	0.0040
1JW30		Larouche - Kérogamie (Lac du camp)	0.0030	0.0010	0.0800	4.7000	4.3000	0.0060	13.9000	0.2900	45.0000	0.0008	0.0040
1JW31		Ch. De la pointe	0.0030	0.0010	1.5000	0.0040	0.3500	0.0040	0.3200	0.0020	94.0000	0.0008	0.0040
1JW32		Site Herwigge	0.0030	0.0010	1.4000	0.0320	3.0000	0.0600	12.9000	0.0740	260.0000	0.0008	0.0080
1JW33		Site Herwigge	0.0030	0.0010	0.2000	0.5900	3.2000	0.0400	7.8000	0.0960	200.0000	0.0008	0.0080
1JW34		Ch. De la pointe	0.0030	0.0370	0.1200	0.0090	5.2000	0.0040	8.4000	0.0140	67.0000	0.0020	0.0040
1JW35		SIP-rive	0.0030	0.0010	0.7200	17.0000	7.6000	0.0400	12.3000	0.7100	180.0000	0.0009	0.0100
1JW36		Chambord - Village	0.0030	0.0010	0.1400	0.1300	1.1000	0.0030	8.1000	0.0150	3.8000	0.0008	0.0040
1JW37		Larouche - Jonquières	0.0030	0.0450	0.1200	0.0050	3.0000	0.0020	4.6000	0.0030	18.6000	0.0008	0.0040
1JW38		Pérignonka	0.0030	0.0010	1.2000	0.4100	27.0000	0.0200	30.0000	0.0370	700.0000	0.0008	0.0040
1JW39		Alma - Alma - Villabois	0.0030	0.0630	0.8400	0.0140	18.7000	0.0050	84.0000	0.2600	410.0000	0.0020	0.0160
2JW01	1JW03	Larouche - Jonquières (Larouche - Jonquières)		0.0010	3.2000	0.0070	1.9000	0.0020	5.3000	0.0150	120.0000	0.0020	0.0040
2JW02	1JW08	Canton Tremblay (Canton Tremblay (Terres Rampues))		0.0010	2.7000	0.0990	15.2000	0.0400	20.0000	0.1300	1400.0000	0.0009	0.0040
2JW03	1JW38	Pérignonka		0.0010	0.3700	0.4500	28.0000	0.0200	31.0000	0.0400	700.0000	0.0008	0.0040
2JW04	1JW19	Pérignonka		0.0010	2.4000	0.1600	3.2000	0.0400	15.8000	0.1100	340.0000	0.0008	0.0040
2JW05	1JW14	Site Jeanne d'Arc		0.0010	2.1000	0.0750	18.0000	0.0080	15.4000	0.0240	500.0000	0.0008	0.0040
2JW06	1JW15	Site Jeanne d'Arc		0.0010	1.4000	0.2000	32.0000	0.0200	34.0000	0.0730	860.0000	0.0008	0.0040
2JW07	1JW17	Site Jeanne d'Arc		0.0010	2.6000	0.0430	14.2000	0.0050	13.0000	0.0180	380.0000	0.0008	0.0040
2JW08	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des îles)		0.0010	0.6000	0.0090	8.1000	0.0300	51.0000	0.1300	350.0000	0.0010	0.0040
2JW09	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des îles)		0.0010	1.4000	0.0150	5.0000	0.0800	60.0000	0.0410	290.0000	0.0008	0.0040
2JW10	1JW32	Site Herwigge		0.0030	1.5000	0.0360	3.1000	0.0600	12.6000	0.0800	260.0000	0.0020	0.0080
2JW11	1JW33	Site Herwigge		0.0030	1.5000	0.2600	3.5000	0.0500	7.8000	0.0910	240.0000	0.0020	0.0080
2JW12	1JW23	Pointe Chambord		0.0010	3.0000	0.9100	23.0000	0.1800	42.0000	0.0140	160.0000	0.0008	0.0040
2JW13	1JW26	Pointe Chambord		0.0010	2.4000	0.0050	41.0000	0.6000	0.1700	0.0003	800.0000	0.0008	0.0040

AC-10 : Paramètres analysés en laboratoire (2/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	F (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Na (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)
2JW14	1JW18	Perbonka		0.0030	1.2000	1.0000	82.0000	0.0500	220.0000	0.0430	2500.0000	0.0020	0.0080
2JW15	1JW16	Sie Jeanne d Arc		0.0010	2.0000	0.0250	8.5000	0.0030	4.1000	0.0090	240.0000	0.0010	0.0040
2JW16	1JW39	Alma - Villebois		0.0220	0.6000	0.0080	13.5000	0.0030	49.0000	0.1500	220.0000	0.0020	0.0080
2JW17	1JW09	Canton Tremblay Terres Rompues)		0.0010	2.0000	0.0050	2.7000	0.0080	3.1000	0.0050	160.0000	0.0008	0.0040
2JW18	1JW22	Saint-Gedeon (Rang des Iles)		0.0030	1.8000	0.0260	7.3000	0.1600	96.0000	0.0650	580.0000	0.0020	0.0080
2JW19	1JW06	Alma - Dam-en-terre		0.0010	3.2000	0.0590	9.0000	0.0030	3.4000	0.0040	260.0000	0.0008	0.0040
2JW20		Alma - Dam-en-terre		0.0030	2.3000	0.0970	3.3000	0.0050	9.5000	0.0680	79.0000	0.0020	0.0080
3JW01	1JW11	St Ambrose		0.0010	1.0000	0.0170	3.3000	0.0020	0.5600	0.0040	94.0000	0.0010	0.0040
3JW02	1JW13	St Ambrose		0.0010	0.1000	0.0460	3.5000	0.0020	0.6300	0.0050	82.0000	0.0010	0.0040
3JW03	1JW12	St Ambrose		0.0010	0.0400	0.0030	2.7000	0.0020	2.1000	0.0050	39.0000	0.0010	0.0040
3JW04		St Nazaire		0.0010	0.0600	0.0930	3.6000	0.0100	42.0000	0.2200	430.0000	0.0010	0.0080
3JW05	1JW17	Sie Jeanne d Arc		0.0010	1.6000	0.0470	15.0000	0.0090	13.4000	0.0180	370.0000	0.0010	0.0040
3JW06	1JW16	Sie Jeanne d Arc		0.0010	1.2000	0.0220	9.1000	0.0050	4.9000	0.0100	270.0000	0.0010	0.0040
3JW07	1JW15	Sie Jeanne d Arc		0.0010	1.4000	0.2000	32.0000	0.0200	35.0000	0.0730	870.0000	0.0010	0.0040
3JW08	1JW14	Sie Jeanne d Arc		0.0010	1.6000	0.0650	19.0000	0.0100	15.8000	0.0230	500.0000	0.0030	0.0040
3JW09	1JW18	Perbonka		0.0010	1.4000	0.9900	83.0000	0.0600	210.0000	0.0430	2500.0000	0.0010	0.0040
3JW10	1JW38	Perbonka		0.0010	1.6000	0.4100	29.0000	0.0200	31.0000	0.0400	680.0000	0.0010	0.0040
3JW11	1JW19	Perbonka		0.0370	1.0000	0.1000	3.9000	0.0400	14.5000	0.1000	310.0000	0.0010	0.0040
3JW12	1JW06	Alma - Dam-en-terre		0.0010	1.8000	0.0390	10.0000	0.0030	3.7000	0.0030	280.0000	0.0010	0.0040
3JW13	2JW20	Alma - Dam-en-terre		0.0010	1.0000	0.0420	3.4000	0.0050	9.6000	0.0660	79.0000	0.0010	0.0040
3JW14	1JW39	Alma - Villebois		0.0210	2.2000	0.0160	19.0000	0.0060	83.0000	0.2700	420.0000	0.0010	0.0040
3JW15	1JW26	Pointe Chambord		0.0010	0.5600	0.1800	42.0000	0.4900	88.0000	0.0200	420.0000	0.0010	0.0040
3JW16	1JW23	Pointe Chambord		0.0010	0.8000	0.9000	23.0000	0.1700	40.0000	0.0200	160.0000	0.0010	0.0040
3JW17		Pointe Chambord		0.0010	1.2000	2.6000	45.0000	0.5400	140.0000	0.1200	460.0000	0.0010	0.0040
3JW18	1JW03	Larouche - Jonquières		0.0010	1.2000	0.0010	1.8000	0.0020	5.9000	0.0180	130.0000	0.0010	0.0040
3JW19	1JW04	Larouche - Jonquières		0.0030	0.0400	0.0150	0.8800	0.0010	1.9000	0.0080	2.9000	0.0020	0.0040
3JW20	1JW05	Larouche - Jonquières		0.0010	0.1000	0.0020	0.2700	0.0010	0.3400	0.0006	69.0000	0.0010	0.0040
3JW21		St Nazaire		0.0380	0.9000	0.0020	4.8000	0.0020	7.5000	0.0010	15.9000	0.0010	0.0040
3JW22		St Nazaire		0.0010	1.0000	0.0020	0.6500	0.0060	0.1500	0.0007	220.0000	0.0010	0.0040
3JW23	1JW07	Canton Tremblay Terres Rompues)		0.0020	1.0000	0.0080	15.0000	0.0400	26.0000	0.1500	1100.0000	0.0010	0.0040
3JW24	1JW09	Canton Tremblay Terres Rompues)		0.0010	1.4000	0.0030	2.9000	0.0070	3.8000	0.0050	130.0000	0.0010	0.0040

AC-11 : Paramètres analysés en laboratoire (3/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	F (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Na (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)
3JW25	1JW10	Canton Tremblay (Terres Rempues)		0.0010	1.4000	0.0210	3.1000	0.0010	14.0000	0.0090	8.2000	0.0010	0.0040
3JW26	1JW08	Canton Tremblay (Terres Rempues)		0.0010	1.0000	0.0010	6.0000	0.0200	4.4000	0.0130	440.0000	0.0010	0.0040
3JW27		Dolbeau		0.0010	1.7000	0.7300	10.0000	0.0800	34.0000	0.1600	590.0000	0.0010	0.0040
3JW28	1JW28	Pointe St Methode		0.0010	0.6000	0.2100	24.0000	0.0200	34.0000	0.0150	730.0000	0.0010	0.0040
3JW29	1JW29	Pointe St Methode		0.0040	0.0400	0.0030	5.2000	0.0200	16.8000	0.0420	100.0000	0.0010	0.0040
3JW30	1JW35	StPrime		0.0040	0.5000	3.2000	13.0000	0.1400	25.0000	0.7700	770.0000	0.0010	0.0040
3JW31	1JW33	Ste Hedwidge		0.0010	0.7500	0.2900	3.4000	0.0400	7.6000	0.0880	220.0000	0.0010	0.0040
3JW32	1JW32	Ste Hedwidge		0.0010	0.6000	0.0210	2.6000	0.0400	9.2000	0.0560	190.0000	0.0010	0.0040
3JW33		Larouche - Kénogamie (Lac du camp)		0.0020	0.9000	7.7000	4.2000	0.0040	20.0000	0.5900	77.0000	0.0010	0.0040
3JW34	1JW30	Larouche - Kénogamie (Lac du camp)		0.0020	1.1000	5.1000	4.3000	0.0060	14.0000	0.3100	55.0000	0.0010	0.0040
3JW35	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des Iles)		0.0010	0.6000	0.0150	7.5000	0.0250	34.0000	0.0810	250.0000	0.0020	0.0040
3JW36		Saint-Gédéon (Rang des Iles)		0.0010	1.0000	0.9400	9.2000	0.0210	31.0000	0.3000	120.0000	0.0010	0.0040
3JW37	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des Iles)		0.0010	1.5000	0.0190	4.8000	0.0780	52.0000	0.0350	260.0000	0.0010	0.0040

AC-12 : Paramètres analysés en laboratoire (4/4)

AC-13 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (1/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Si (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Sr (mg/l)	Zn (mg/l)	Br (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	E.N.%	Somme des anions mmol/l	Somme des cations mmol/l	² H (per mil)	¹⁸ O (per mil)
1JW01		St Nazaire	6.8000	250.0000	1.5000	0.0080	0.40	112.85		0.46	5.35	6.14		
1JW02		St Nazaire	6.4000	400.0000	1.1000	0.0050	2.44	268.40		8.06	30.40	26.90	-96.70	-12.60
1JW03		Larouche - Jonquièrre	6.5000	7.5000	19.0000	0.0080	16.19	100.16	1.40	2.03	64.04	48.01	-111.30	-15.36
1JW04		Larouche - Jonquièrre	4.9000	6.5000	0.0700	0.0100	5.96	21.52		-6.19	0.61	0.46	-104.10	-14.46
1JW05		Larouche - Jonquièrre	5.4000	10.0000	0.1000	0.0050	0.40	129.50		-9.36	2.47	3.06	-104.40	-13.84
1JW06		Alma - Dam-en-terre	7.0000	5.0000	0.1300	0.0050	0.43	397.72		0.00	12.33	12.18		
1JW07		Canton Tremblay (Terres Rompues)	5.1000	60.0000	6.6000	0.0060	12.10	195.20		1.89	46.38	41.91	-103.20	-13.99
1JW08		Canton Tremblay (Terres Rompues)	3.9000	20.0000	1.3000	0.0050	4.64	199.10		0.55	19.45	18.71	-92.40	-13.50
1JW09		Canton Tremblay (Terres Rompues)	4.1000	31.0000	0.6800	0.0050	0.82	151.28		-8.94	6.30	7.48	-96.20	-13.41
1JW10		Canton Tremblay (Terres Rompues)	3.7000	30.0000	0.4200	0.0060	0.40	141.52		0.00	3.92	2.36	-98.60	-13.01
1JW11		St Ambroise	6.0000	10.0000	0.0200	0.0050	0.40	188.60	0.03	-6.77	3.53	4.10	-100.20	-13.66
1JW12		St Ambroise	5.1000	1.0000	0.1600	0.0050	0.40	90.28		0.00	2.31	2.07		
1JW13		St Ambroise	6.7000	7.0000	0.0200	0.0050	0.40	143.96	0.07	-19.42	2.48	3.72	-99.90	-13.64
1JW14		Ste Jeanne d Arc	9.1000	90.0000	0.8700	0.0080	1.97	353.80		-2.89	22.41	23.47	-99.30	-13.29
1JW15		Ste Jeanne d Arc	9.1000	250.0000	1.9000	0.0140	4.11	380.64		0.11	40.05	39.73	-87.50	-13.50
1JW16		Ste Jeanne d Arc	9.4000	150.0000	0.0900	0.0050	0.61	284.26	0.65	5.23	11.43	11.40	-37.90	-13.14
1JW17		Ste Jeanne d Arc	7.7000	60.0000	0.9800	0.0080	1.59	274.50		-5.65	16.28	17.91	-81.30	-13.35
1JW18		Peribonka	11.0000	700.0000	6.5000	0.0060	12.51	1628.70		7.51	149.93	122.97	-101.20	-14.09
1JW19		Peribonka	5.9000	150.0000	8.3000	0.0090	8.78	163.48	0.03	0.69	28.76	21.96	-98.50	-14.16
1JW20		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	5.1000	8.5000	6.8000	0.0080	11.76	114.68		-0.90	30.39	23.45	-103.90	-14.89
1JW21		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	5.7000	200.0000	14.0000	0.0090	11.19	145.18	0.04	1.81	29.52	20.53	-89.70	-13.85
1JW22		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	4.2000	450.0000	22.0000	0.0240	27.12	89.06		4.33	65.88	45.07	97.20	-15.11
1JW23		Pointe Chambord	3.8000	0.5000	6.6000	0.0060	5.30	120.00		0.00	14.01	10.99	341.30	-13.99
1JW24		Chambord - Domaine du Marais	6.1000	0.5000	0.6600	0.0070	0.40	151.28		0.00	3.46	2.06	-103.60	-14.21
1JW25		Chambord - Domaine du Marais	5.9000	0.5000	0.8300	0.0050	0.40	130.00		-18.18	2.29	2.01		
1JW26		Pointe Chambord	3.3000	5.0000	0.0100	0.0050	4.00	287.92	0.04	-0.60	36.25	36.74	-90.60	-14.20

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Si (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Sr (mg/l)	Zn (mg/l)	Br (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	E.M.%	Somme des anions mmol/l	Somme des cations mmol/l	² H (per mil)	¹⁸ O (per mil)
1JW27		Pointe Chambord	5.1000	250.0000	3.9000	0.0200	0.40	248.88		0.00	5.58	3.83	-8.80	-13.92
1JW28		Pointe St Mathode	9.1000	200.0000	1.0000	0.0050	2.38	286.70	0.04	-5.37	31.47	35.51	-97.80	-13.38
1JW29		Pointe St Mathode	6.1000	55.0000	0.5300	0.0080	6.18	372.00		2.20	8.22	6.45	-91.20	-13.50
1JW30		Larouche - Kérogamie (Lac du camp)	10.0000	15.0000	0.4300	0.0110								
1JW31		Ch. De la pointe	6.0000	16.0000	0.1200	0.0050	0.40	353.00	0.04	0.00	10.31	6.89	-99.00	-13.25
1JW32		Site Hedwidge	4.2000	150.0000	23.0000	0.0190	19.98	114.56		-7.91	3.43	4.16		
1JW33		Site Hedwidge	4.9000	250.0000	15.0000	0.0130	15.60	65.88		-1.46	45.46	29.91	-105.20	-14.79
1JW34		Ch. De la pointe	6.2000	20.0000	0.7400	0.0070	5.90	211.06		0.00	36.73	24.04	-101.70	-14.10
1JW35		Siprime	1.3000	7.0000	19.0000	0.0110	22.45	40.26		3.31	49.01	26.98	-71.50	-14.59
1JW36		Chambord - Village	3.7000	23.0000	0.2700	0.0050	0.40	161.04	0.04	0.00	4.22	2.33		
1JW37		Larouche - Jonquiére	5.3000	10.0000	0.4000	0.0070	2.47	103.70		-5.99	2.00	1.63	-89.90	-13.31
1JW38		Peribonke	9.2000	100.0000	2.1000	0.0070	3.05	484.00	0.04	-2.75	34.22	34.20	-30.30	-12.36
1JW39		Alma - Alma - Villebois	5.7000	100.0000	31.0000	0.0200	37.51	54.90		-4.18	87.08	57.06	-93.20	-14.01
2JW01	1JW03	Larouche - Jonquiére (Larouche - Jonquiére) Canton Tremblay (Terres Rompues)}	5.4000	8.5000	1.7000	0.0050								
2JW02	1JW08		3.9000	70.0000	9.1000	0.0060								
2JW03	1JW08		9.2000	120.0000	2.1000	0.0050	19.44	122.00		1.36	70.83	65.47	-98.90	-13.81
2JW04	1JW19	Peribonke	6.0000	150.0000	9.0000	0.0050	3.12	448.96	0.07	-4.53	32.96	34.32		
2JW05	1JW14	Site Jeanne d'Arc	8.7000	80.0000	0.8600	0.0050	9.63	156.16		0.12	30.37	23.37		
2JW06	1JW15	Site Jeanne d'Arc	8.9000	170.0000	1.9000	0.0170	4.22	372.10		-3.37	22.35	23.50		
2JW07	1JW17	Site Jeanne d'Arc	7.3000	65.0000	0.9600	0.0050	1.61	392.84		-3.27	39.42	41.10		
2JW08	1JW20	Saint-Gedeon (Rang des îles)	4.8000	5.0000	5.9000	0.0050	11.34	143.96		-0.62	28.85	22.35		
2JW09	1JW21	Saint-Gedeon (Rang des îles)	5.3000	130.0000	17.0000	0.0050								
2JW10	1JW32	Site Hedwidge	4.0000	250.0000	23.0000	0.0100	13.82	176.90	0.10	-0.18	35.56	24.90		
2JW11	1JW33	Site Hedwidge	4.6000	240.0000	17.0000	0.0100	19.39	75.64		0.21	46.50	30.15		
2JW12	1JW23	Pointe Chambord	3.7000	0.5000	6.4000	0.0050	18.69	134.20		1.10	44.53	28.27		
2JW13	1JW26	Pointe Chambord	3.1000	0.5000	0.0050	0.0050	4.97	302.56		0.64	14.67	11.03		
							15.83	396.50	0.04	-0.85	35.35	35.95		

AC-14 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (2/4)

