

# **CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY, QUÉBEC, CANADA.**

Par

Daniel Blanchette

Mémoire présenté

Pour l'obtention

Du grade de Maître ès science (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe

Steve Grasby, Ph.D.  
CGC-Division Calgary

Examineur interne

Normand Tassé, Ph.D.  
INRS-Eau, centre ETE

Codirecteur de recherche

Miroslav Nastev, Ph.D.  
CGC-Division Québec

Directeur de recherche

René Lefebvre, Ph.D.  
INRS-Eau, centre ETE

**Septembre 2006**

## RÉSUMÉ

La géochimie des eaux souterraines a été caractérisée dans la portion québécoise du bassin versant de la rivière Châteauguay. Les objectifs des travaux étaient de définir la composition chimique des eaux souterraines pour qualifier la qualité des eaux et identifier les processus et conditions géologiques et hydrogéologiques qui contrôlent la géochimie des eaux souterraines. Durant l'été 2004, 144 échantillons d'eau souterraine et 22 échantillons multi-niveaux distribués sur l'ensemble du territoire ont été prélevés dans des puits privés, municipaux et scolaires, puits d'observation et une source. Les échantillons d'eau ont été analysés pour les éléments majeurs, mineurs et traces, le contenu bactériologique ainsi que les isotopes stables ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) et radioactifs ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ). Les concentrations des espèces ioniques en solution ont été calculées lors de la spéciation par modèle d'équilibre hydrochimique.

Les éléments majeurs Ca, Mg, Na, K, Cl,  $\text{SO}_4$  et les anions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  représentent généralement plus de 92% de la charge dissoute. Ce sont les contextes hydrogéologiques qui démontrent un plus grand contrôle sur leurs concentrations. La dureté, la matière dissoute totale (MDT), le fer et le manganèse constituent les problèmes de qualité d'eau les plus répandus pour les utilisations de l'eau souterraine à des fins d'eau potable et d'irrigation des cultures. Les datations de l'eau souterraine par le tritium ( $^3\text{H}$ ) et le  $^{14}\text{C}$  indiquent que les eaux de recharge de l'eau souterraine sont récentes et que des eaux d'âges variables sont présentes dans le système d'écoulement souterrain. La définition des types d'eau sur la base des ions majeurs a démontré que la composition chimique des eaux souterraines est très variable et que le type Ca- $\text{HCO}_3$  est le plus abondant. Il est présent dans tous les contextes géologiques et hydrogéologiques. La variation des types d'eau pour les échantillons multi-niveaux montre que la composition chimique varie faiblement avec la profondeur pour l'épaisseur de roc investiguée (généralement moins de 123 m).

La classification des échantillons en 5 groupes de types d'eau et en 6 *clusters* (classification hiérarchique regroupée) ont permis de définir les tendances générales de la variabilité spatiale de la géochimie de l'eau souterraine dans la région. L'utilisation de l'analyse en composante principale a permis d'identifier les processus géochimiques majeurs qui contrôlent ~80% de la variabilité de la composition de l'eau souterraine,

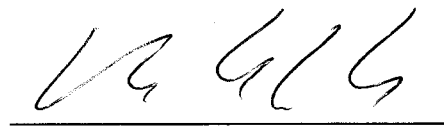
soient: 1) le mélange d'eau fraîche avec des eaux plus salines ayant la signature de la mer de Champlain; 2) possiblement la dissolution de halite; 3) la dissolution de la dolomite, du gypse et de minéraux riches en Fe-Mn et F-Sr. L'échange ionique semble aussi jouer un rôle de premier plan, d'après les tendances des concentrations en sodium et calcium dans les eaux souterraines. Deux sections géochimiques permettent d'illustrer plus spécifiquement la variabilité de la composition des ions majeurs des eaux souterraines à l'intérieur d'un cadre d'évolution géochimique général. Les zones de recharge locale de l'eau souterraine apparaissent comme des éléments importants affectant la géochimie des eaux souterraines. Des conditions engendrant un écoulement limité permettent de préserver la signature géochimique d'anciennes eaux provenant de la Mer Champlain, qui n'ont pas été complètement lessivées.