Numéro des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Si (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Sr (mg/l)	Zn (mg/l)	Br (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	E.N.%	Somme des anions (mmol/l)	Somme des cations (mmol/l)	³ H (per mil)	¹⁸ O (per mil)
2JW14	1JW18	Peribonka	9.6000	530.0000	6.8000	0.0100	13.21	522.16		0.28	132.85	124.22		
2JW15	1JW16	Ste Jeanne d Arc	8.9000	11.0000	0.0900	0.0050	0.52	376.98	0.59	0.46	11.23	10.95		
2JW16	1JW39	Alma - Villebois	5.9000	70.0000	16.0000	0.0100	19.07	82.96		2.81	50.31	29.09		
2JW17	1JW09	Canton Tremblay Terres Rompues	4.0000	40.0000	0.5900	0.0050	0.92	217.16		1.69	7.77	7.47		
2JW18	1JW22	Saint-Jedion (Rang des Iles)	4.0000	300.0000	22.0000	0.0290	25.44	112.24	0.04	1.14	64.69	45.86		
2JW19	1JW06	Alma - Dan-en-terre	6.8000	4.9000	0.1300	0.0050	0.46	509.96		-0.69	11.74	11.75	-77.80	-12.69
2JW20	1JW11	Alma - Dan-en-terre	5.5000	15.0000	3.8000	0.0100	0.43	118.34		0.63	12.39	7.95	-99.00	-13.73
3JW01	1JW11	St Ambrose	5.8000	6.5000	0.0200	0.0050	0.40	204.96		-6.58	3.70	4.23		
3JW02	1JW13	St Ambrose	6.5000	2.0000	0.0200	0.0050	0.40	107.36		0.00	3.77	3.72		
3JW03	1JW12	St Ambrose	5.2000	5.5000	0.1600	0.0050	0.40	175.68		0.00	2.28	2.05		
3JW04	1JW17	St Nazaire	5.4000	5.5000	11.0000	0.0080	19.79	93.94		-6.02	52.64	39.12	-87.70	-14.81
3JW05	1JW17	Ste Jeanne d Arc	7.7000	100.0000	0.9800	0.0110	1.48	353.80		0.97	17.98	17.57		
3JW06	1JW16	Ste Jeanne d Arc	9.2000	240.0000	0.1100	0.0050	0.60	374.54	0.63	13.42	14.10	12.32		
3JW07	1JW15	Ste Jeanne d Arc	9.3000	140.0000	2.0000	0.0300	0.42	475.80		-3.19	40.42	41.65		
3JW08	1JW14	Ste Jeanne d Arc	9.1000	60.0000	0.8900	0.0210	1.78	485.56		-1.21	23.69	23.57		
3JW09	1JW18	Peribonka	11.0000	620.0000	6.8000	0.0060	12.45	512.40		4.87	144.91	124.09		
3JW10	1JW36	Peribonka	9.3000	200.0000	2.1000	0.0100	3.08	575.84		1.68	35.94	33.55		
3JW11	1JW19	Peribonka	6.1000	230.0000	8.0000	0.0990	8.55	228.14		4.36	29.19	21.27		
3JW12	1JW06	Alma - Dan-en-terre	7.2000	45.0000	0.1100	0.0050	2.78	553.88		0.56	12.55	12.65		
3JW13	1JW20	Alma - Dan-en-terre	5.6000	38.0000	3.8000	0.0140	3.01	118.34		2.33	12.59	7.96		
3JW14	1JW39	Alma - Villebois	5.6000	280.0000	32.0000	0.0610	35.91	68.32		6.28	100.51	54.98		
3JW15	1JW26	Pointe Chambord	3.6000	34.0000	16.0000	0.0120	14.17	430.66		-4.92	30.49	26.73		
3JW16	1JW23	Pointe Chambord	3.7000	38.0000	6.4000	0.0090	4.77	306.22		0.22	14.33	10.92		
3JW17	1JW03	Pointe Chambord	4.2000	45.0000	23.0000	0.0570	19.57	439.20		0.00	43.84	32.78	-68.10	-14.18
3JW18	1JW04	Larouche - Jongliere	5.4000	90.0000	1.9000	0.0050	1.48	161.04	0.17	0.00	7.84	7.24		
3JW19	1JW04	Larouche - Jongliere	4.0000	7.0000	0.0500	0.0100	4.17	48.80		35.66	1.21	0.38		
3JW20	1JW05	Larouche - Jongliere	5.3000	8.0000	0.1000	0.0050	0.40		0.21	0.00	3.03	3.06		
3JW21	1JW05	St Nazaire	9.3000	16.0000	0.1800	0.0140	1.27	153.72		9.86	3.66	1.98	-93.80	-13.32
3JW22	1JW09	St Nazaire	6.5000	39.0000	0.0200	0.0050	0.44	168.36		-27.53	5.09	9.63		
3JW23	1JW07	Canton Tremblay Terres Rompues	5.0000	50.0000	10.0000	0.0070	15.60	290.36		1.28	58.57	52.92	-102.50	-14.31
3JW24	1JW09	Canton Tremblay Terres Rompues	4.1000	28.0000	0.7000	0.0050	0.64	146.40		-2.73	6.17	6.27		

AC-15 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (3/4)

Numero des échantillons	numéro précédent	Secteurs d'échantillonnage	Si (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Sr (mg/l)	Zn (mg/l)	Br (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	H ₂ S (mg/l)	E.N.%	Somme des anions mmol/l	Somme des cations mmol/l	² H (per mil)	¹⁸ O (per mil)
3JW25	1JW10	Canton Tremblay (Terres Rompues)	3.4000	30.0000	0.4200	0.0070	0.40	179.34		-3.91	3.61	2.34		
3JW26	1JW08	Canton Tremblay (Terres Rompues)	3.8000	34.0000	1.4000	0.0050	4.49	179.34		-3.03	19.21	20.04		
3JW27		Colbeau	5.2000	240.0000	14.0000	0.0070	14.04	61.00		0.00	56.50	42.47	-117.70	-16.79
3JW28	1JW28	Pointe St. Mathilde	9.1000	34.0000	1.1000	0.0050	3.76	296.46		0.61	32.72	34.31		
3JW29	1JW29	Pointe St. Mathilde	6.1000	29.0000	0.5400	0.0090	99.55	48.80		0.00	222.74	128.35	-101.30	-14.74
3JW30	1JW35	St-Prime	4.7000	12.0000	100.0000	0.0050	15.59	132.98		0.00	38.62	24.87		
3JW31	1JW33	Site Hedwidge	4.9000	140.0000	15.0000	0.0140	12.29	75.64		-9.77	24.88	20.51		
3JW32	1JW32	Site Hedwidge	4.5000	190.0000	5.4000	0.0110	12.29	75.64						
3JW33		Larouche - Kénogami (Lac du camp)	7.3000	130.0000	0.5200	0.0080	0.40	286.70	0.03	0.00	13.77	9.29	-91.90	-14.14
3JW34	1JW20	Larouche - Kénogami (Lac du camp)	10.0000	110.0000	0.4400	0.0170	0.40	437.98		8.17	13.18	7.33		
3JW35	1JW20	Saint-Gédéon (Rang des Îles)	5.1000	12.0000	3.7000	0.0080	8.92	131.76		0.00	19.83	15.51		
3JW36		Saint-Gédéon (Rang des Îles)	9.9000	120.0000	2.6000	0.0080	4.54	286.70	0.03	0.00	15.32	11.01		
3JW37	1JW21	Saint-Gédéon (Rang des Îles)	5.6000	450.0000	16.0000	0.0070	34.54	190.32	0.17	8.26	33.74	22.00		

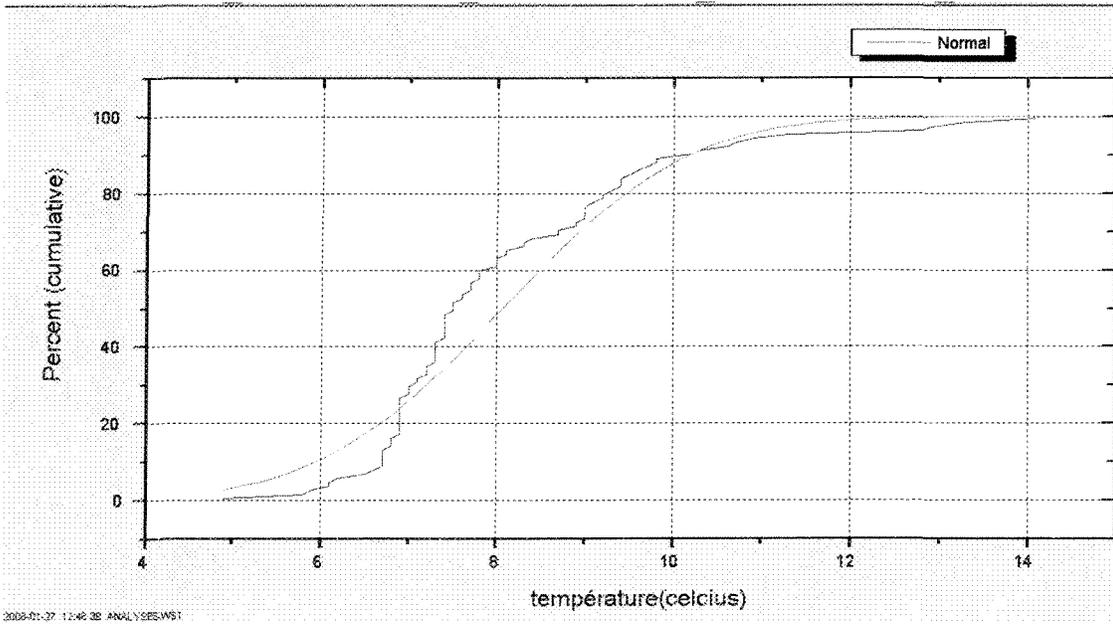
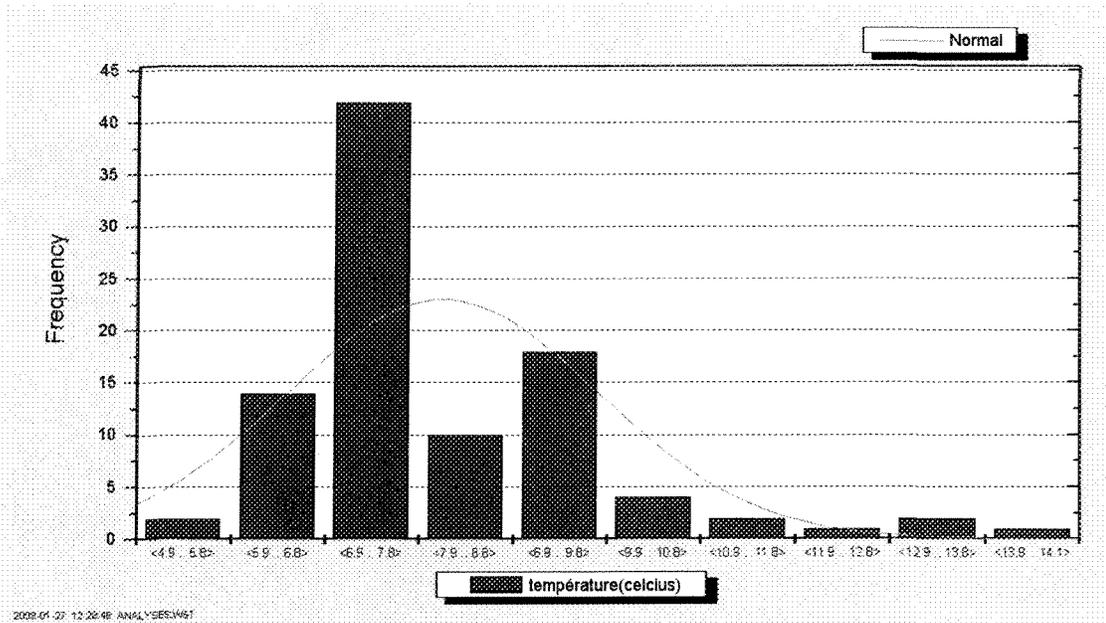
AC-16 : Paramètres analysés en laboratoire, sommes des anions et des cations (4/4)

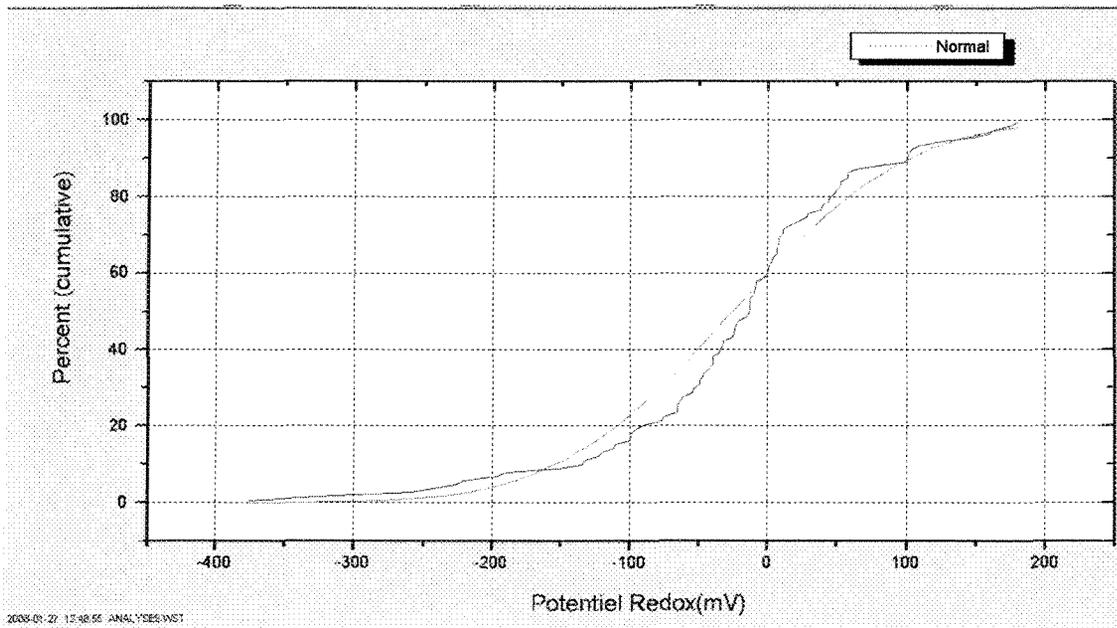
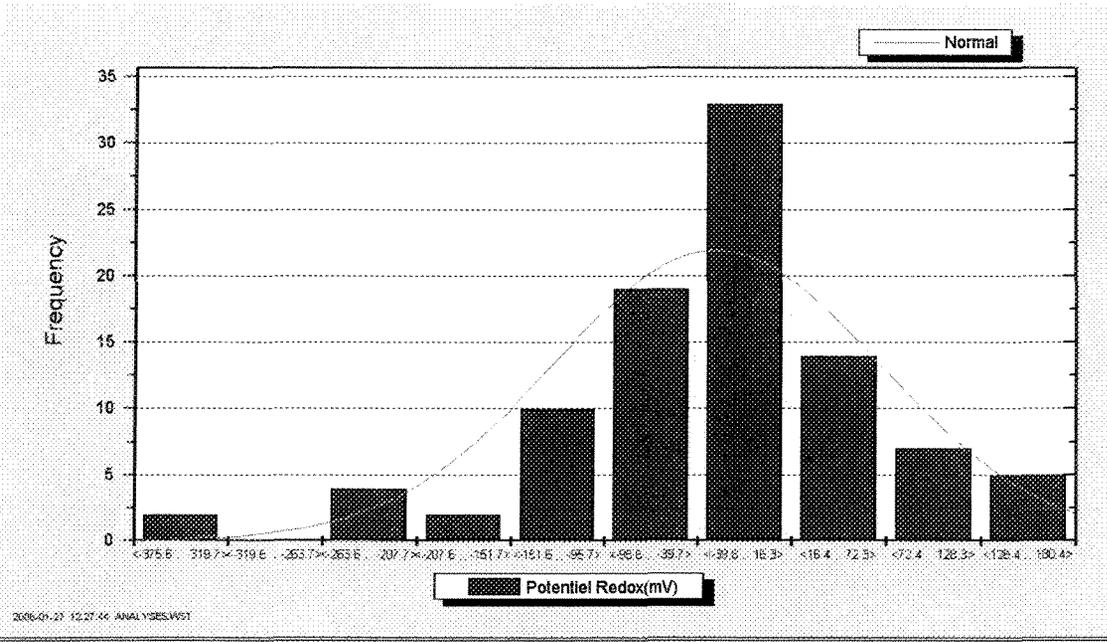
ANNEXE D: Histogrammes et courbes cumulatives

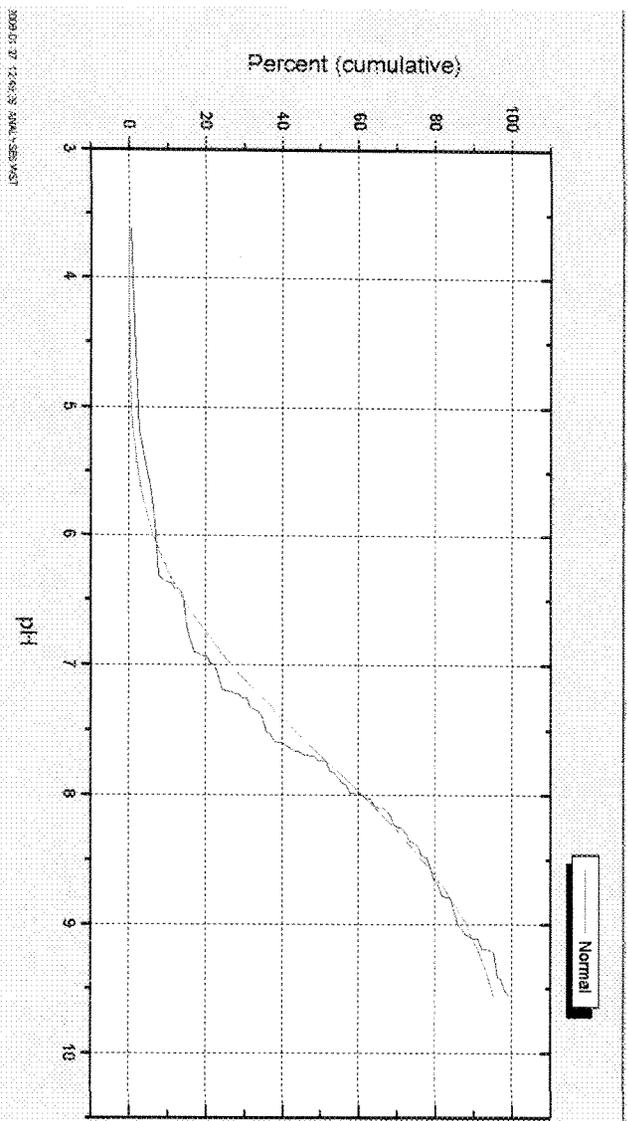
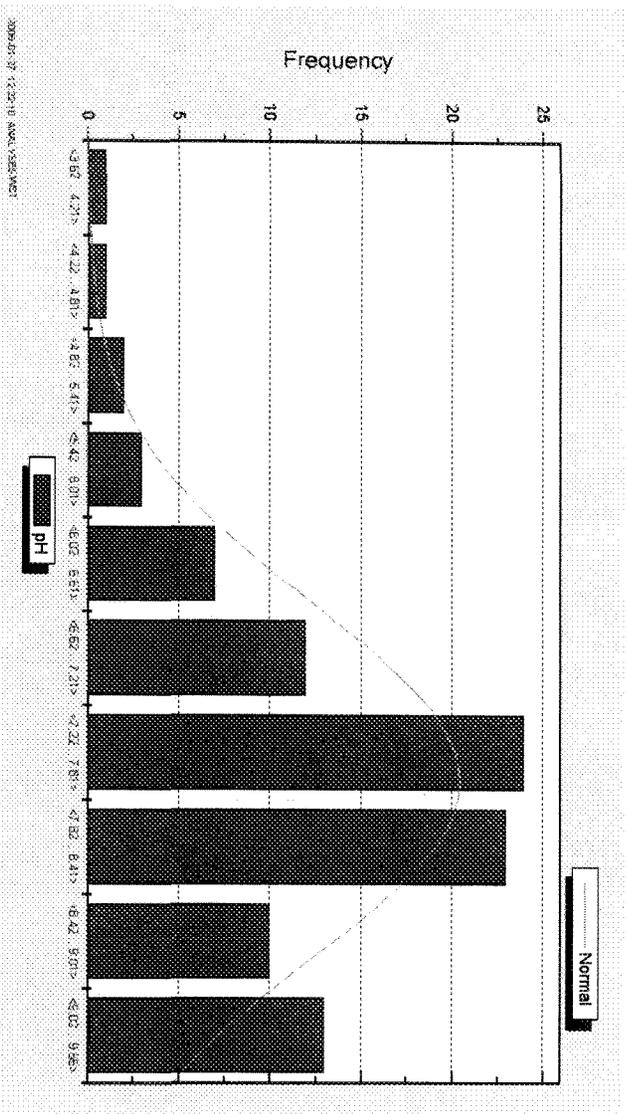
Cette annexe contient les graphiques de distribution et les courbes cumulatives des paramètres mesurés et analysés dans le cadre de cette étude. Sur ces graphiques reposent les observations présentées au chapitre 6 de ce mémoire.

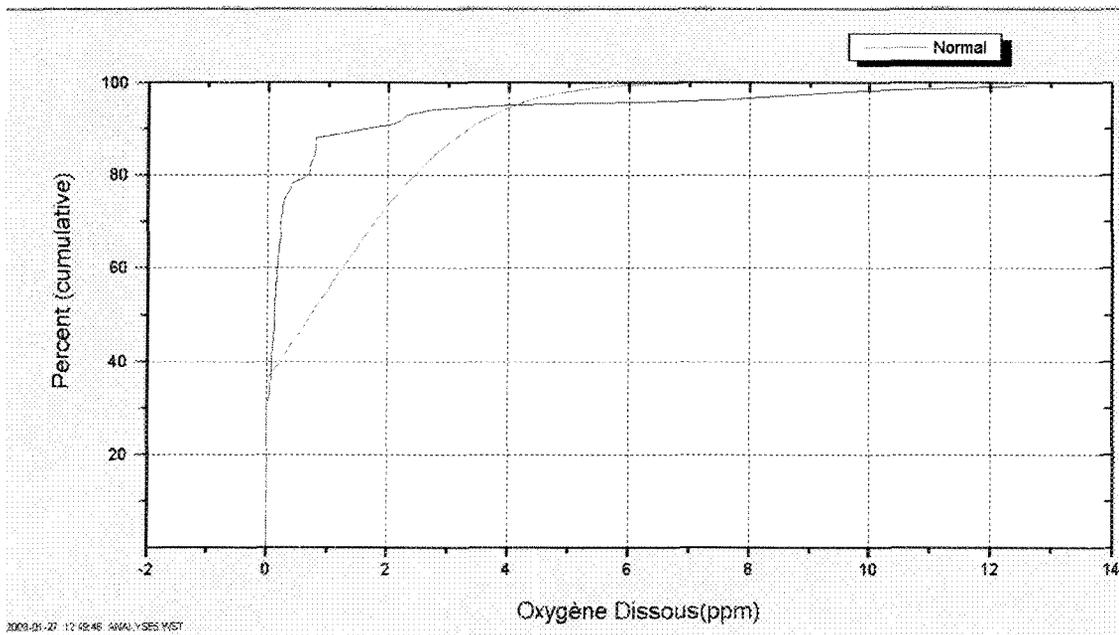
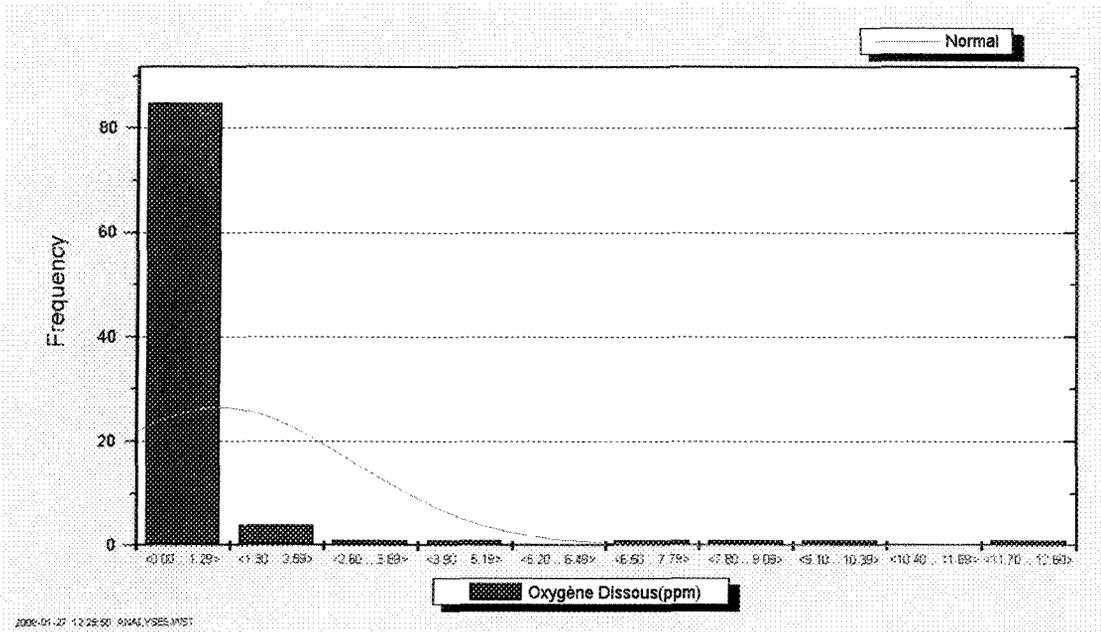
SOMMAIRE DE L'ANNEXE

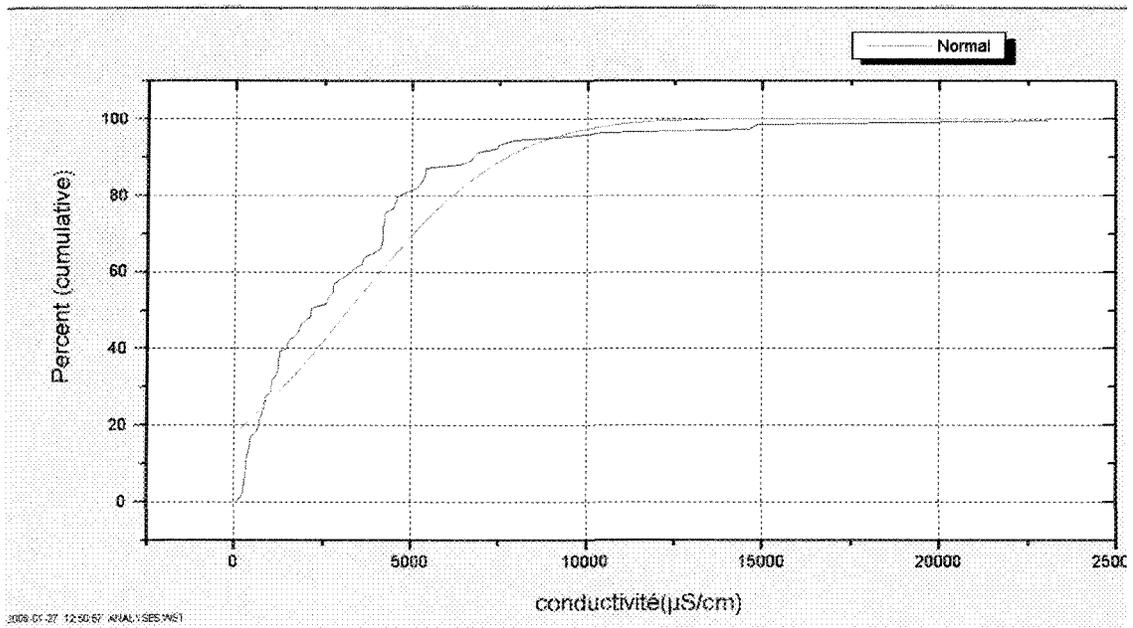
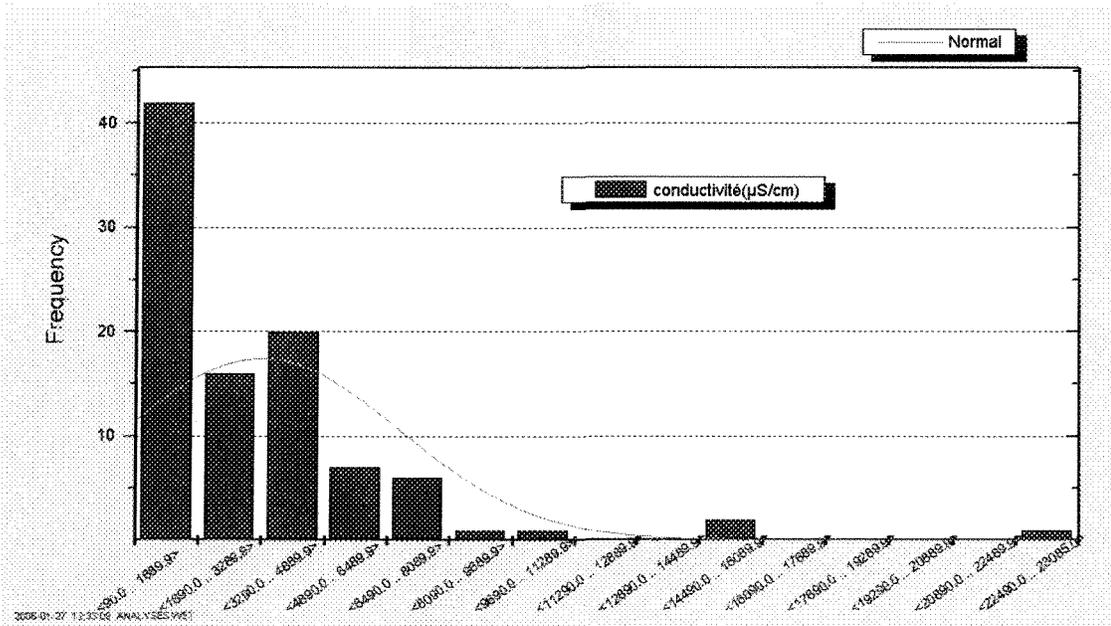
Paramètres	Page
Température	141
Potentiel Redox	142
pH	143
Oxygène dissous	144
Conductivité	145
TSD	146
Aluminium	147
Bore	148
Baryum	149
Calcium	150
Chlorures	151
Cuivre	152
Fluorures	153
Fer	154
Potassium	155
Lithium	156
Magnésium	157
Manganèse	158
Sodium	159
Nickel	160
Plomb	161
Silice	162
Sulfates	163
Strontium	164
Zinc	165
Bromures	166
Bicarbonates	167
Sulfures	168

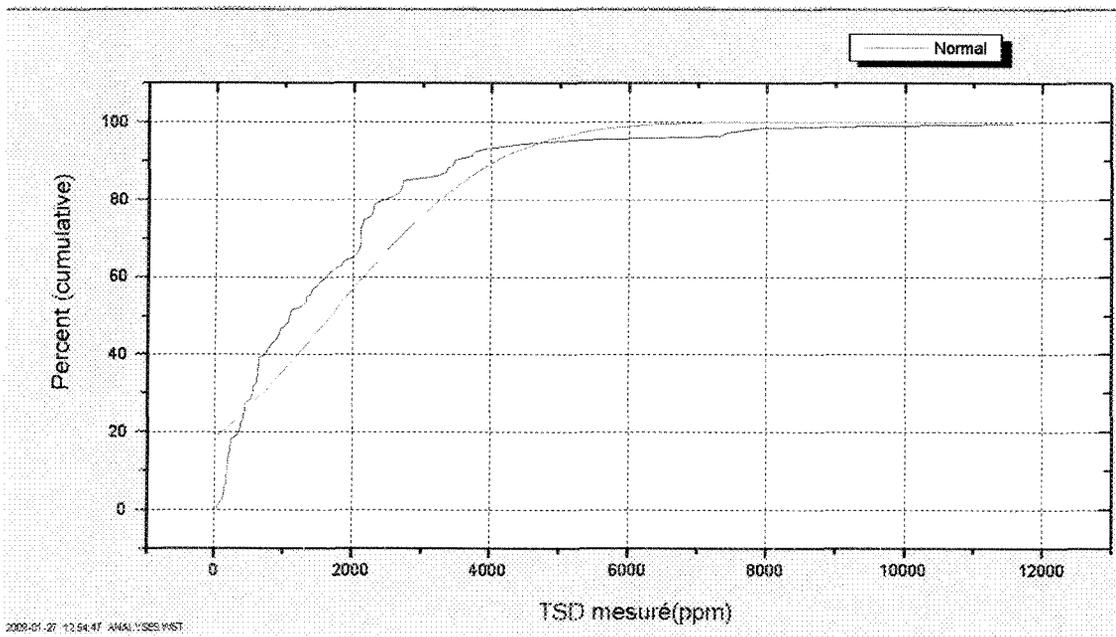
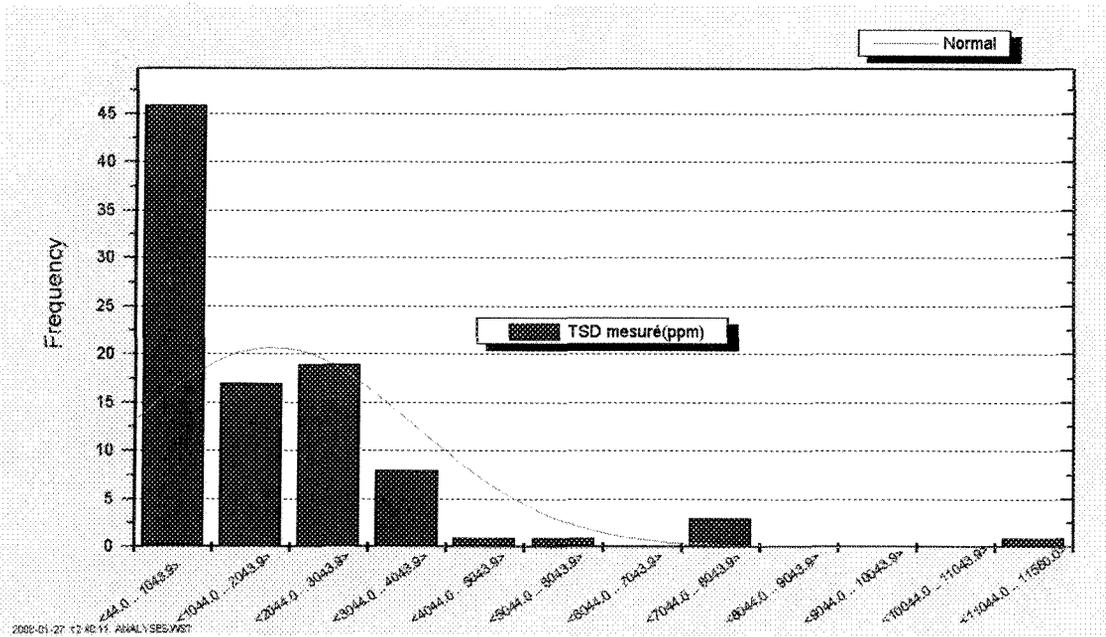


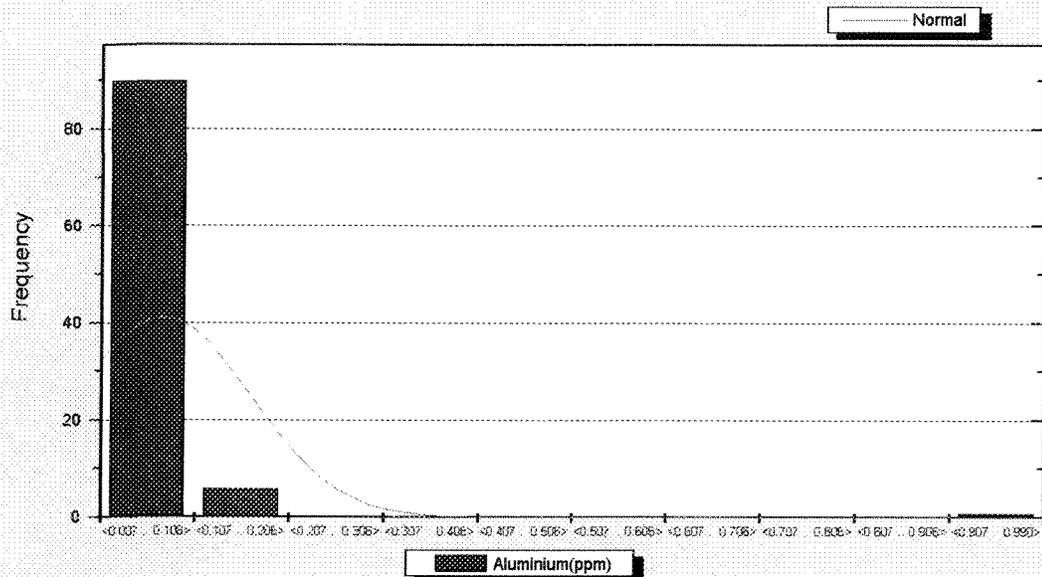




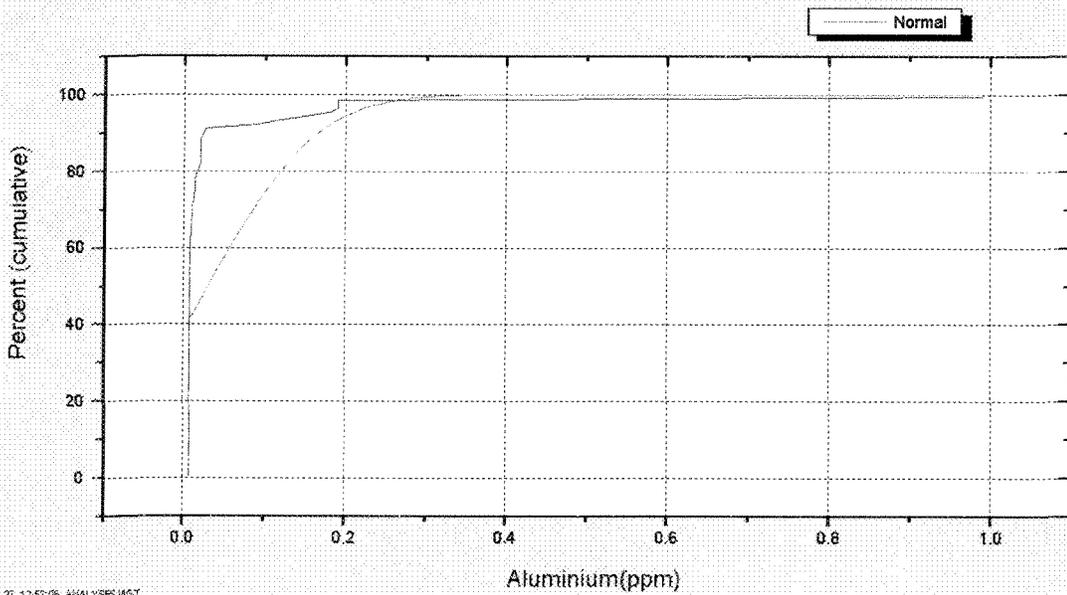




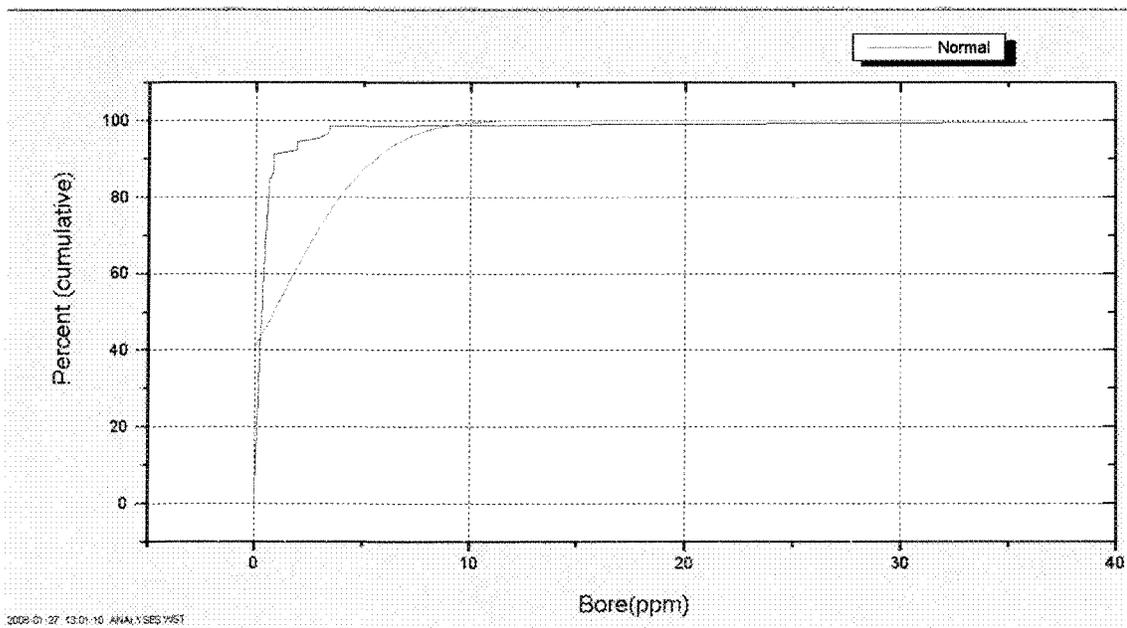
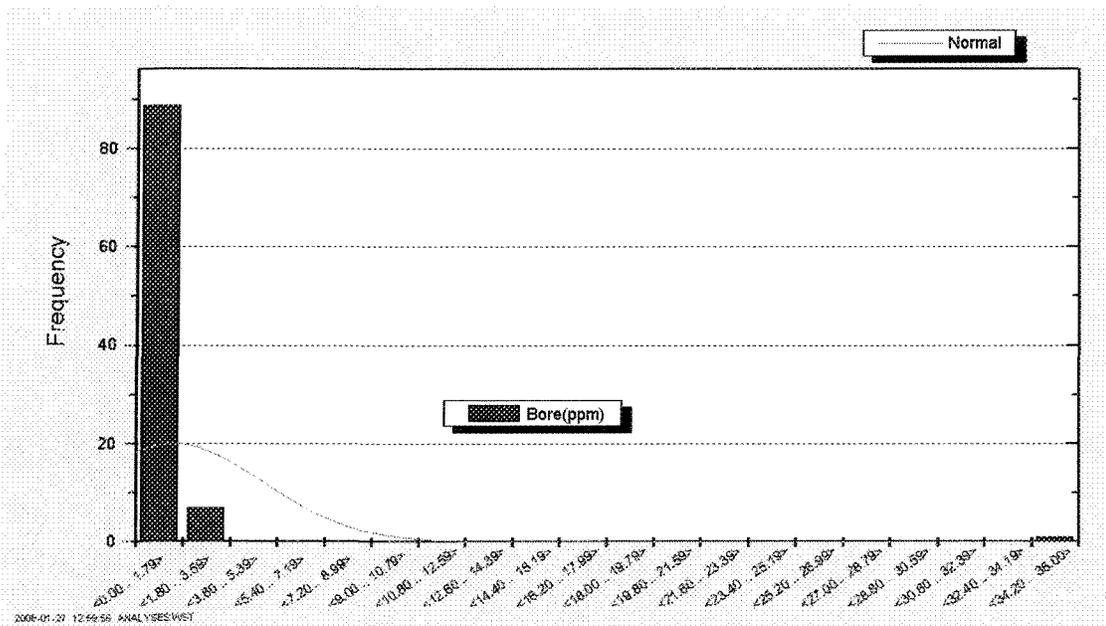


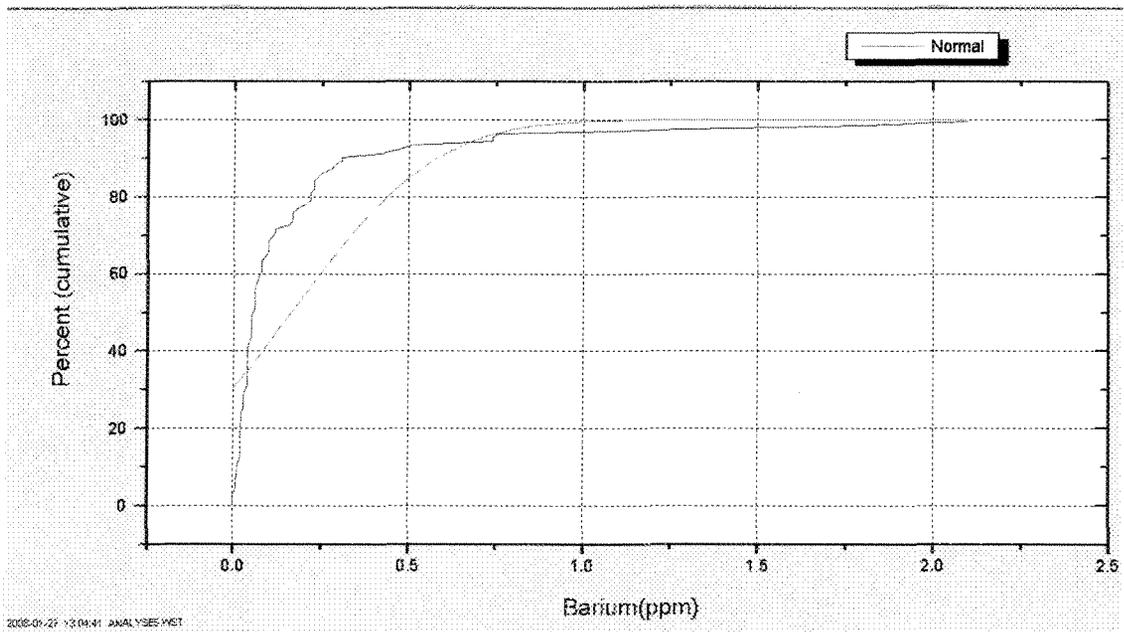
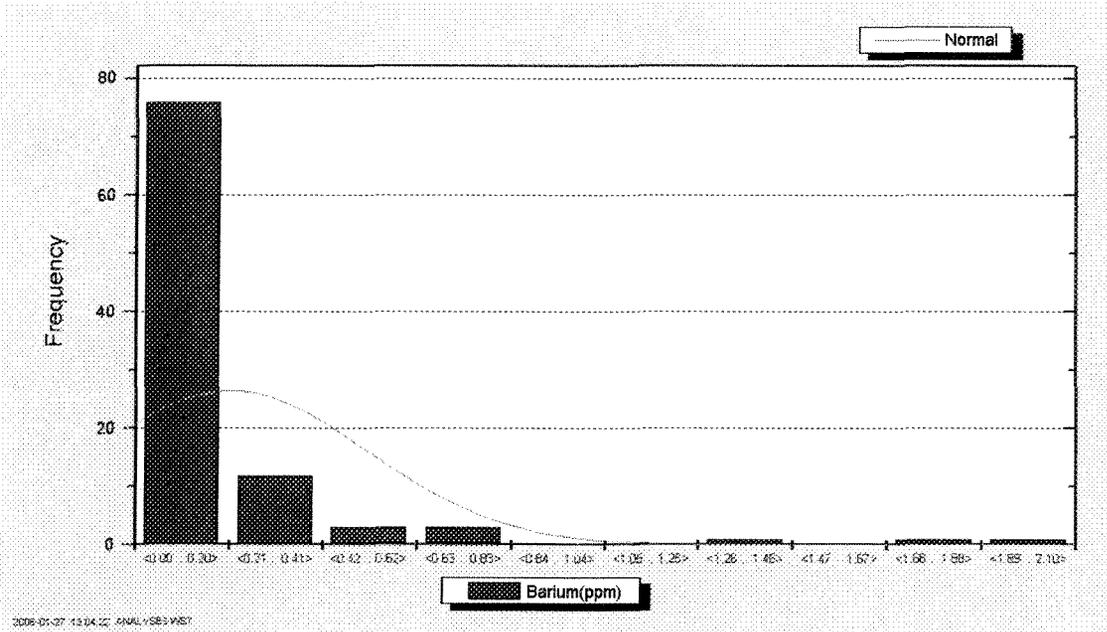