Les processus géochimiques identifiés de même que la distribution spatiale des variations de la géochimie de l'eau souterraine ont permis de définir un modèle conceptuel qui intègre la compréhension générale de l'évolution de la géochimie des eaux souterraines dans la région d'étude. Les types d'eau Ca-HCO<sub>3</sub> et Na-Cl sont les pôles représentant respectivement les eaux de recharge récente et des eaux anciennes gardant la signature géochimique de la Mer de Champlain. Entre ces pôles, les processus de dissolution des carbonates, d'échange ionique, de mélange d'eau et possiblement de dissolution d'halite contrôlent l'évolution de l'eau souterraine.

La différence entre les conditions dominantes de l'écoulement de l'eau souterraine semble à l'origine de la distinction entre les types d'eau et les modèles géochimiques conceptuels représentatifs des systèmes aquifères du bassin versant de la rivière Châteauguay et des Basses-Laurentides. Cette constatation permet de souligner l'importance prépondérante du contexte d'écoulement sur le contrôle de la géochimie des eaux souterraines pour deux régions qui ont été soumises à un historique géologique semblable, possèdent des aquifères du même type et où des processus géochimiques très similaires sont en cause.



Daniel Blanchette



René Lefebvre

## ABSTRACT

Groundwater geochemistry was studied in the Québec portion of the Châteauguay River watershed. The objective was to characterize groundwater chemical composition, to determine the groundwater quality and to explain its variations due to the geochemical and physical processes and to the control exerted by the geological and hydrogeological contexts. During the 2004 field campaign, 144 groundwater samples and 22 multilevel samples were collected from private wells, municipal and school wells, monitoring wells and one spring aerially distributed in the study area. Samples were analysed for major, minor and trace elements, bacterial content, stable ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) and radioactive isotopes ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ). Concentrations of ionic species were calculated during the speciation using a hydrochemical equilibrium model.

Majors elements Ca, Mg, Na, K, Cl,  $\text{SO}_4$  and anions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  represent for more than 92% of the total dissolved solids and their concentrations are mostly controlled by the hydrogeological contexts. Hardness, total dissolved solids (TDS), Fe and Mn content are the most extensive quality problems for drinking and irrigation uses. Analysis of tritium ( $^3\text{H}$ ) and  $^{14}\text{C}$  indicate recent groundwater recharge and also the presence of groundwater of variable ages in the aquifer flow system. Groundwater types based on major ions concentrations show a wide range of composition where the Ca- $\text{HCO}_3$  type is the most prevalent and occurs in most geological or hydrogeological contexts. Multilevel samples show a weak depth effect on the chemical composition for the studied rock thickness (usually less than 123 m).

Groundwater samples classification in 5 water type groups and 6 clusters (Hierarchic Cluster Analysis) indicated general tendencies in the spatial variation of groundwater geochemistry over the study area. Principal Component Analysis was related to geochemical processes that explained ~80% of the chemical variation with: 1) mixing between fresh water with more saline former Champlain Sea water; 2) possible halite dissolution; 3) dolomite and gypsum dissolution and dissolution of Fe-Mn and F-Sr bearing minerals. According to calcium and sodium concentration trends in groundwater, ion exchange seems also to play an important role. Two geochemical cross sections present more specifically the variation of major ion concentrations in groundwater within a general geochemical evolution framework. Local groundwater recharge areas seem to be important elements that affect groundwater geochemistry. Conditions that generate

low flow zones contribute to the preservation of groundwater maintaining the geochemical signature of the former Champlain Sea water that was not completely flushed out.

Geochemical processes and spatial distribution of groundwater geochemical composition support a conceptual model integrating the general understanding of the geochemistry evolution of the groundwater in the study area. Ca-HCO<sub>3</sub> and Na-Cl water types are the two end members that represent recent and older water maintaining the Champlain Sea water signature. Between these end members, carbonates dissolution, ion exchange, water mixing and possibly halite dissolution are the processes controlling the geochemical evolution of groundwater.

Differences between dominant groundwater flow conditions seem to explain the distinction between water types and geochemical conceptual models related to the aquifer systems of the Châteauguay River watershed and the Basses-Laurentides. This indicates the preponderant importance of groundwater flow conditions on the groundwater geochemistry of two areas that were submitted to a similar geological history, have similar aquifer types and are subjected to similar geochemical processes.

## REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur et mon co-directeur, René Lefebvre et Miroslav Nastev, pour la confiance qu'ils m'ont prodigué pour la réussite de ce projet. Leur présence, leurs conseils et leur support ont été et seront indispensables pour l'avancement et la réussite de ma maîtrise ainsi que pour ma future carrière en tant que professionnel.

Charles Lamontagne et Nadine Roy du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) méritent toute ma gratitude pour leur contribution à l'avancement et à l'aboutissement de ce projet. Sans leur aide et leur présence, le produit qui est livré aujourd'hui serait incomplet. Je remercie le MDDEP pour s'être acquitté de la facture passablement salée qu'a engendrée ce projet et mon épicerie. Merci à l'INRS-ETE et la Commission Géologique du Canada pour une partie du support monétaire, technique et moral. Je salue chaleureusement les gens du Laboratoire de la qualité du milieu et du Laboratoire des pollutions industrielles du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, du Delta-Lab de la CGC-Division Québec, du Environmental Isotope Laboratory de l'Université de Waterloo et du Isotrace Laboratory de l'Université de Toronto pour leur participation, et sans qui j'aurais du faire les analyses chimiques moi-même.

Je remercie Vincent Cloutier, Marc-André Lavigne, Anne Croteau, Tommy Tremblay, Denis Lavoie, Nicolas Benoît, Réjean Godin, Marie-Pierre Dagenais, Roger Morin, Raymond Perron, Joanie Vachon, Julien Walter, Michel Parent, Andrée Bolduc, Serge Paradis, Martine Savard, Marc Luzincourt, Christine Deblonde, Ruth Boivin, Harold Vigneault, Daniel Paradis, Danielle Thomassin, Gilles Labbé et Suzanne Dusseault. Tous ces gens, au cours des deux dernières années et demie ont pris au moins une minute pour m'aider ou pour répondre à une de mes nombreuses questions.

Merci à la population et aux autorités de la région du bassin versant de la rivière Châteauguay pour leur collaboration sans oublier M. Normand Tassé et M. Steve Grasby, pour avoir accepté d'être les examinateurs interne et externe de ce mémoire.

Merci à tous.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 PROBLÉMATIQUE .....	1
1.2 RÉGION D'ÉTUDE .....	3
1.2.1 Contexte général .....	3
1.2.2 Contextes géologiques .....	5
1.2.3 Contextes hydrogéologiques .....	9
1.3 OBJECTIFS .....	12
1.4 MÉTHODOLOGIE .....	12
1.4.1 Compilation des données existantes .....	12
1.4.2 Échantillonnage .....	13
1.4.3 Traitement, analyse des données et présentation des résultats.....	16
1.5 ACCÈS AUX DONNÉES DU PROJET .....	18
1.6 LIENS AVEC LES AUTRES PROJETS DE MAÎTRISE .....	20
1.7 STRUCTURE DU MÉMOIRE .....	21
<b>CHAPITRE 2 ARTICLE SUR LA CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE</b> .....	<b>23</b>
<b>HYDROCHEMICAL ASSESSMENT OF GROUNDWATER IN THE CHÂTEAUGUAY RIVER WATERSHED, QUÉBEC, CANADA</b> .....	<b>23</b>
2.1 INTRODUCTION .....	27
2.2 STUDY AREA.....	28
2.3 METHODOLOGY .....	30
2.4 CHEMICAL RESULTS AND GROUNDWATER QUALITY .....	32
2.5. GROUNDWATER CHEMISTRY .....	35
2.5.1 Water types .....	35
2.5.2 HCA and groundwater grouping .....	37
2.5.3 PCA and geochemical processes .....	40
2.5.4 Correlation between groundwater classifications .....	45
2.5.5 Geochemical zones .....	48
2.6. GROUNDWATER SPATIAL EVOLUTION.....	50
2.6.1 Geochemical cross sections .....	50
2.6.2 Geochemical processes .....	53
<i>General spatial geochemical variations</i> .....	53
<i>Dissolution and ion exchange processes</i> .....	54
<i>Local recharge and dilution</i> .....	55
<i>Former Champlain Sea water and mixing</i> .....	55
2.6.3 Geochemical conceptual model.....	57
2.7 DISCUSSION .....	59
2.8 CONCLUSION.....	60
2.9 ACKNOWLEDGEMENTS .....	62
<b>CHAPITRE 3 CONCLUSION</b> .....	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>67</b>



## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1: RÉGION D'ÉTUDE ET LOCALISATION DES 144 SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU SOUTERRAINE.....	4
FIGURE 1.2: GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX .....	6
FIGURE 1.3: CARTE DES DÉPÔTS MEUBLES.....	8
FIGURE 1.4: DISTRIBUTION DES CONDITIONS D'ÉCOULEMENT DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX RÉGIONAL.....	10
FIGURE 1.5: CARTE PIÉZOMÉTRIQUE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX ET DIRECTIONS GÉNÉRALES DE L'ÉCOULEMENT .....	11
FIGURE 1.6: INTERFACE DU SITE D'ENTRÉE DE DONNÉES .....	18
FIGURE 1.7: STRUCTURE D'ENTRÉE DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES .....	19
FIGURE 1.8: PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS ASPECTS DU PROJET GLOBAL .....	20
FIGURE 2.1: MAP OF THE STUDY AREA .....	29
FIGURE 2.2: RELATION BETWEEN TRITIUM AND <sup>14</sup> C UNCORRECTED AGES.....	35
FIGURE 2.3: WATER TYPES DISTRIBUTION AND GROUPS (G1 THROUGH G5) .....	37
FIGURE 2.4: DENDROGRAM AND MEAN CHEMICAL COMPOSITION OF CLUSTERS WITH STIFF DIAGRAMS .....	38
FIGURE 2.5: PROCESSES RELATED TO SALINITY (COMPONENT 1) BASED ON CL <sup>-</sup> /BR <sup>-</sup> VS CL <sup>-</sup> TRENDS.....	41
FIGURE 2.6: PROCESSES RELATED TO COMPONENTS 3 AND 4.....	43
FIGURE 2.7: RELATIONSHIP BETWEEN BARITE AND GYPSUM SATURATION INDEXES.....	43
FIGURE 2.8: RELATIONSHIP BETWEEN DOLOMITE AND CALCITE SATURATION INDEXES.....	44
FIGURE 2.9: GRAPH SHOWING EVIDENCE OF THE ION EXCHANGE PROCESS .....	45
FIGURE 2.10: RELATIONSHIP BETWEEN GROUPS OF WATER TYPES AND CLUSTERS.....	46
FIGURE 2.11: GEOCHEMICAL ZONES BASED ON THE CORRELATIONS BETWEEN GROUPS AND CLUSTERS .....	48
FIGURES 2.12 AND 2.13: GEOLOGICAL, HYDROGEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CROSS SECTIONS A-A' AND B-B' .....	51
FIGURE 2.14: CONCEPTUAL MODEL OF GROUNDWATER GEOCHEMICAL EVOLUTION .....	58

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1: RÉSUMÉ DE LA GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX.....	7
TABLEAU 1.2: RÉSUMÉ DES CARACTÉRISTIQUES ET DE LA DISTRIBUTION DES PUIXS À TRAVERS LES DIFFÉRENTS CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES.....	14
TABLEAU 1.3: CRITÈRES DE STABILITÉ OBSERVÉS POUR LES MESURES DES PARAMÈTRES <i>IN SITU</i> .....	15
TABLEAU 1.4: LISTE GÉNÉRALE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES ANALYSÉS .....	16
TABLE 2.1: SUMMARY OF THE GEOCHEMICAL DATA .....	33
TABLE 2.2: MEDIAN CONCENTRATIONS FOR ALL THE WATER TYPES .....	36
TABLE 2.3: MEDIAN CONCENTRATIONS (MG/L) FOR EACH CLUSTER .....	39
TABLE 2.4: PCA COMPONENTS AND LOADING FACTORS.....	40
TABLES 2.5: RELATIONSHIP BETWEEN GROUNDWATER SAMPLES CLASSIFICATIONS. ....	47

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe A: Descriptions minéralogique du socle rocheux

Annexe B: Résumé du protocole d'échantillonnage pour la caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay

Annexe C: Caractéristiques techniques des puits et contextes géologiques et hydrogéologiques

Annexe D: Résumé des méthodes analytiques

Annexe E: Fichiers d'entrée de données et de sortie pour la spéciation de l'échantillon 04CHDB060

Annexe F: Base de données géochimiques

Annexe G: Statistiques descriptives des données chimiques brutes en fonction des contextes géologiques et hydrogéologiques

Annexe H: Statistiques descriptives des ions majeurs et mineurs en fonction des types d'eau et des clusters

Annexe I: Cartes du chapitre 2

Annexe J: Interprétation de la section géochimique C-C'

Annexe K: Base de données sur CD

# CHAPITRE 1 Introduction

## 1.1 Problématique

Au Québec, l'eau souterraine est utilisée comme source d'eau potable par 20% de la population (MDDEP). Le manque de connaissances sur cette importante ressource justifie la réalisation d'un inventaire cartographique systématique des eaux souterraines dans le Québec habité (BAPE, 2000).