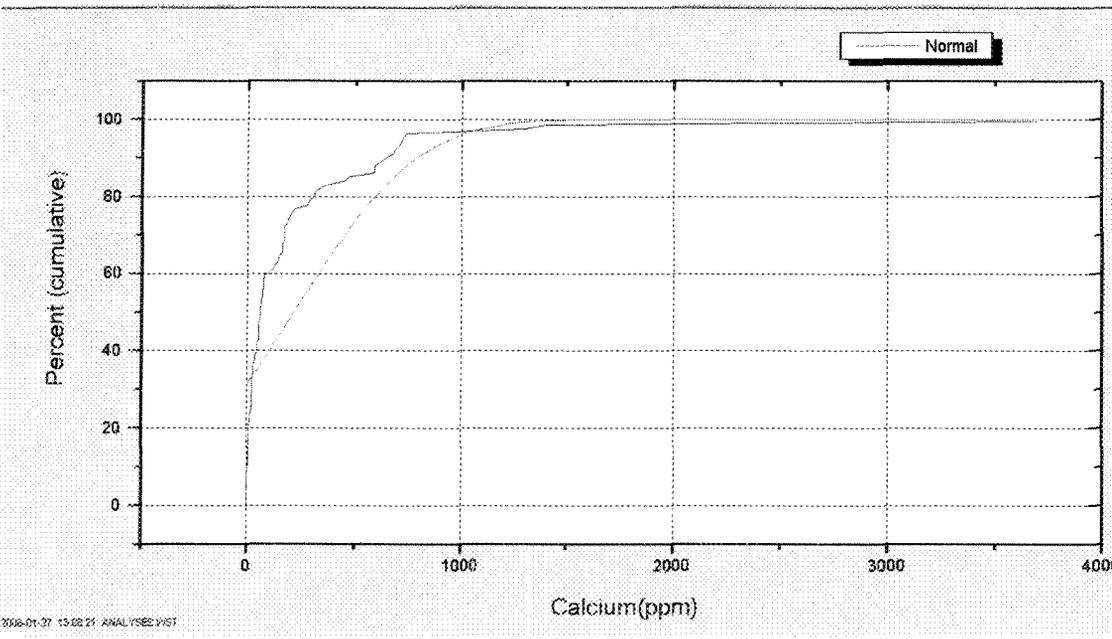
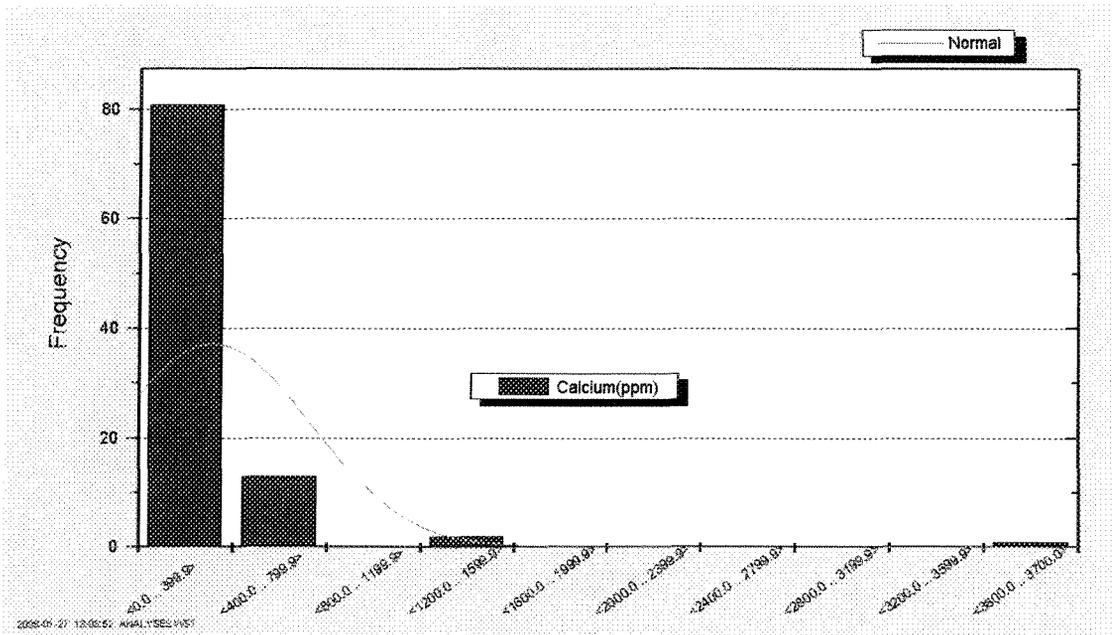
2009-01-27 12:58:46 ANALYSES.V5T

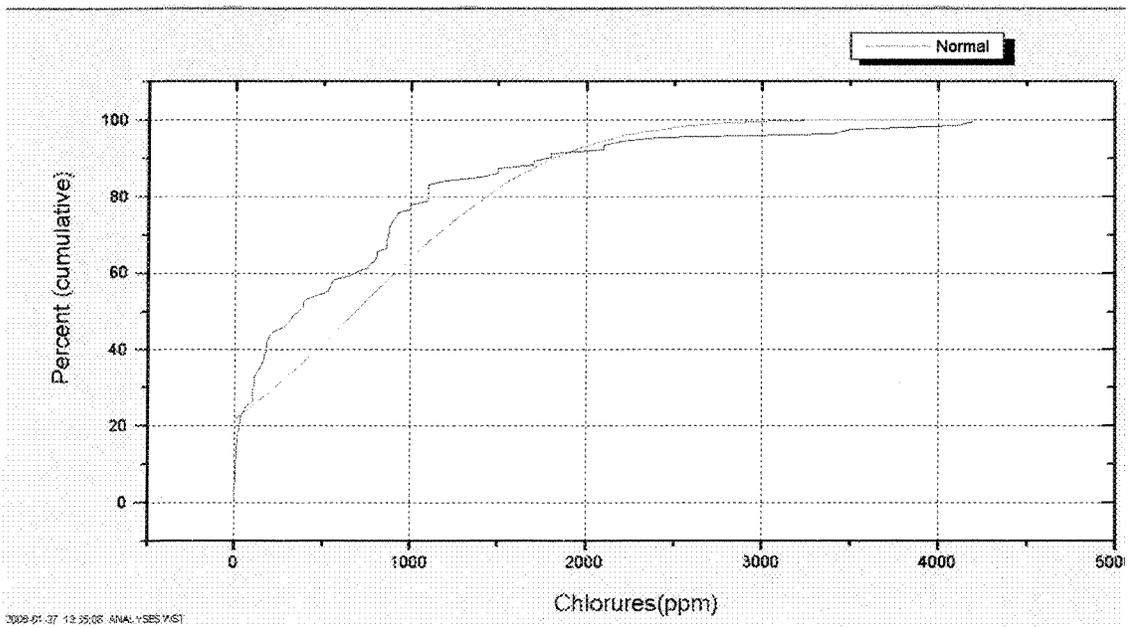
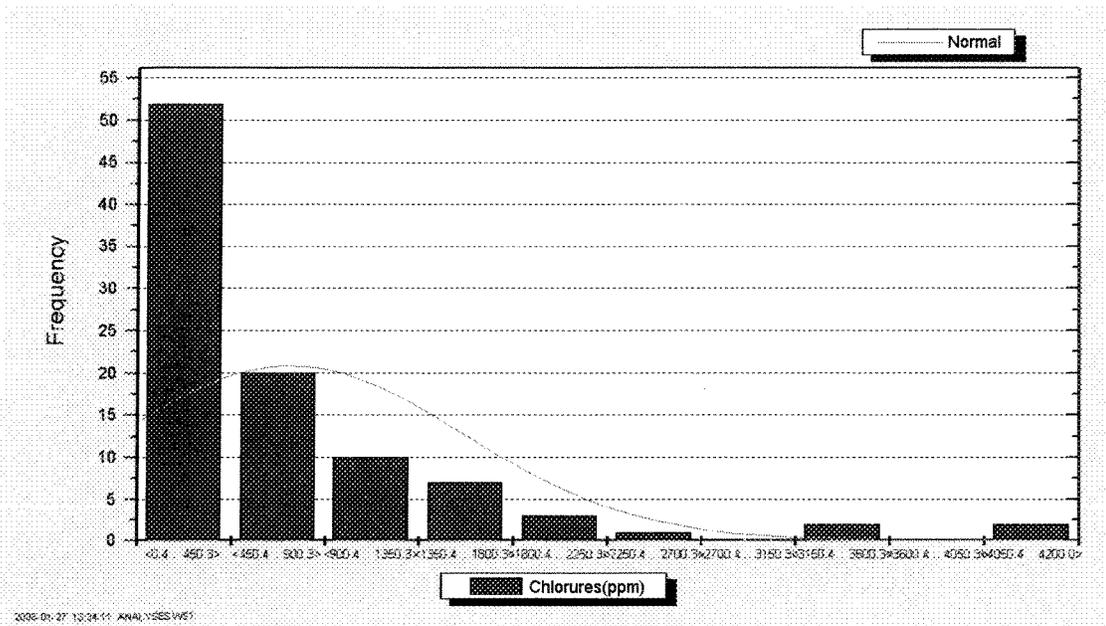


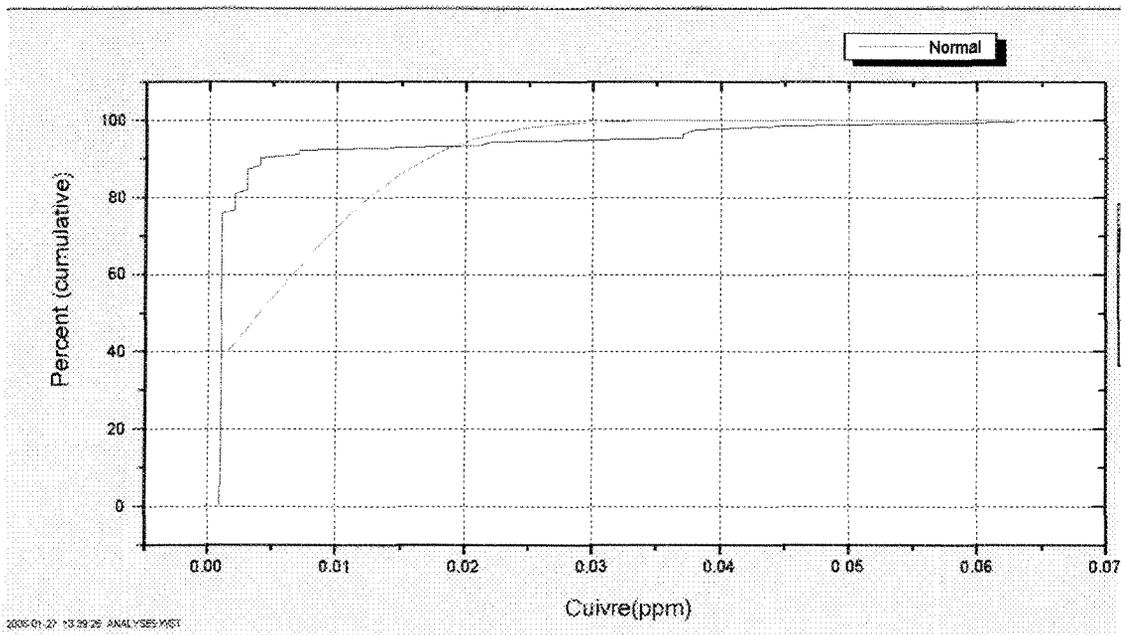
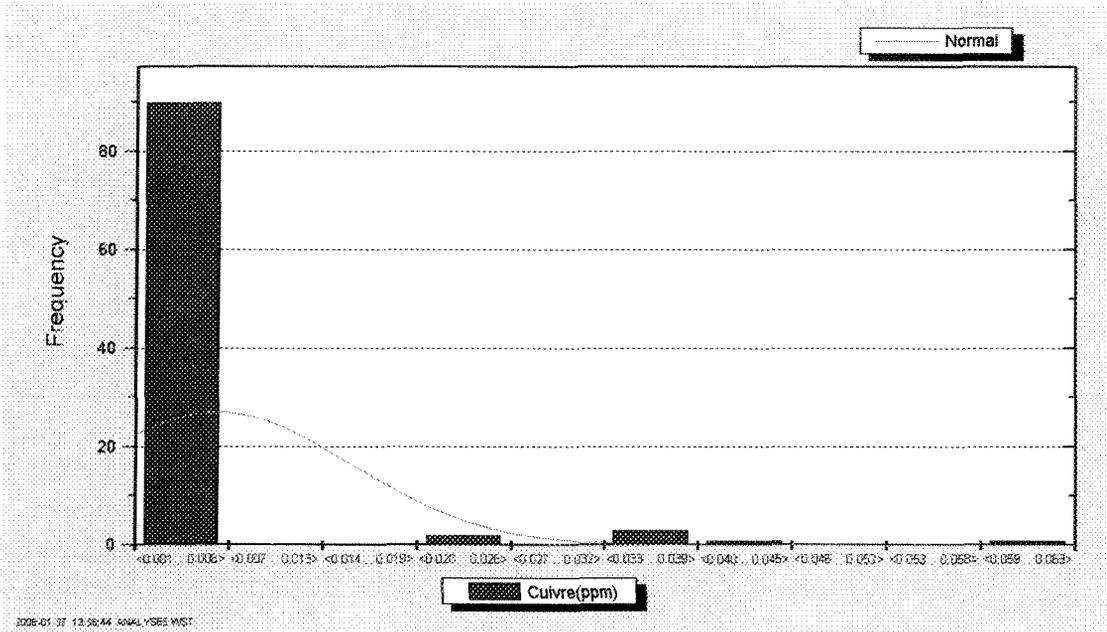
2009-01-27 12:57:06 ANALYSES.V5T

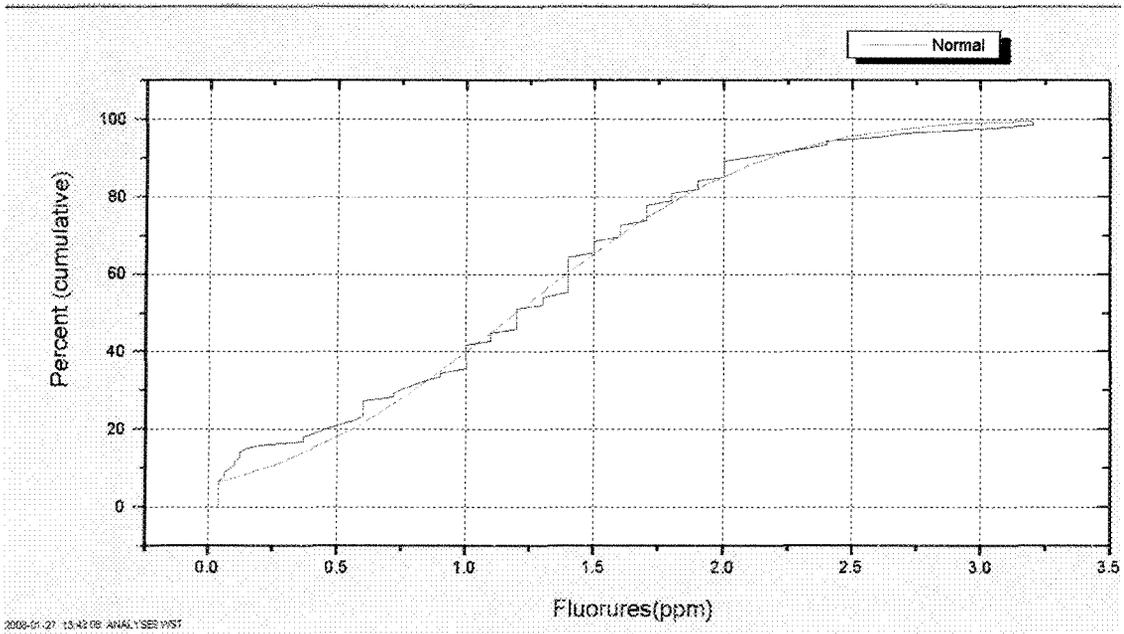
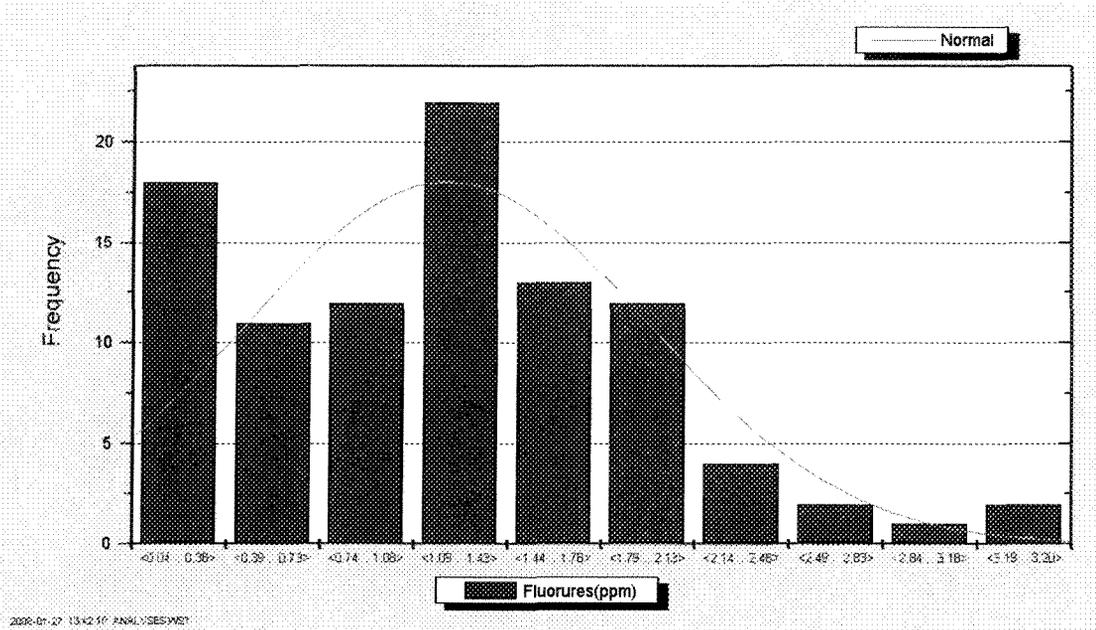


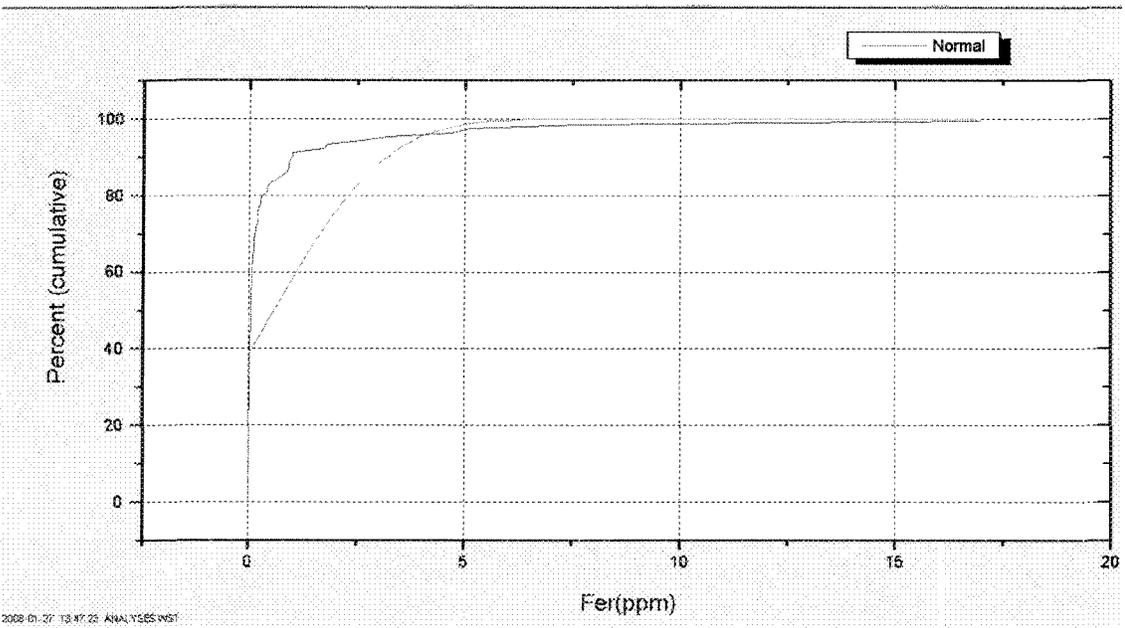
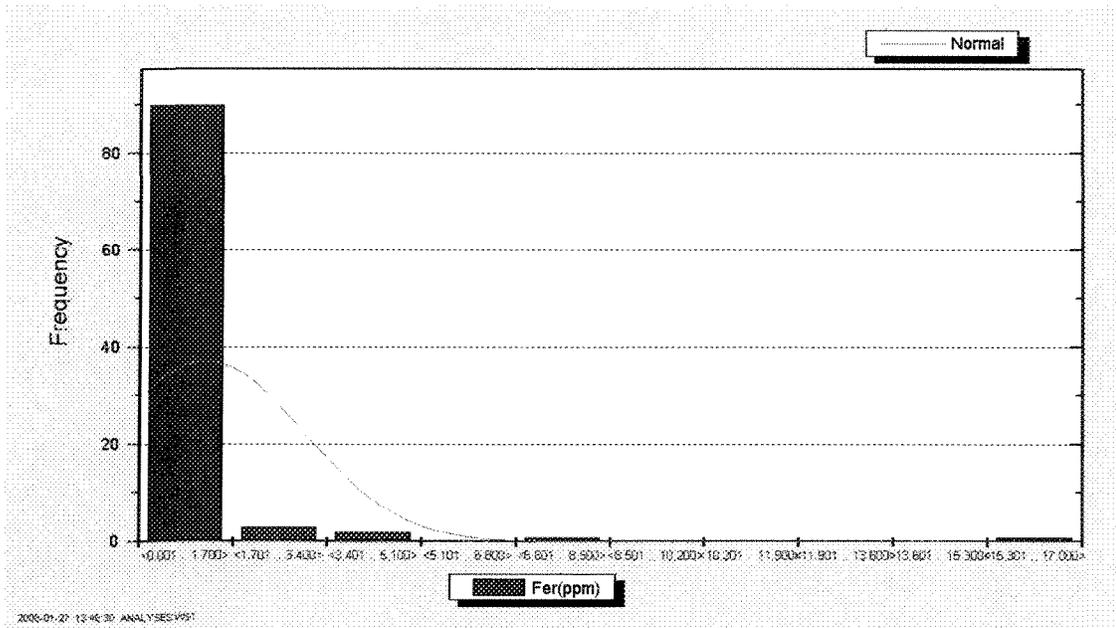