Le choix du bassin versant de la rivière Châteauguay comme pilote pour établir la cartographie des aquifères par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parc du Québec (MDDEP) repose sur plusieurs raisons:

- Les milieux agricole et industriel utilisent l'eau souterraine de cette région pour leurs activités.
- Certaines municipalités la distribuent par des réseaux d'eau potable.
- Des écoles et des particuliers l'utilisent pour leurs activités journalières.

Cette variété d'utilisateurs peut amener une fragilisation de la ressource et des conflits d'usages. Actuellement, une industrie de la région suscite les craintes de la population environnante pour la commercialisation de l'eau souterraine, la préservation de la ressource, mais aussi pour la dégradation de sa qualité en raison d'un pompage intensif. La qualité de l'eau souterraine peut être altérée par différentes activités anthropiques (agriculture, industrie, transport) qui peuvent être responsables d'un certain niveau de contamination. Un cas majeur de contamination dans la région est celui des anciennes lagunes de Mercier (Pontlevoy, 2004; Poulin, 1977), où l'eau souterraine a été contaminée par des d'huiles lourdes et des solvants.

Le bassin versant de la rivière Châteauguay est transfrontalier entre le Canada et les États-Unis. La topographie laisse croire que la nappe phréatique du côté canadien, aux bordures de la frontière, prend sa source du côté américain. Le peu de connaissances sur la quantité et la qualité de l'eau provenant des États-Unis est un argument additionnel dans le choix de ce bassin versant.

La caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay se fait par le biais du projet global de la "Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Châteauguay". Ce projet est une collaboration entre le MDDEP du Québec, la Commission Géologique du Canada et l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement. Ce projet a pour objectifs:

- de définir les formations géologiques du système aquifère;
- de définir les propriétés hydrauliques du système aquifère;
- d'évaluer la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine;
- d'établir le bilan hydrologique;
- d'évaluer la qualité de l'eau souterraine;
- de définir la vulnérabilité;
- de définir la pérennité de la ressource.

L'eau souterraine du bassin versant de la rivière Châteauguay a déjà été l'objet de plusieurs études. Des études locales ont été réalisées pour certaines municipalités afin de connaître les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères, les rendements de puits existants et les possibilités d'implantation de nouveaux puits de pompage (Belliveau, 1975; Dessureault, 1974; Géomines Ltée, 1983; Jolicoeur, 1976; Tremblay, 1963, 1975). La qualité des eaux souterraines des villes de Ormstown et de Sainte-Clotilde-de-Châteauguay a été étudiée par Bergeron et Govare (2000) et Tremblay (1967). Le cas de la contamination des anciennes lagunes de la ville de Mercier par des huiles lourdes et des solvants a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche depuis la reconnaissance du problème. Roy (1973) a vérifié une éventuelle contamination des eaux souterraines de la ville de Saint-Paul de Châteauguay. Poulin (1977) a déterminé la nature et l'étendue de la contamination. Pontlevoy (2004) a développé un modèle d'écoulement des eaux souterraines et Racine (2005) a étudié et proposé des systèmes de contrôle de la contamination.

Quelques études de plus grande envergure ont déjà couvert le bassin versant de la rivière Châteauguay. Pour mettre à jour l'état des connaissances des ressources en eau souterraine du Québec, Simard et Des Rosiers (1979) ont caractérisé la composition chimique des eaux souterraines du Québec au sud du cinquantième parallèle. Pelletier *et al.* (1985) ont compilé des données géochimiques obtenues à la suite d'une vaste campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine de la région de Montréal. Lors de cette étude, l'eau souterraine de plus de 4000 puits distribués dans la région du bassin

versant de la rivière Châteauguay a été échantillonnée pour vérifier le potentiel minéral des Basses-Terres du Saint-Laurent (Globensky et Ziserman, 1979). McCormack (1981) a réalisé une étude hydrogéologique couvrant précisément l'ensemble de la portion québécoise du bassin versant de la rivière Châteauguay. Il a constaté que l'eau souterraine du territoire était caractérisée par des problèmes de fer et de dureté.

Les volets géochimiques de ces études associées aux eaux souterraines sont insuffisants pour établir un portrait régional et actuel de la qualité de l'eau. Le projet de caractérisation géochimique des eaux souterraines s'intègre donc bien dans le projet global du bassin versant de la rivière Châteauguay pour la production de données géochimiques à jour et complètes pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Ce projet est un complément important à l'évaluation de la vulnérabilité de la ressource. Enfin, en fournissant une image régionale de la qualité de l'eau souterraine, les résultats de ce projet pourront être un outil important pour la gestion et la protection de la ressource en eau souterraine.