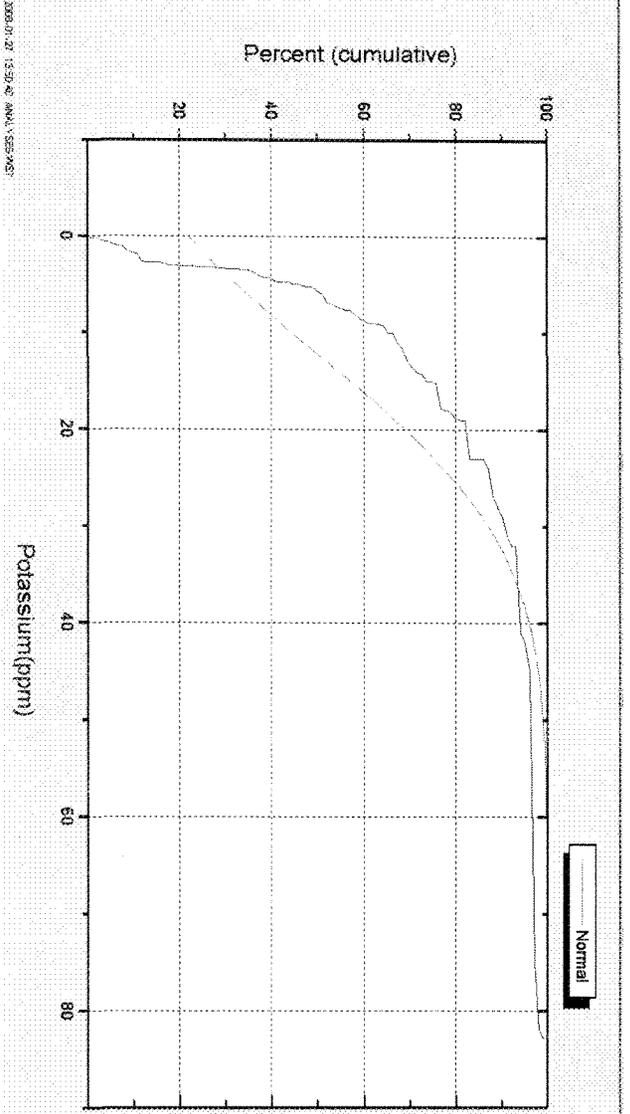
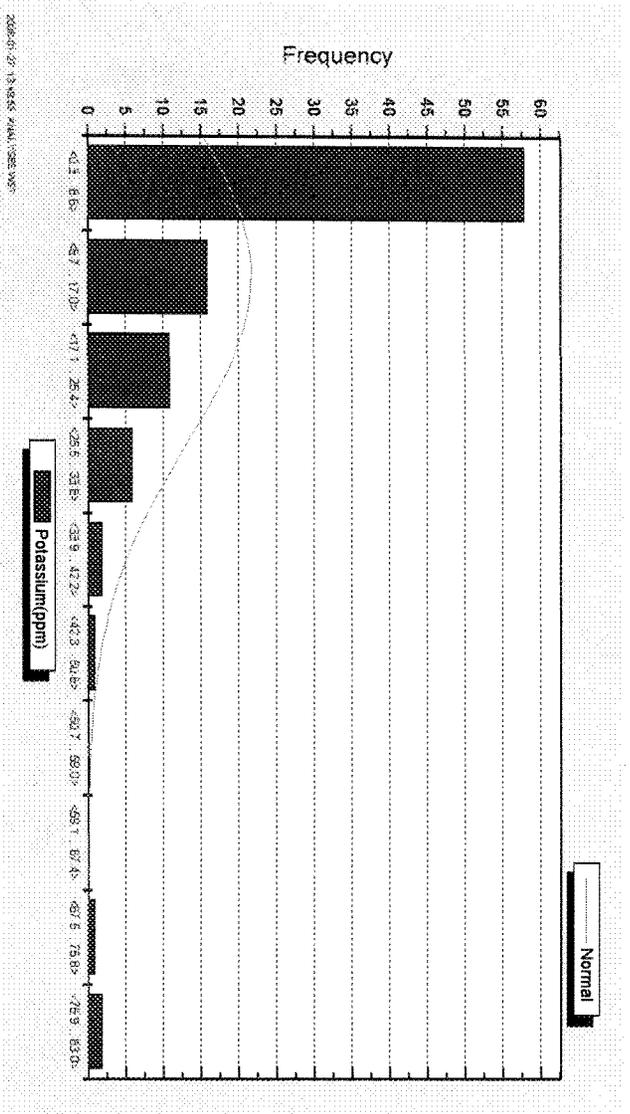


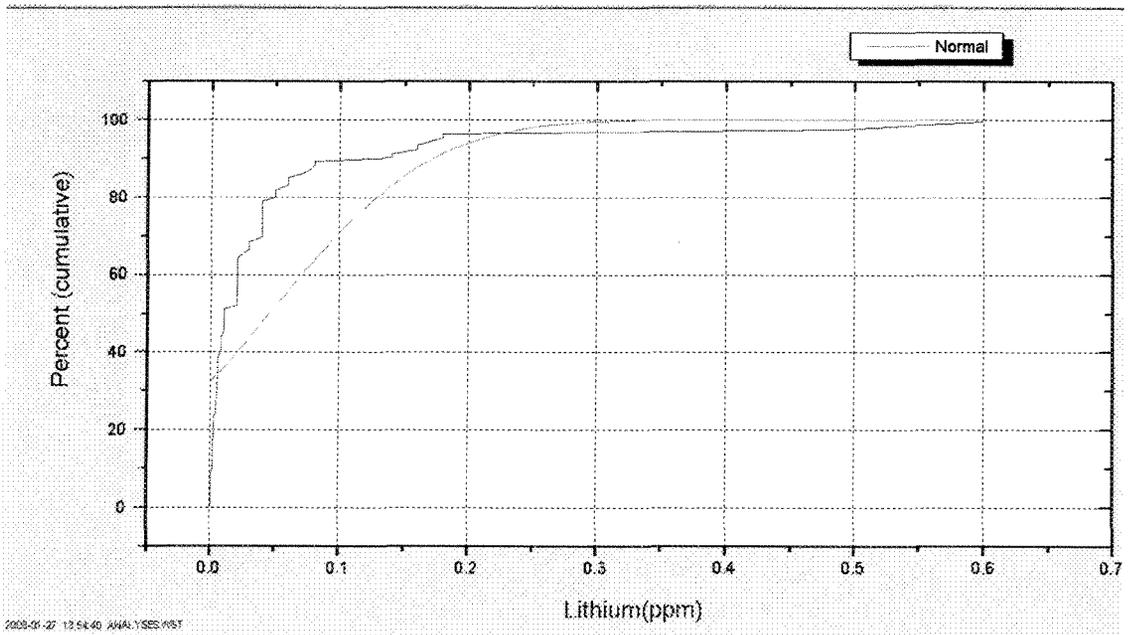
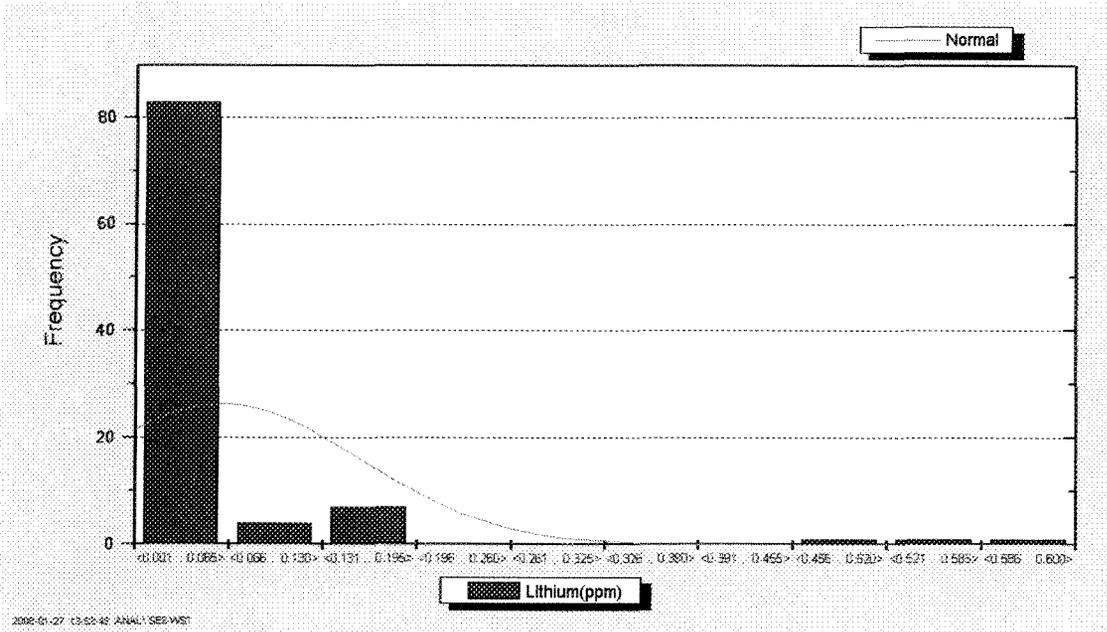


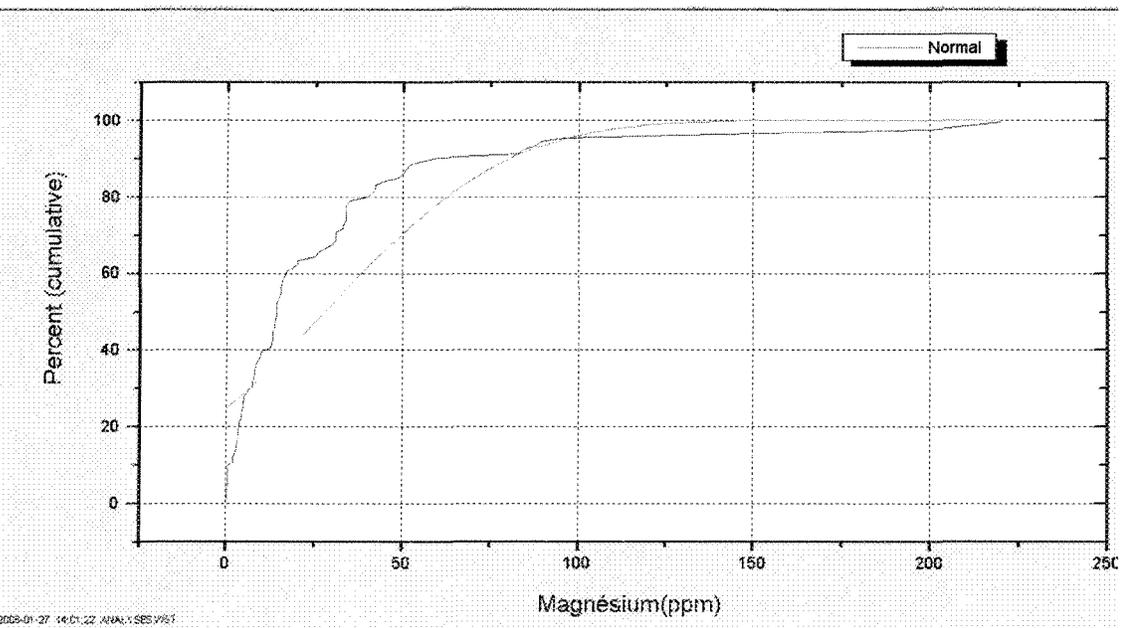
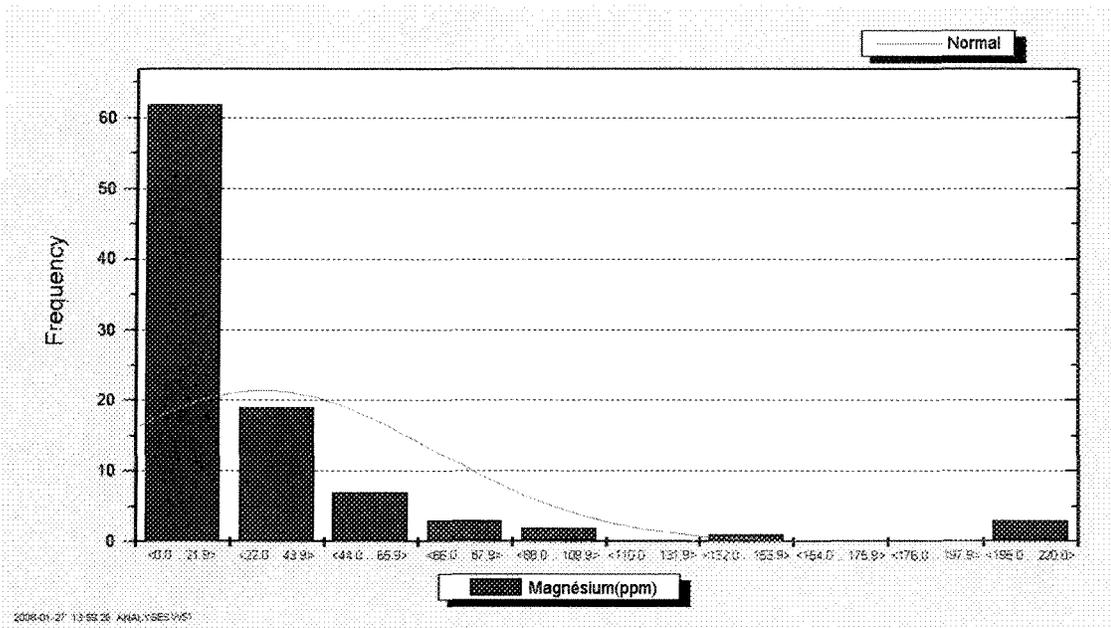


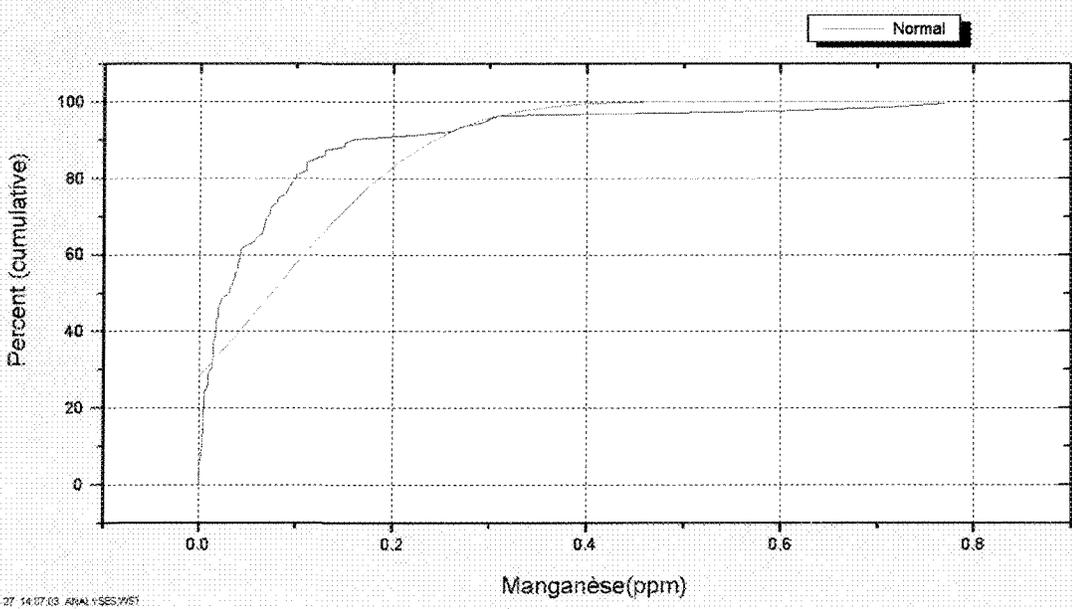
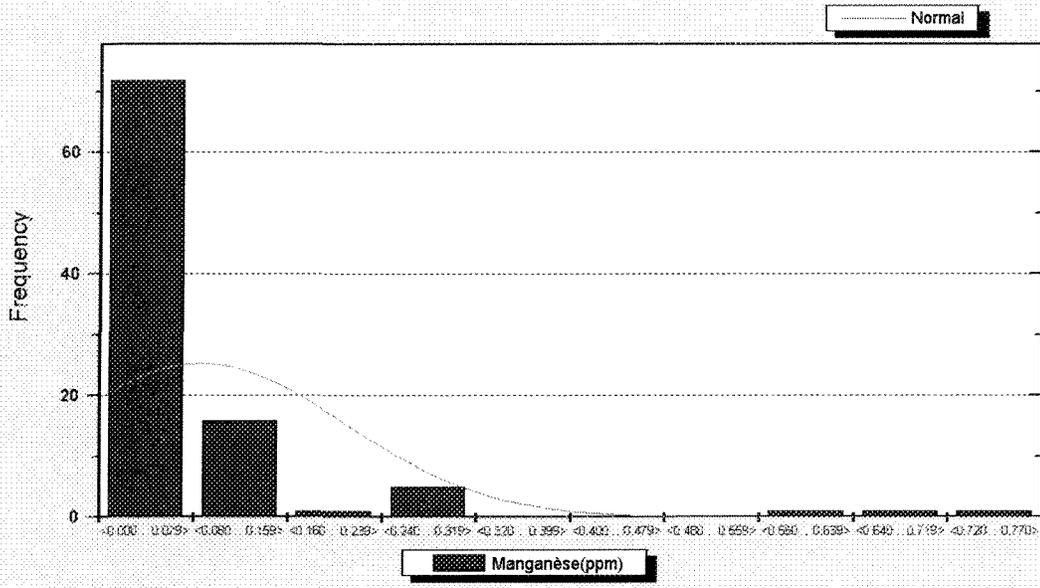


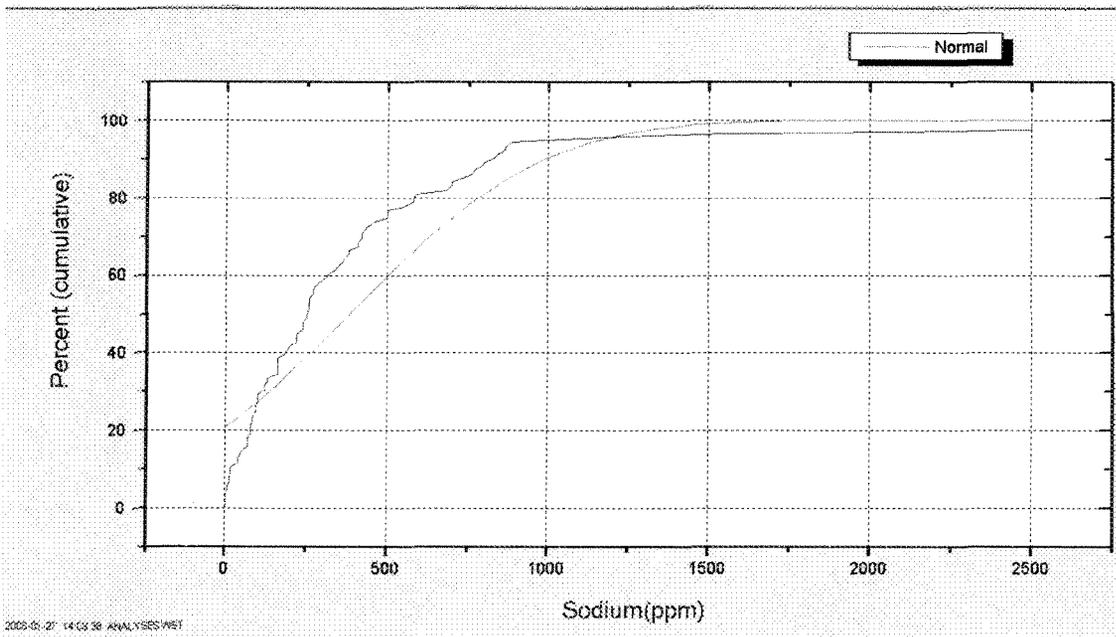
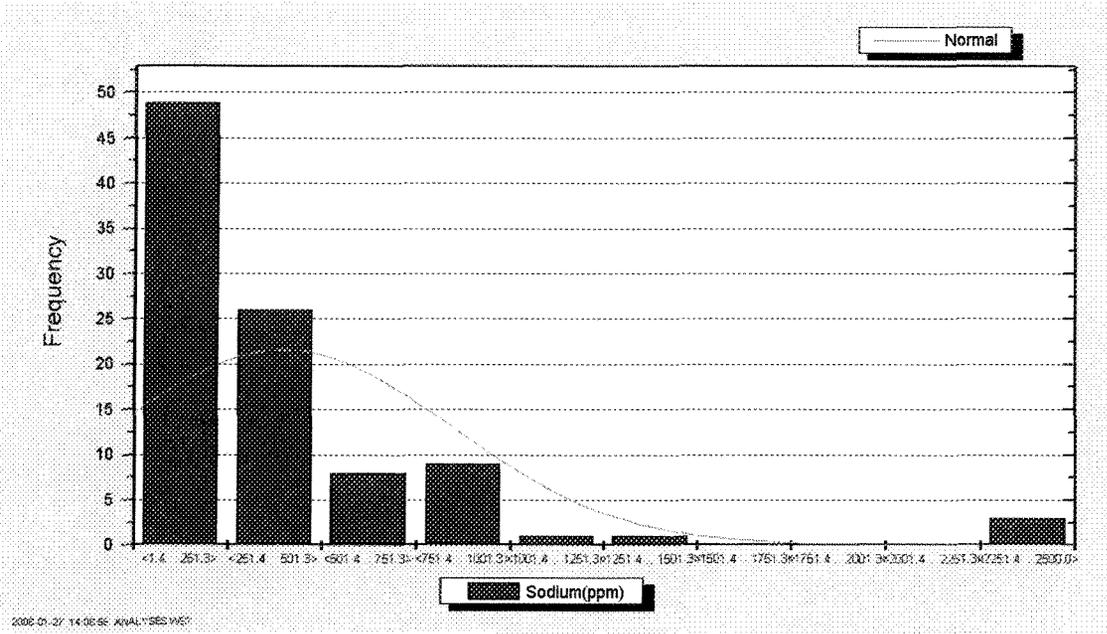