## **1.2 Région d'étude**

### **1.2.1 Contexte général**

Le bassin versant de la rivière Châteauguay est transfrontalier entre la province de Québec au Canada et l'état de New-York aux Etats-Unis. Il couvre une superficie de 2543 km<sup>2</sup> dont 55% se trouve au Canada. La région couverte pour la caractérisation géochimique est la portion québécoise du bassin versant (Figure 1.1). La localisation des points d'échantillonnage de l'eau souterraine est présentée sur la carte. Les points d'échantillonnage ont été subdivisés en quatre groupes (SSA, SS, Mixte, Roc) selon la ou les formations géologiques exploitées pour l'approvisionnement en eau souterraine. Le choix des sites échantillonnés sera discuté à la section 1.4.2.

Cette région abrite une population approximative de 200 000 habitants dont ~22% utilisent l'eau souterraine par le biais de puits privés. L'agriculture, la principale activité économique, occupe une place prédominante sur le territoire, mais les industries de la transformation métallique, de l'agro-alimentaire, du bois, de la chimie ainsi qu'une trentaine de carrières y sont aussi présentes. Une portion du territoire est occupée par les développements résidentiels. On y dénote la présence d'une voie ferrée et certains secteurs sont utilisés pour de l'enfouissement sanitaire.

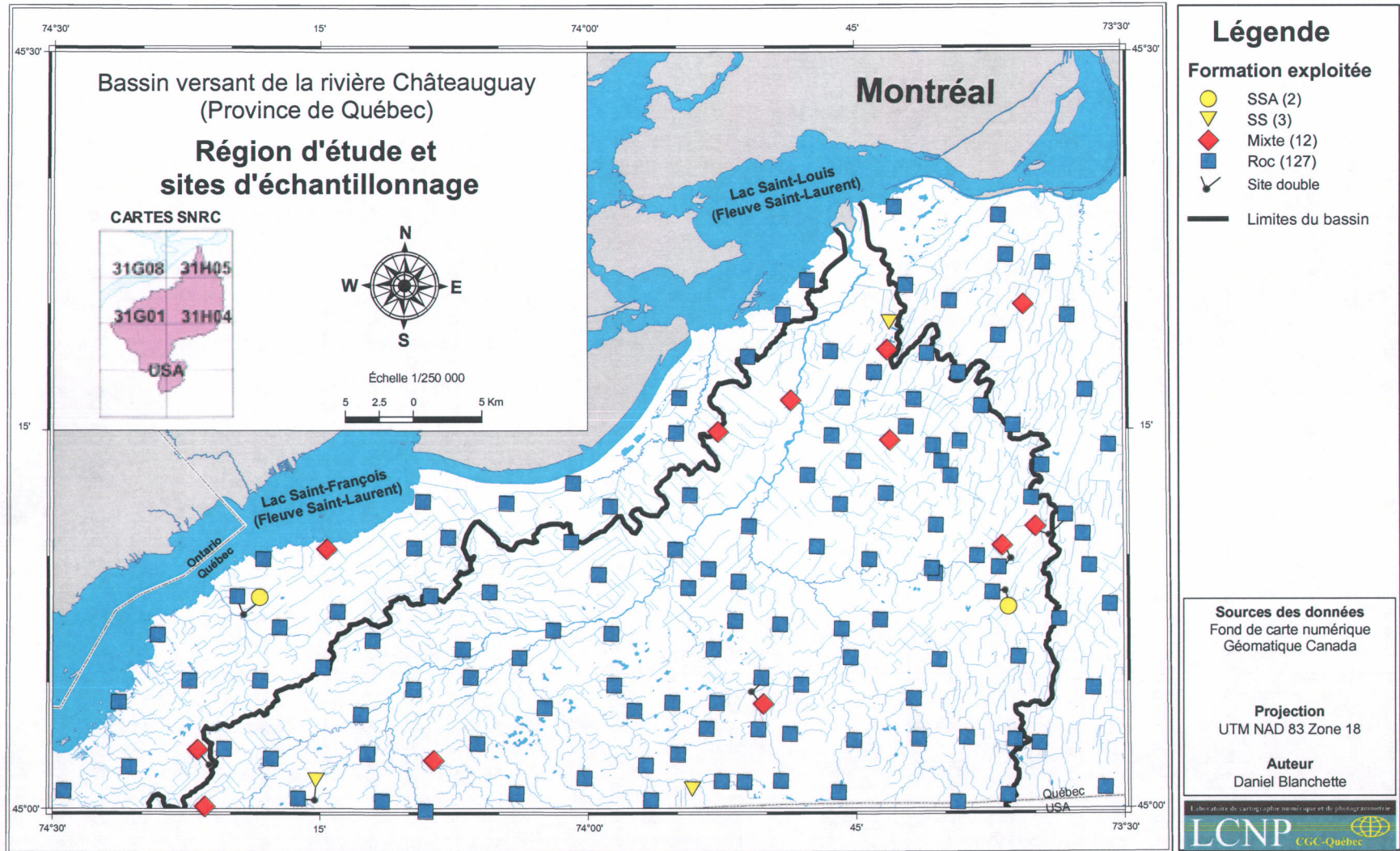


Figure 1.1: Région d'étude et localisation des 144 sites d'échantillonnage de l'eau souterraine. Formation exploitée, SSA: sédiments sous l'argile; SS: sédiments; Mixte: interface sédiments-roc; Roc: roc.

La topographie de la portion québécoise du bassin diminue du sud vers le nord avec un dénivelé de ~320 m. Le point le plus élevé est situé sur Covey Hill avec une altitude de ~340 m au-dessus du niveau moyen des mers (nmm). La rivière Châteauguay s'écoule du sud vers le nord et prend sa source de deux lacs du côté américain, les lacs Lower Châteauguay et Upper Châteauguay. Ils sont situés à environ 450 m d'altitude aux pieds des montagnes Addirondacks, dans l'état de New York (Croteau *et al.*, 2003).

Dans la portion québécoise du bassin versant, la rivière Châteauguay a trois principaux tributaires: la rivière Des Anglais, la rivière Aux Outardes et la rivière à la Truite. Leur qualité d'eau se dégrade de l'amont vers l'aval par la présence de concentrations élevées de mercure, de phosphate, d'azote et de particules en suspension. La contamination bactériologique identifiée est probablement le résultat de l'activité agricole et de l'épuration récente des eaux usées (Croteau *et al.*, 2003).

Le climat de cette région est tempéré et les températures moyennes avoisinent -10 °C en hiver et 21 °C en été. La moyenne des précipitations totales mesurées par Environnement Canada est de 958 mm/an pour l'ensemble du bassin versant de la rivière Châteauguay (Croteau, 2006).

### **1.2.2 Contextes géologiques**

La géologie de la région est composée de dépôts meubles qui reposent en discordance sur le socle rocheux (Figure 1.2). Le socle est formé par les roches sédimentaires de la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent mises en place il y a environ 530 Ma, soit du Cambrien à l'Ordovicien. Ces roches composent l'aquifère régional. Clark *et al.* (1979), Globensky (1981,1987), Lavoie *et al.* (2002) et Lavoie (2004) décrivent ces roches. Les formations rocheuses présentes dans le sud de la région du bassin versant sont formées par les grès du Groupe de Potsdam (Fm. Covey Hill, Fm. Cairnside). Ces grès sont ceinturés par les dolomies du Groupe de Beekmantown (Fm. Theresa, Fm. Beauharnois). Le contact du côté est entre le Groupe de Potsdam et le Groupe de Beekmantown est marqué par la Brèche de Havelock composée essentiellement de grès. Dans le secteur nord-est de la région, à l'extérieur du bassin versant, se trouvent des dépôts plus jeunes: calcaires des groupes de Chazy (Fm. Laval), de Black River (Gr. Black River), de Trenton (Fm. Deschambeault, Mb. Saint-Michel, Fm. Tétreauville); shales du Groupe de Lorraine (Fm. Nicolet) et d'Utica.