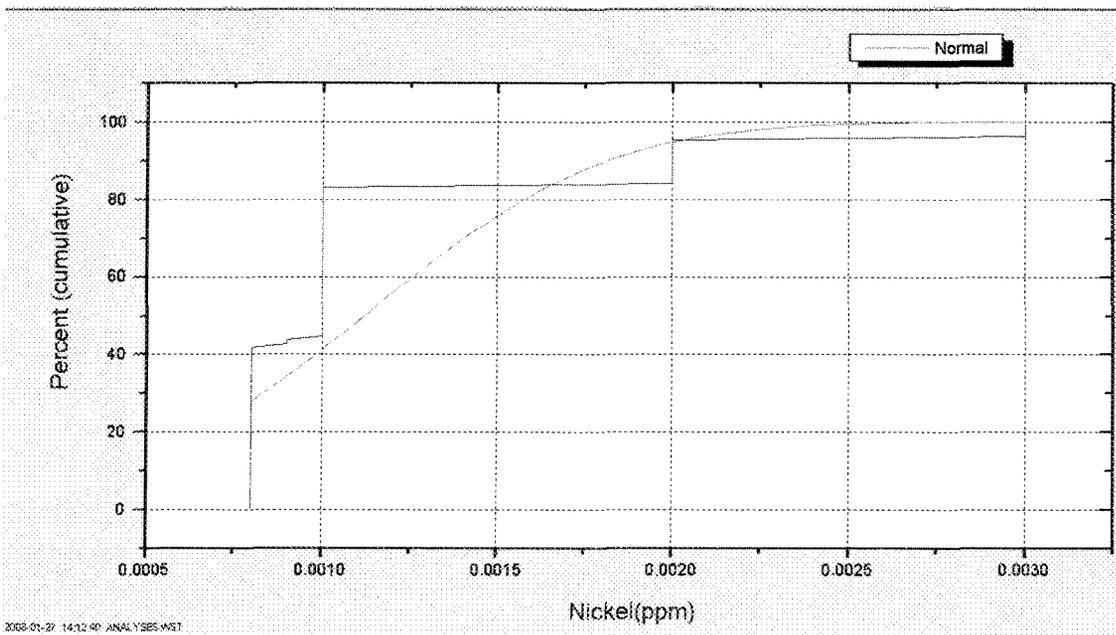
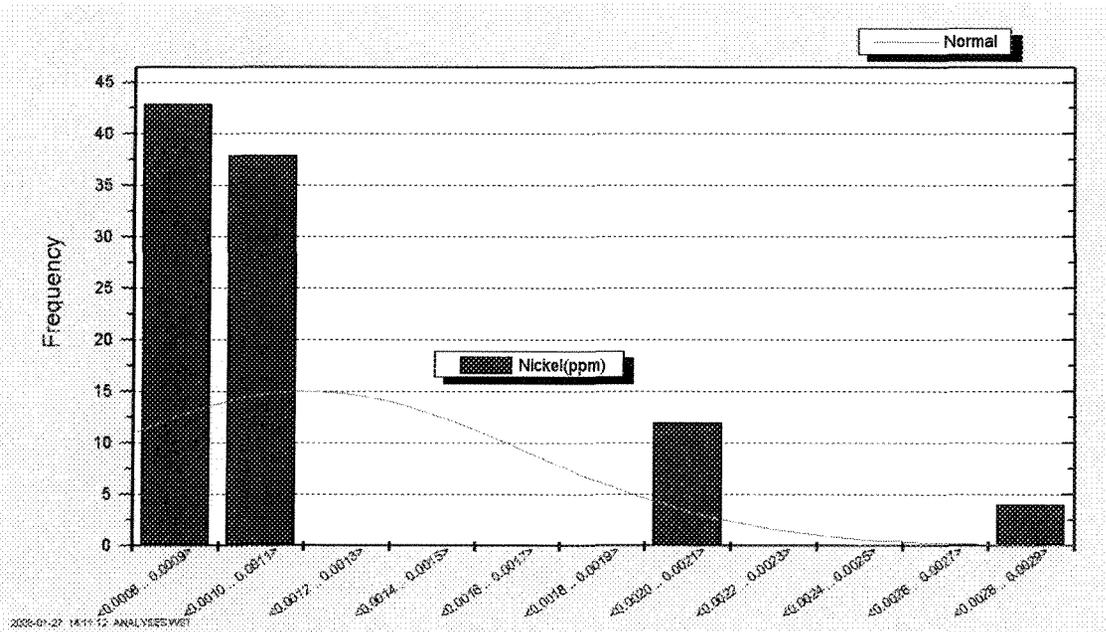


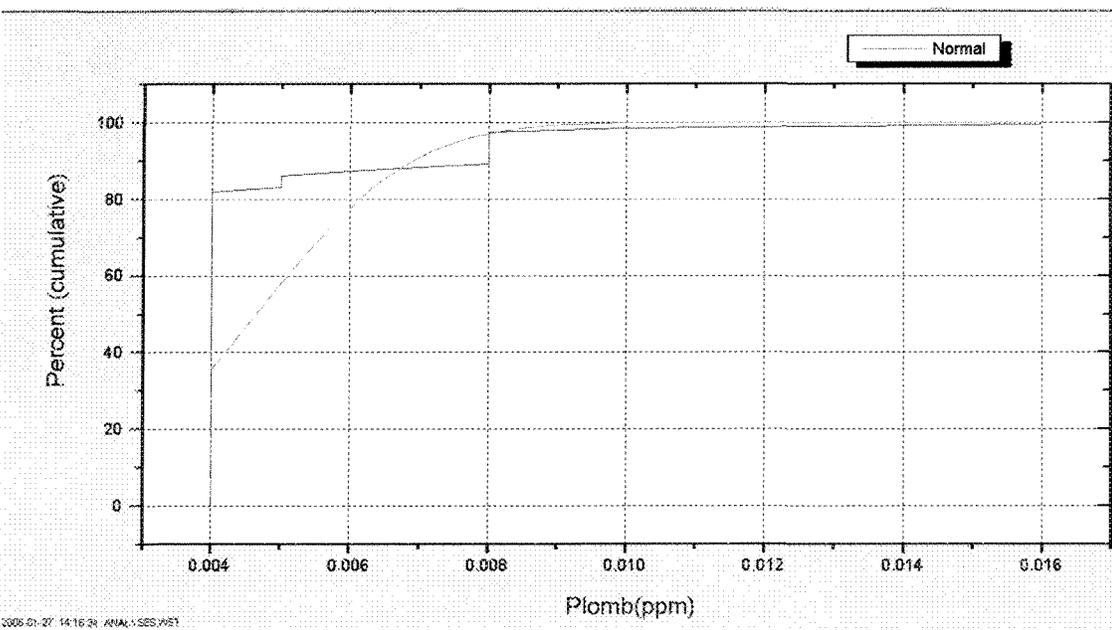
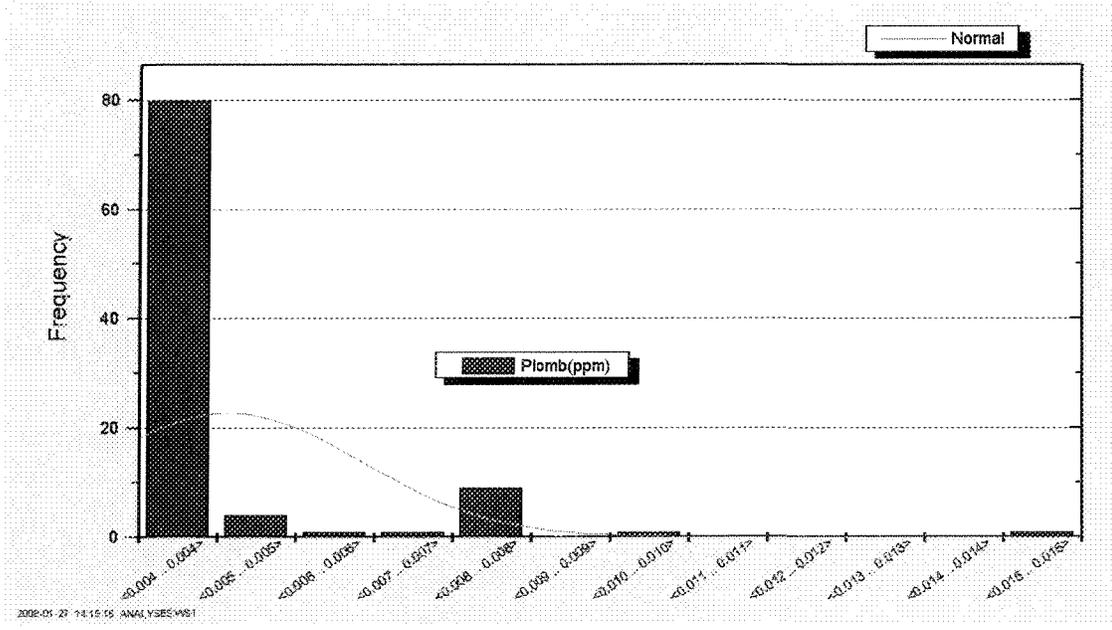


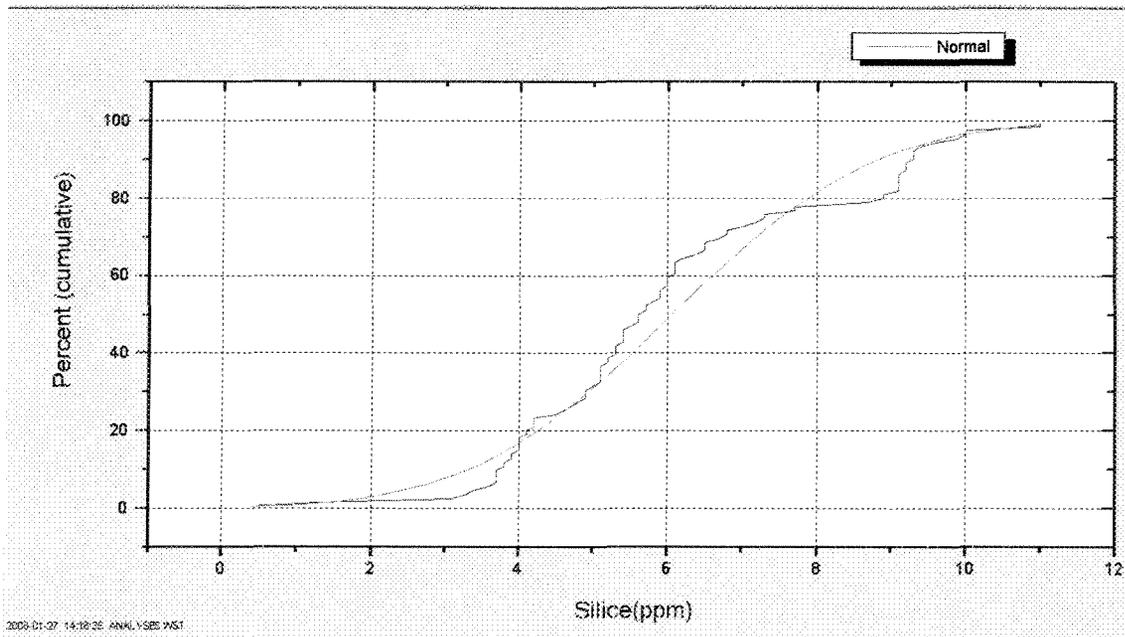
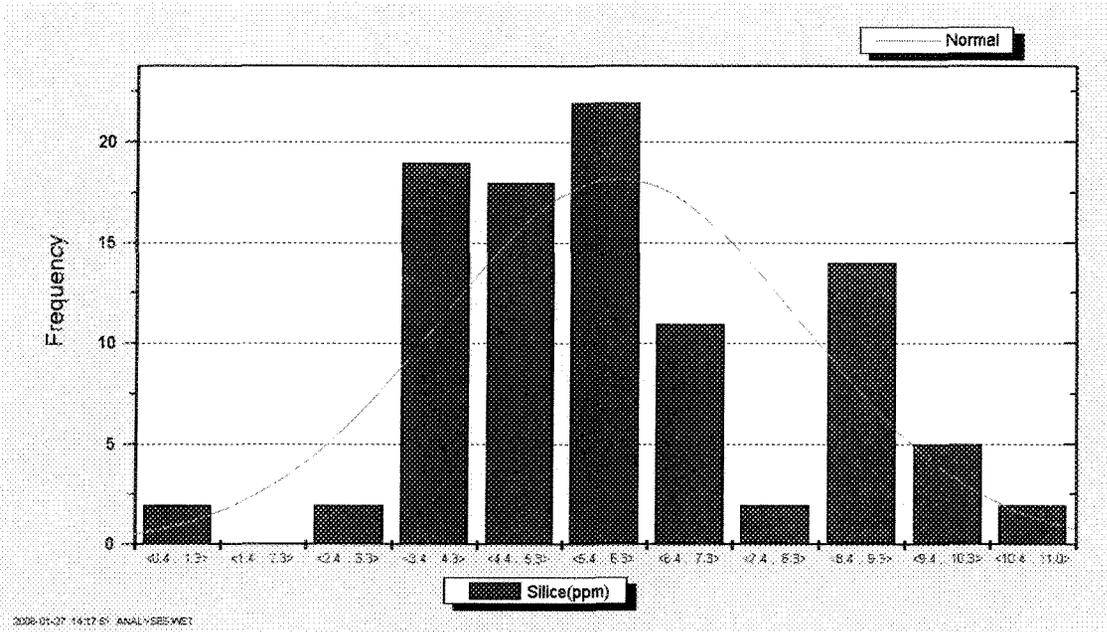


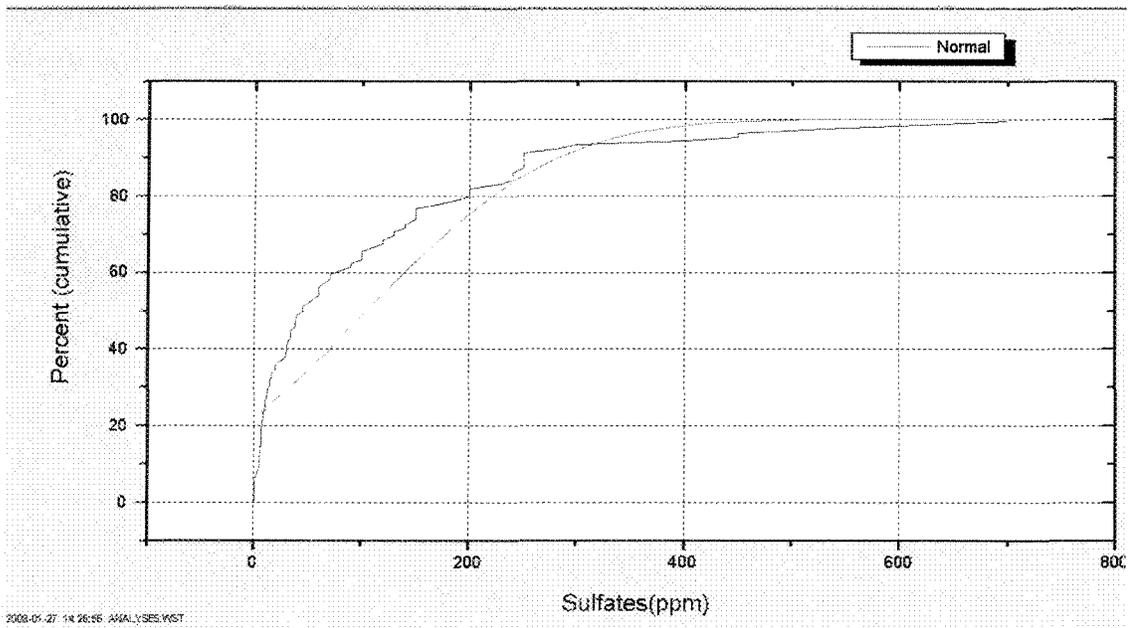
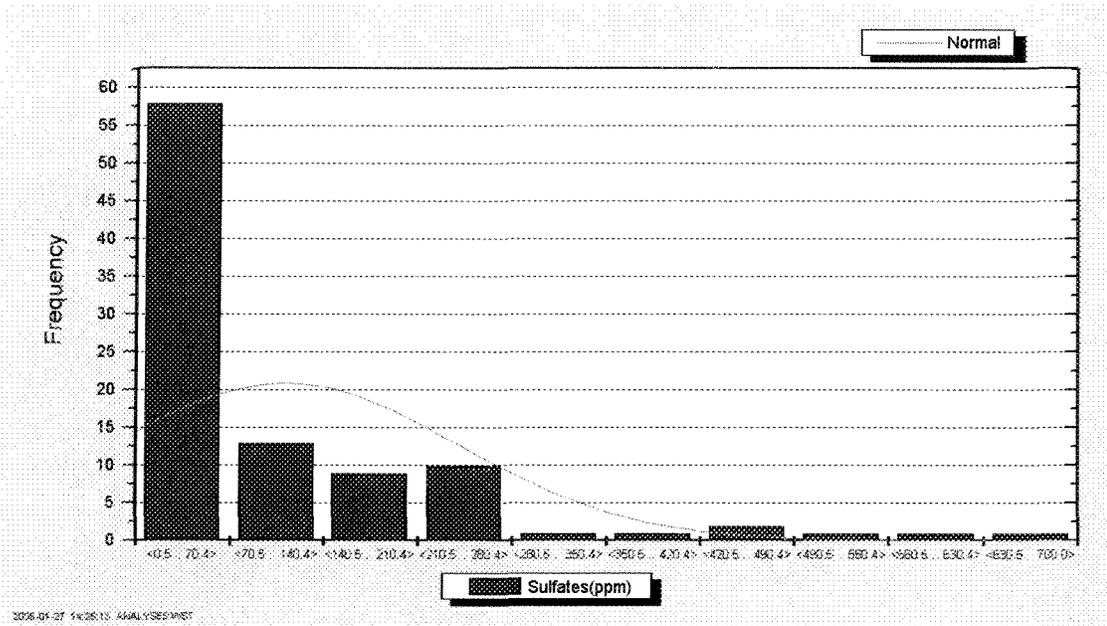


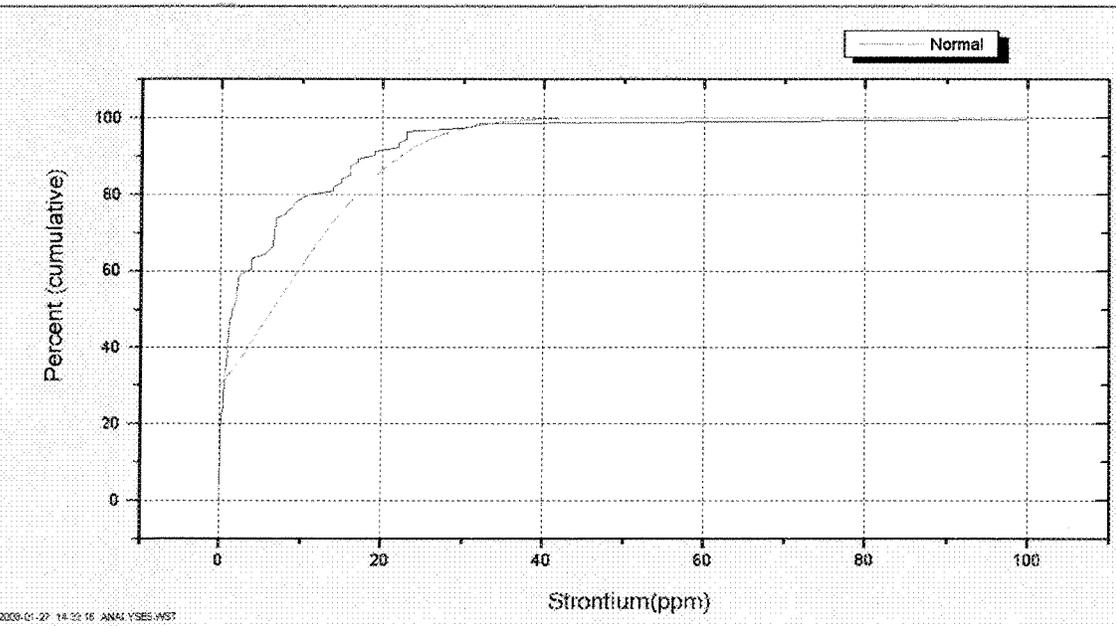
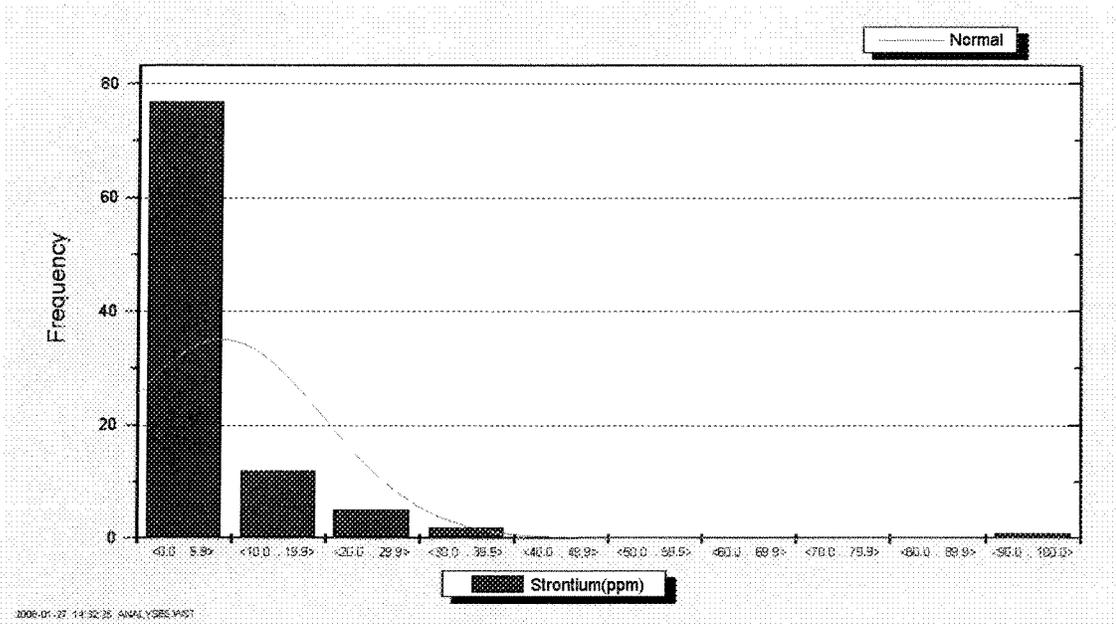


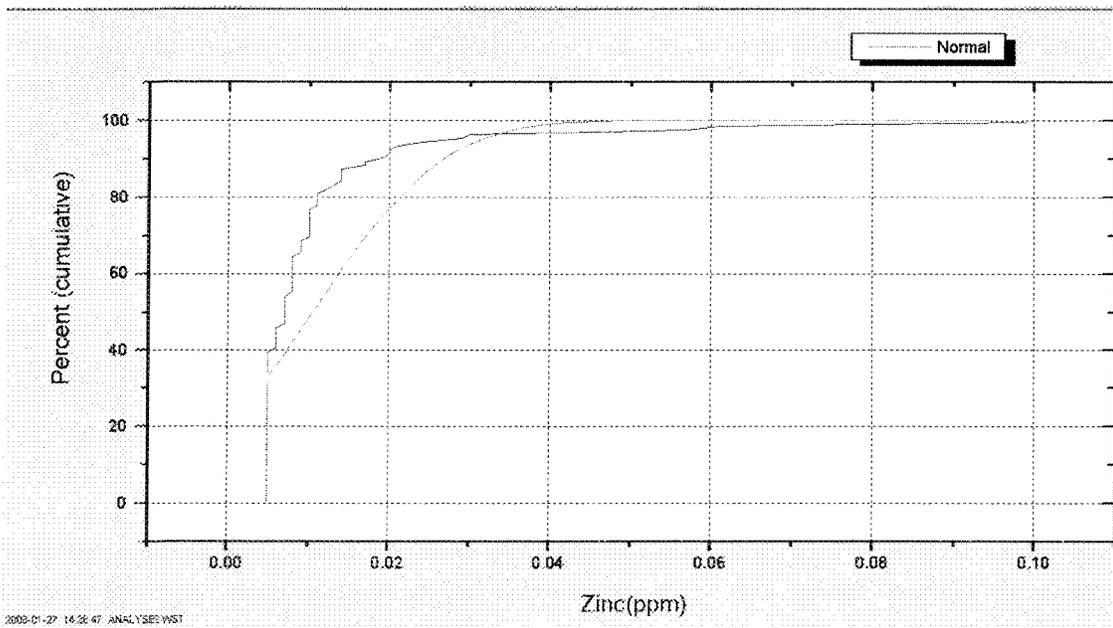
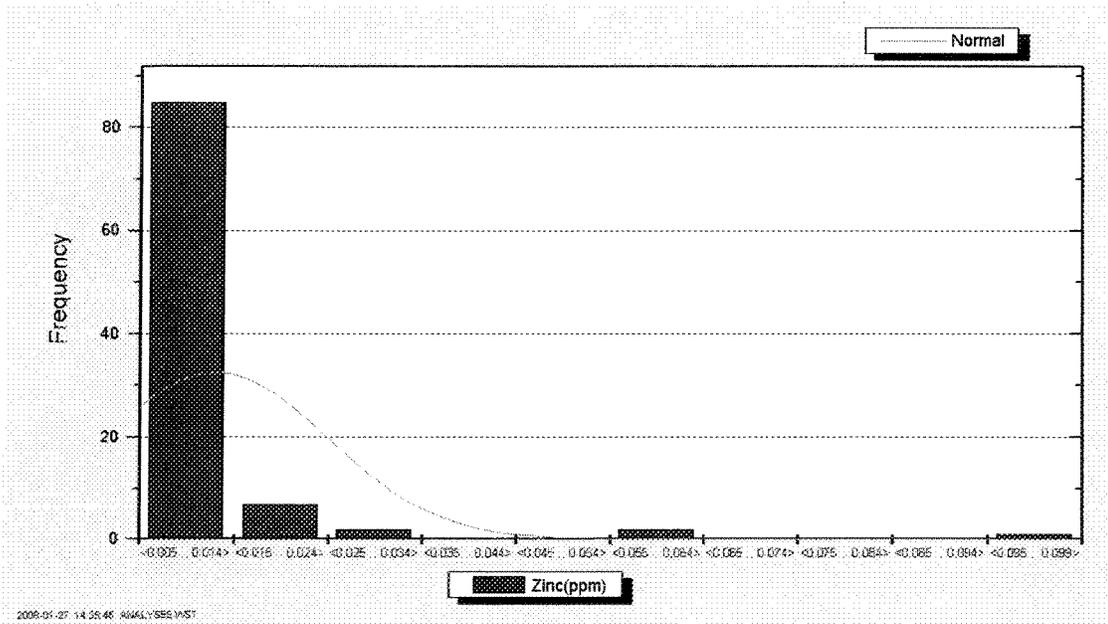


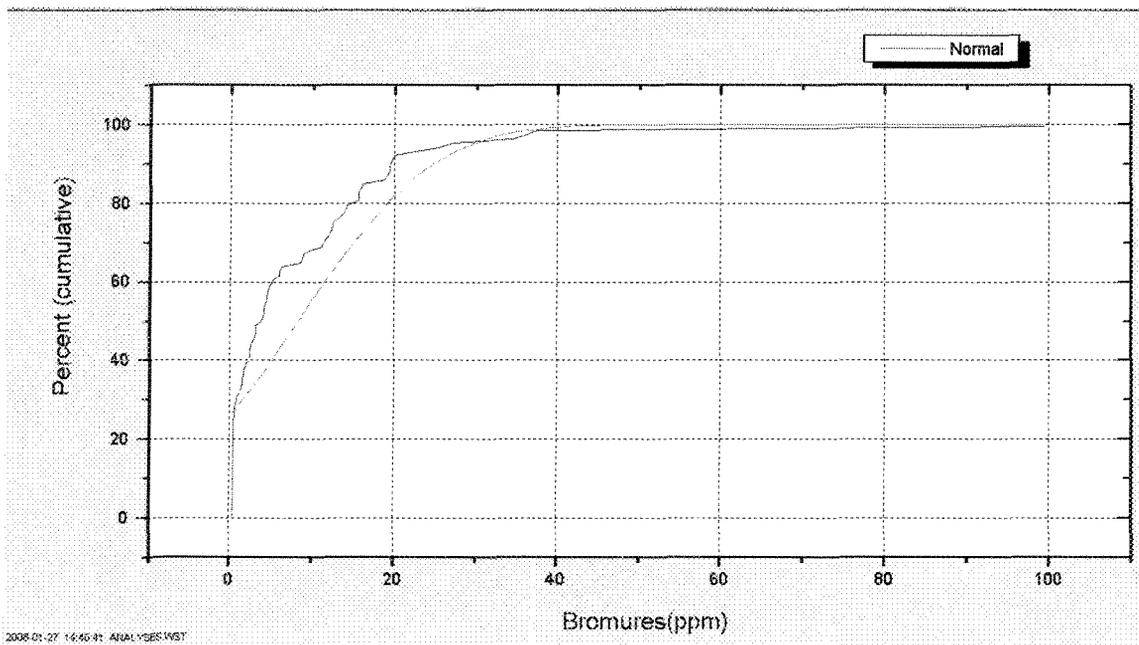
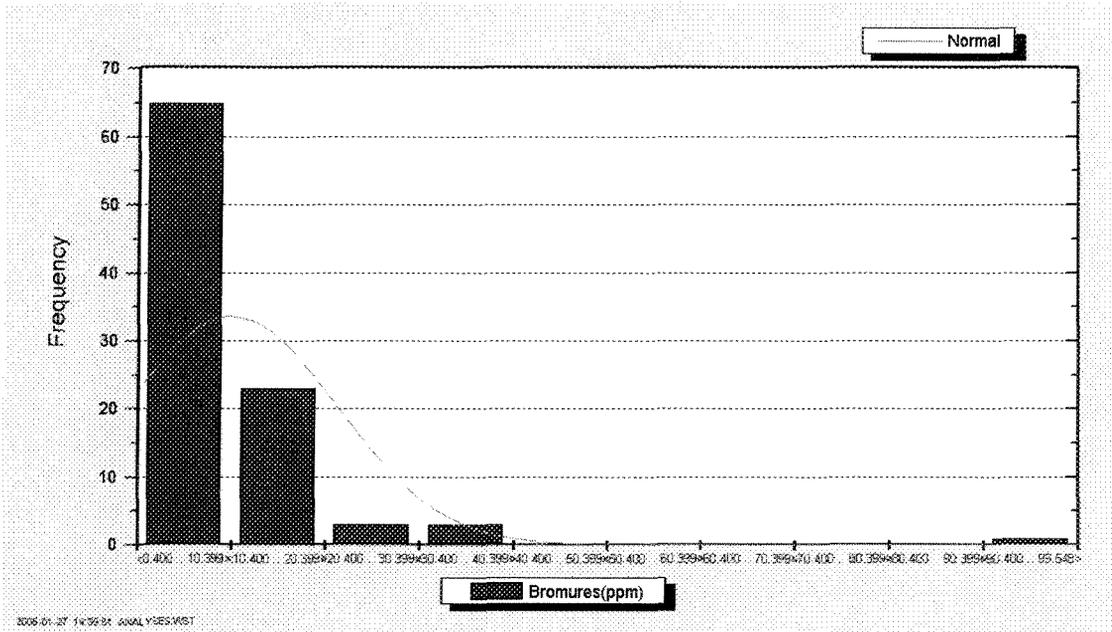


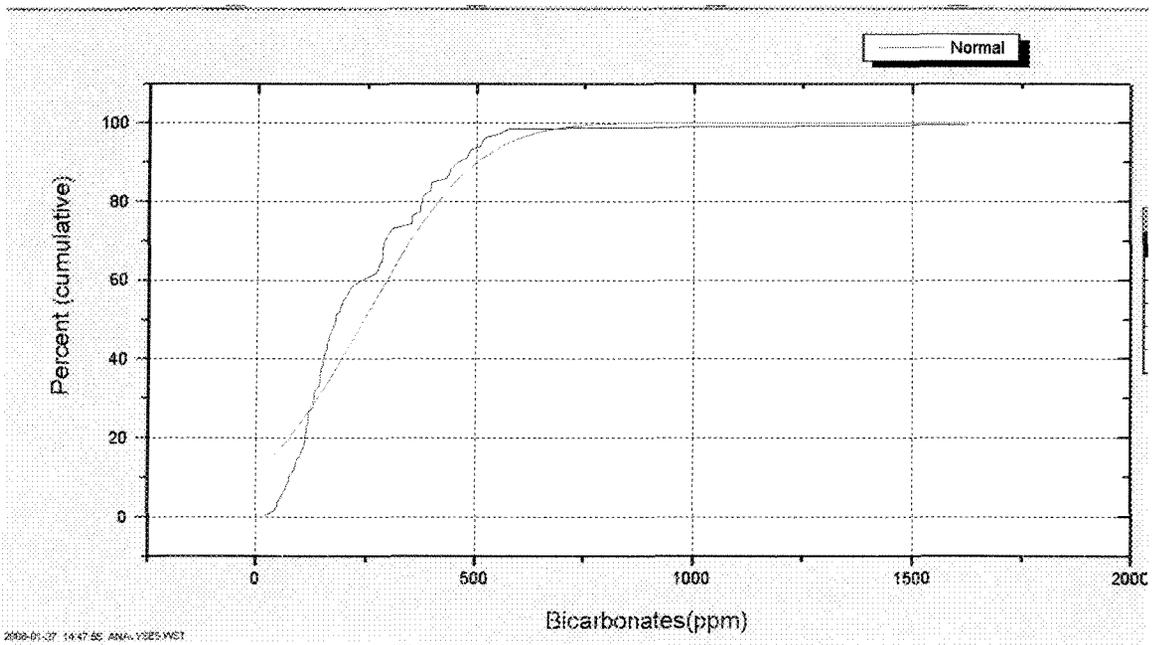
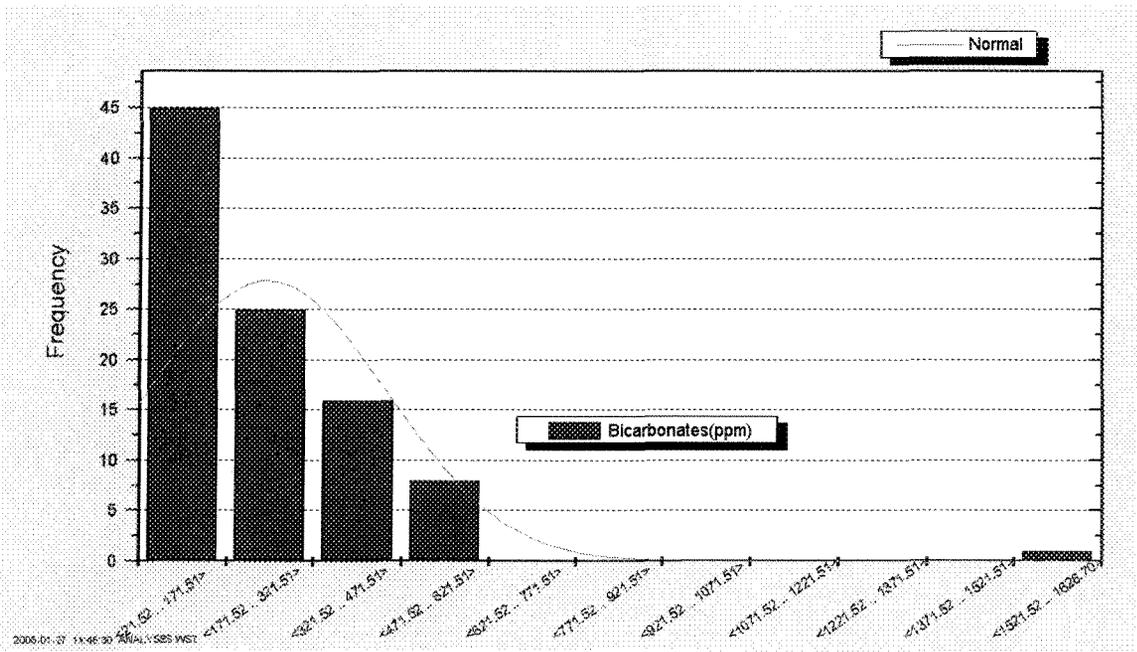


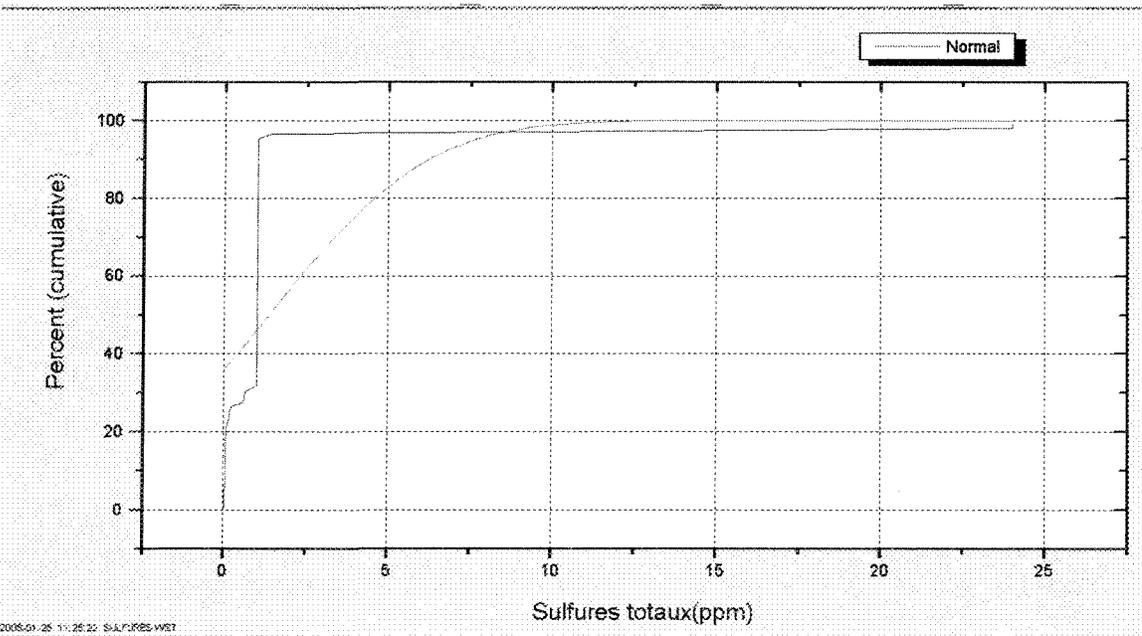
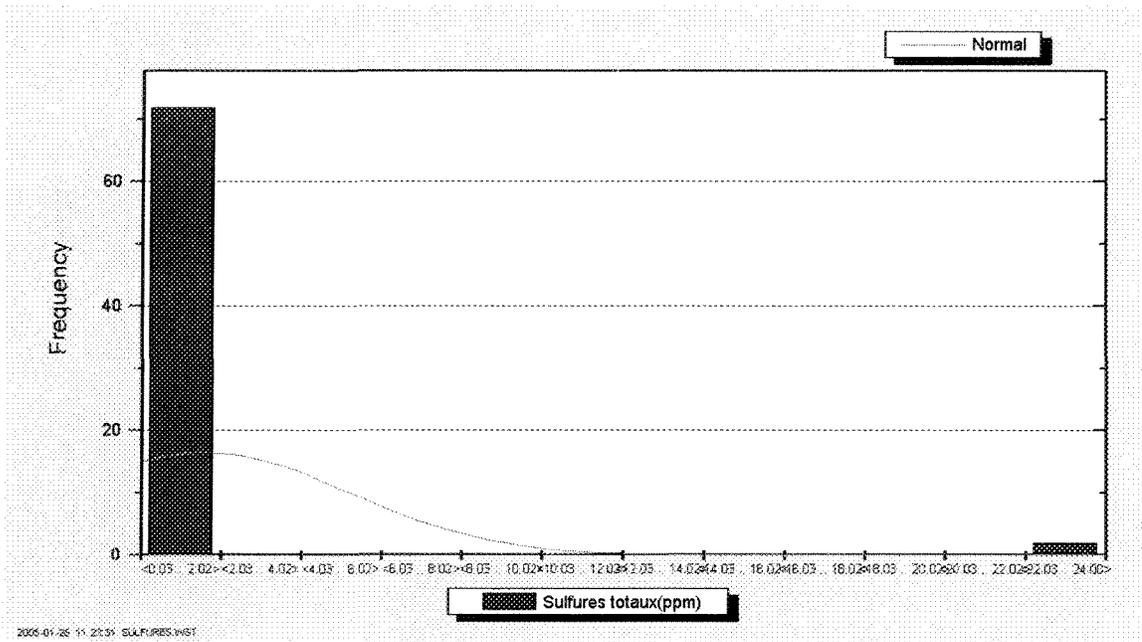










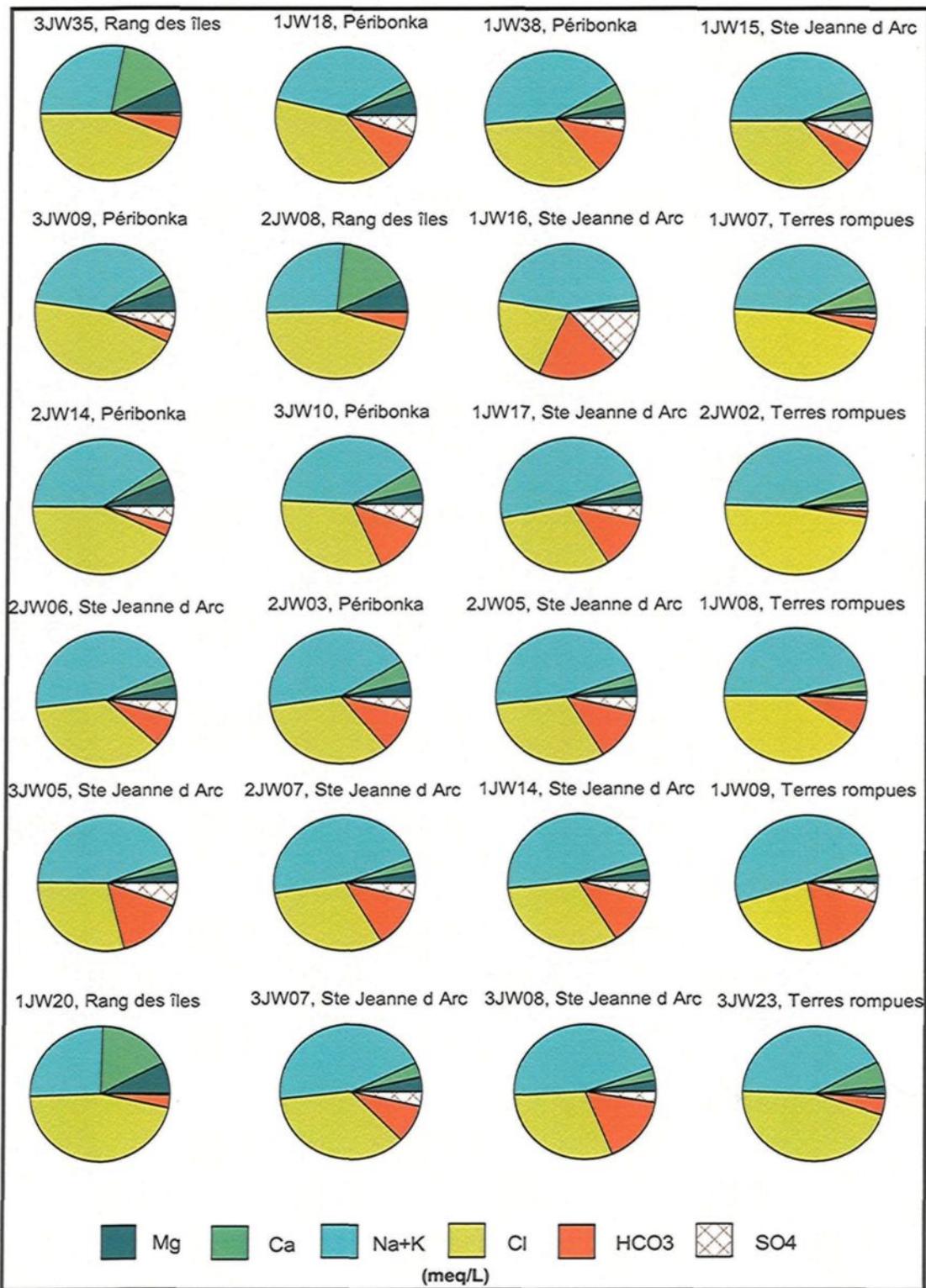


ANNEXE E: Diagrammes en pointe de tarte

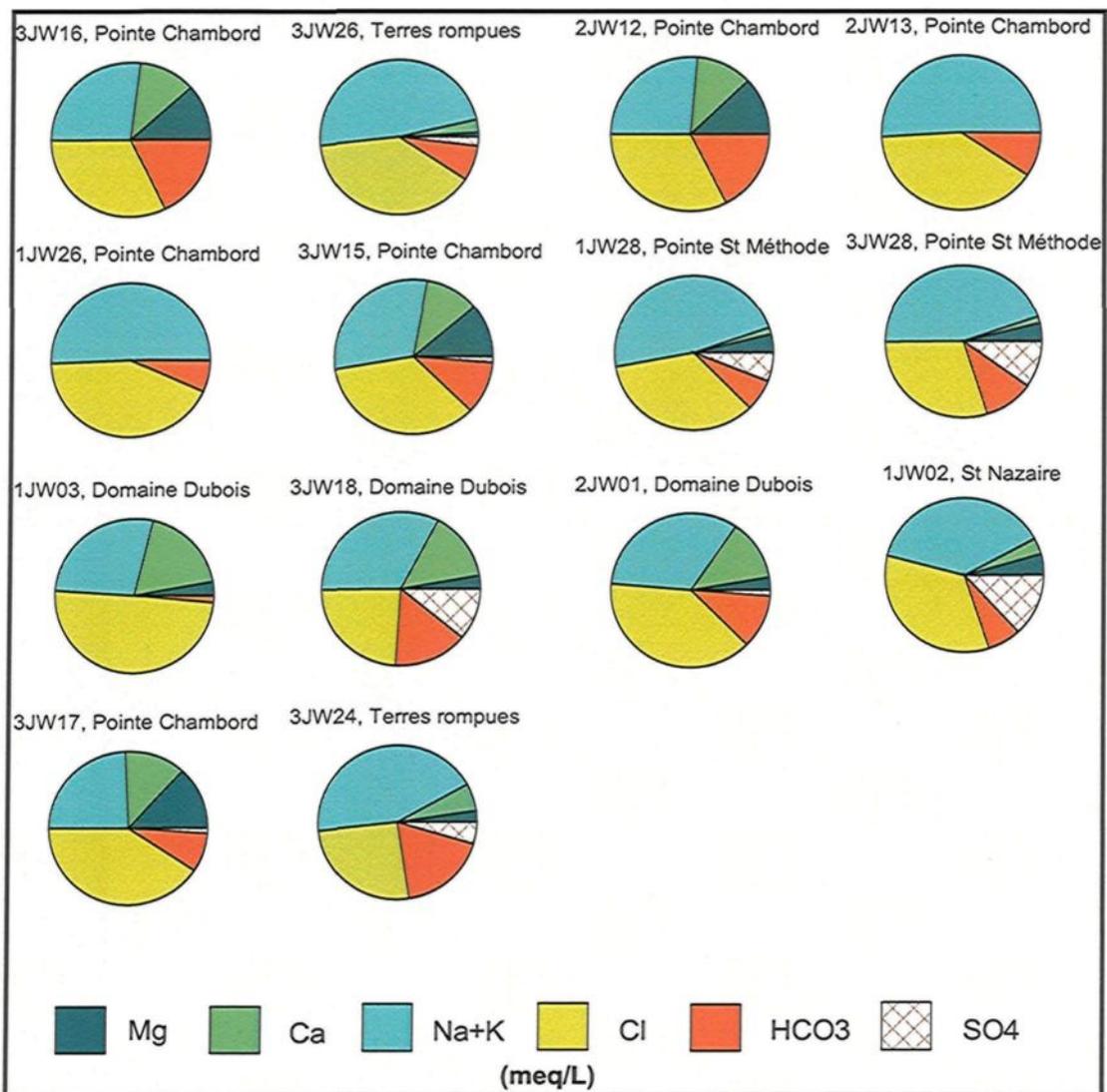
Cette annexe contient les diagrammes en pointes de tarte des 91 échantillons qui ont fait l'objet du chapitre 7. Les diagrammes en pointes de tarte sont présentés par type d'eau. Ce type de graphique permet de représenter l'importance relative des ions majeurs exprimée en meq/l (Mg^{2+} , Ca^{2+} , $Na^{+}+K^{+}$, Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-}).

SOMMAIRE

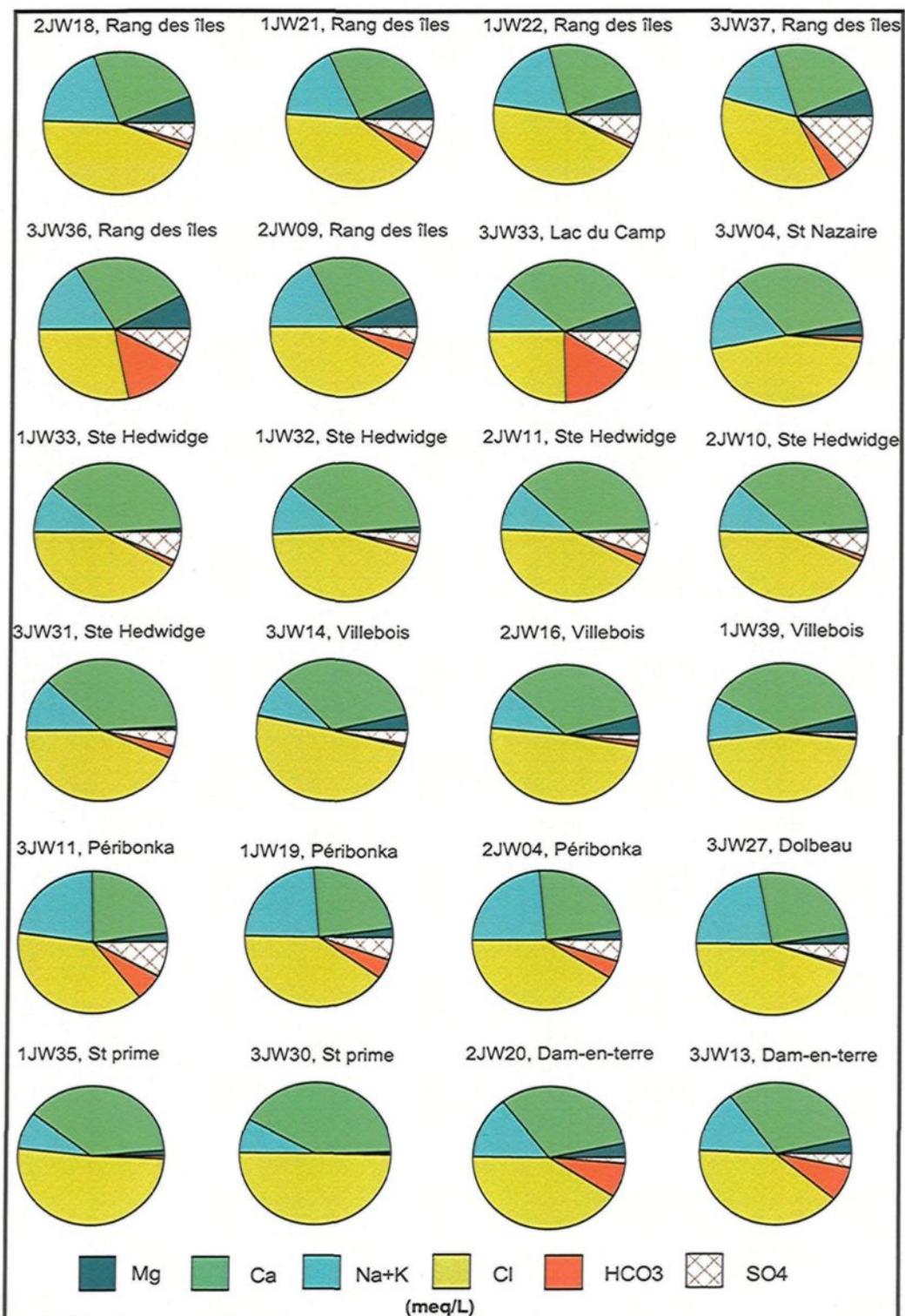
Diagrammes	pages
AD-1 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Na-Cl (1/2)	170
AD-2 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Na-Cl (2/2)	171
AD-3 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Ca-Cl	172
AD-4 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Ca- HCO_3	173
AD-5 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Na- HCO_3	174



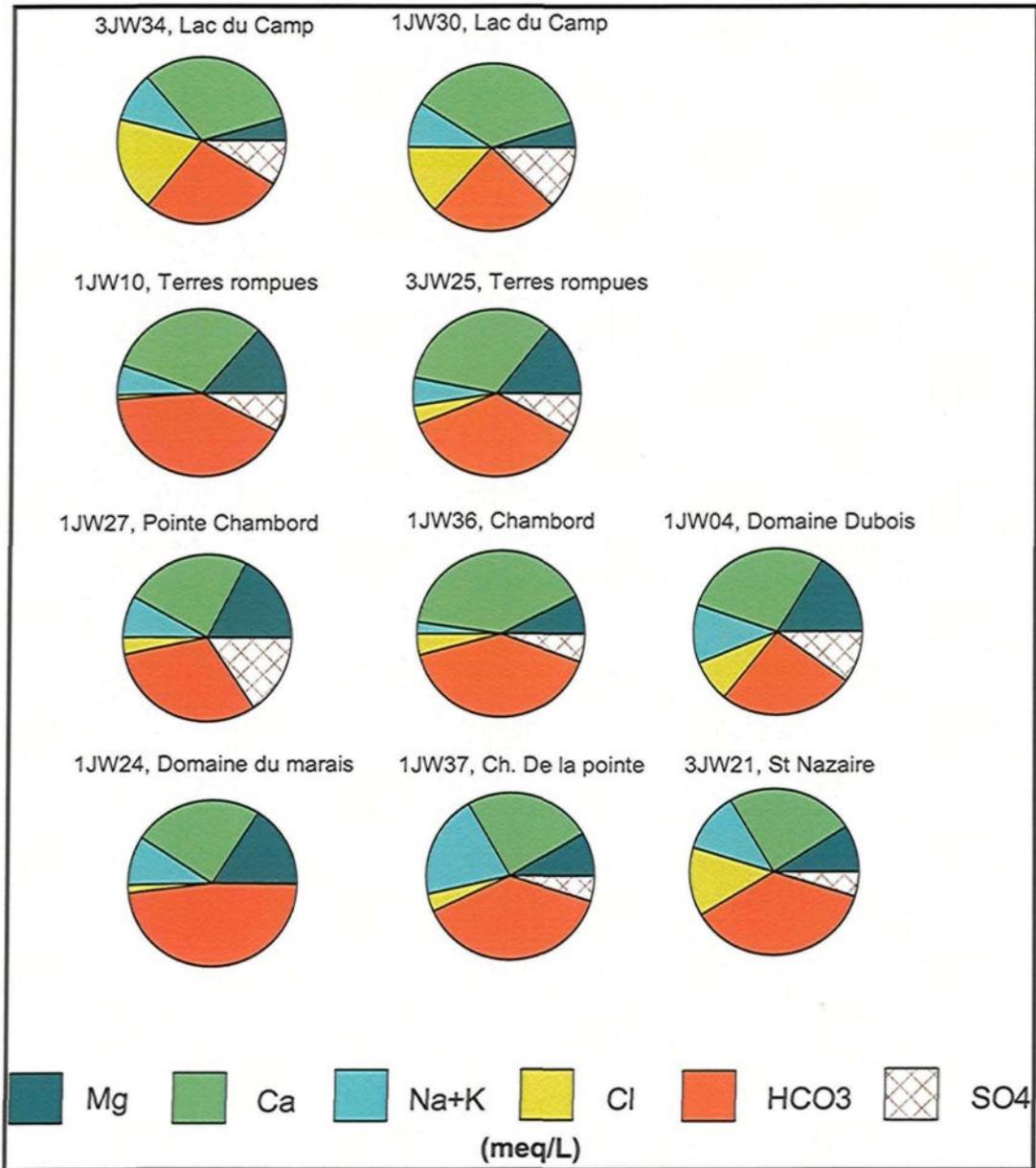
AD-1 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Na-Cl (1/2)



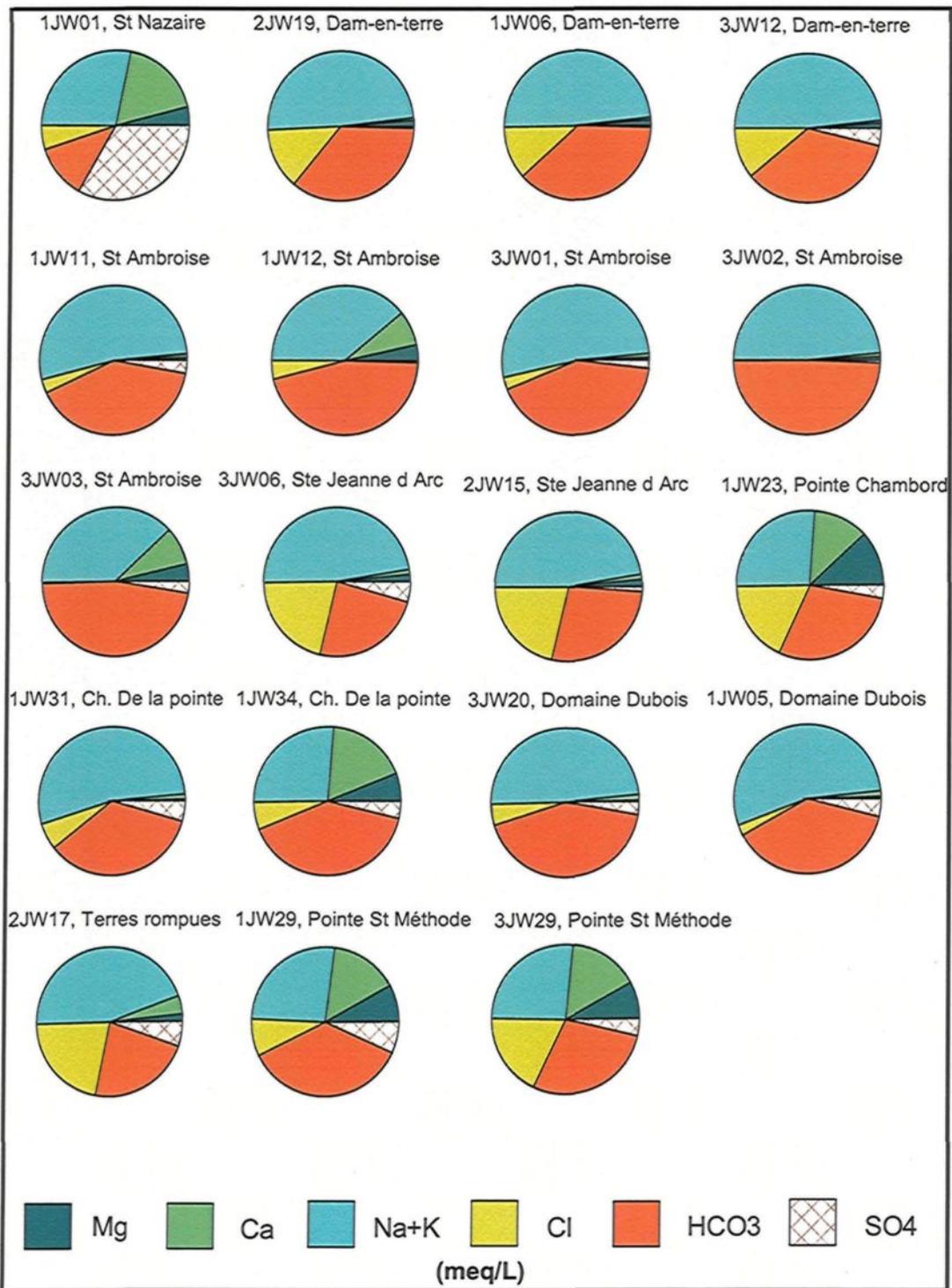
AD-2 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Na-Cl (2/2)



AD-3 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Ca-Cl



AD-4 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Ca-HCO₃



AD-5 : Diagrammes en pointe de tarte des échantillons de type Na-HCO₃

ANNEXE F: Matrice de corrélation

Cette annexe contient la matrice de corrélation (AF-1) des éléments chimiques analysés en laboratoire dans le cadre de cette étude dans les 62 échantillons de type (Ca-Na)-Cl. Le nombre d'échantillons qui a servi au calcul de cette matrice est aussi présenté (AF-2). Le coefficient de corrélation est un nombre sans dimension qui mesure l'intensité de liaison linéaire entre deux variables. La corrélation peut être positive ou négative et la valeur du coefficient varie entre -1 et 1. Ces figures ont été effectuées à l'aide du logiciel *Aquachem v.5.0* de Waterloo Hydrogeologic (2005)

AF-1: Matrice de corrélation des 62 échantillons de type (Ca-Na)-Cl

Paramètres	TDS	Li	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Ni	Al	Ba	Br	Cu	Pb	Sr	Zn	B	Cl	F	SO4	HCO3	Si	H2S
TDS	1	0.12	0.4	0.56	0.74	0.5	0.11	0.48	0.09	0.01	0.01	0.75	0.21	0.26	0.75	0.1	-0.1	0.95	-0.2	0.31	-0.03	0.04	0.32
Li		1	0.32	0.05	0.04	0.23	0.03	0.01	-0.1	-0	0.62	0.22	-0.1	-0.1	0.19	0.17	0.08	0.07	0.06	-0.1	0.13	-0.38	-0.2
K			1	0.83	-0.1	0.79	-0.01	-0.1	0	-0.1	0.08	-0	-0	-0.1	-0.1	0.03	0.05	0.44	0	0.53	0.75	0.51	-0.2
Na				1	-0	0.73	-0.08	-0.1	-0	-0.1	-0.1	0.09	-0.1	-0	-0	-0.1	-0	0.62	0	0.81	0.64	0.47	0.2
Ca					1	0.07	0.19	0.69	0.1	0.09	-0	0.94	0.33	0.37	0.66	0.14	-0.1	0.78	-0.3	0.01	-0.33	-0.26	0.25
Mg						1	-0.01	-0.1	0.11	-0.1	0.2	0.2	0.11	0.18	0.15	0.16	-0	0.67	-0.1	0.66	0.51	0.31	0.04
Fe							1	0.74	-0.1	-0	0.02	0.16	-0.1	0.22	0.17	-0	-0	0.12	-0.2	-0.1	-0.06	-0.23	-0.1
Mn								1	-0	0	-0	0.52	0.18	0.26	0.62	0.07	-0.1	0.48	-0.3	-0.2	-0.25	-0.23	-0.1
Ni									1	-0.1	-0.1	0.06	0.26	0.4	0.06	0.07	-0.1	0.07	0.02	0.08	-0.1	-0.01	-0.2
Al										1	-0.1	0.05	-0	0.19	0.06	0	-0	-0	-0.2	0.09	-0.12	-0.06	0.31
Ba											1	0.07	-0	-0	0.14	0.14	0.02	-0	-0.2	-0.3	-0.03	-0.27	0.99
Br												1	0.29	0.32	0.96	0.14	-0.1	0.8	-0.2	0.09	-0.26	-0.32	0.13
Cu													1	0.56	0.25	0.5	-0.1	0.22	-0.1	0.02	-0.17	-0.05	-0.2
Pb														1	0.3	0.06	-0.1	0.27	-0.2	0.09	-0.26	-0.22	0.26
Sr															1	0.17	-0.1	0.78	-0.2	0.02	-0.29	-0.31	0.32
Zn																1	-0	0.08	-0	0.12	-0.04	-0.05	-0.1
B																	1	-0.1	0.25	-0.1	0.06	0.03	-0.1
Cl																		1	-0.2	0.4	0.13	0.07	0.4
F																			1	-0	0.04	-0.03	-0.4
SO4																				1	0.47	0.46	-0.2
HCO3																					1	0.61	-0.3
Si																						1	0.12
H2S																							1

Paramètres	TDS	Li	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Ni	Al	Ba	Br	Cu	Pb	Sr	Zn	B	Cl	F	SO4	HCO3	Si	H2S	
TDS	62			62	62	62	58	60	62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16	
Li		62		62	62	62	62	60	62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
K			62	62	62	62	62	60	62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Na				62	62	62	62	60	62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Ca					62	62	62	60	62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Mg						62	62	60	62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Fe							62	58	62	62	56	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	15
Mn								62	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	14
Ni									62	62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Al										62	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Ba											62	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	14
Br												62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Cu													62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Pb														62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Sr															62	62	62	62	62	62	62	62	62	16
Zn																62	62	62	62	62	62	62	62	16
B																	62	62	62	62	62	62	62	16
Cl																		62	62	62	62	62	62	16
F																			62	62	62	62	62	16
SO4																				62	62	62	62	16
HCO3																					62	62	62	16
Si																						62	62	16
H2S																							62	16

AF-2: Nombre de paramètres utilisés dans les calculs du coefficient de corrélation présentés dans la matrice de corrélation