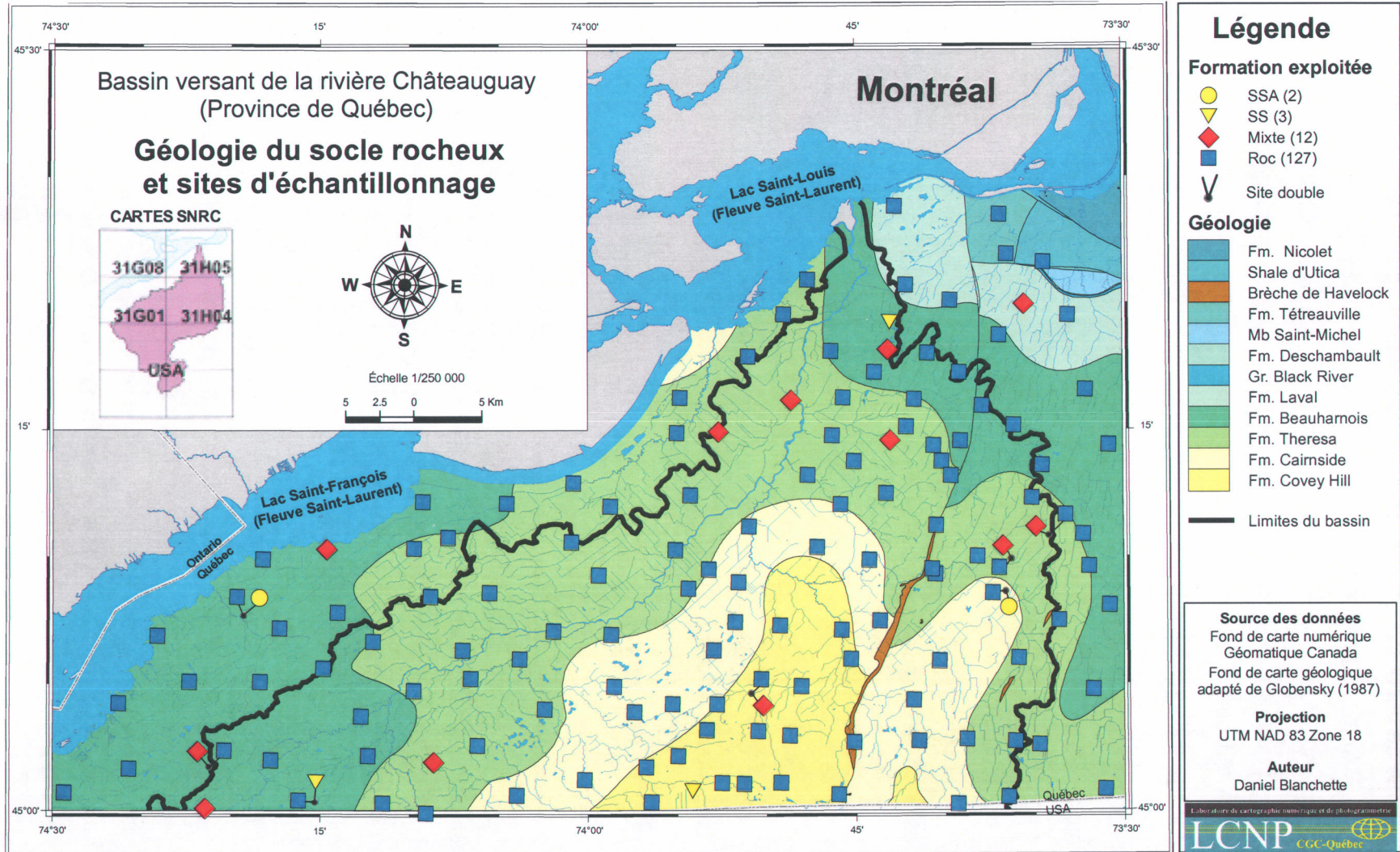


Figure 1.2: Géologie du socle rocheux (modifié de Globensky, 1987). Formation exploitée, SSA: sédiments sous l'argile; SS: sédiments; Mixte: interface sédiments-roc; Roc: roc. Géologie du socle rocheux, Fm.: Formation; Gr.: Groupe; Mb.: Membre



Le tableau 1.1 résume la stratigraphie du socle rocheux, avec une description lithologique de chaque formation/membre. Les descriptions minéralogiques sont présentées à l'annexe A.

Tableau 1.1: Résumé de la stratigraphie du socle rocheux<sup>1</sup>

Groupe	Formation/membre	Description lithologique
Lorraine	Nicolet	Shales silteux et micacés interstratifiés de grès fins, de silstone et de calcaires gréseux
Utica	-	Shales calcaireux
Brèche de Havelock	Havelock	Grès dolomitiques avec fragments quartzitiques
Trenton	Tétreauville	Calcaires denses avec lits de shales
	Saint-Michel	Calcaires fins à moyens interstratifiés de shales
	Deschambault	Calcaires cristallins avec peu ou pas de shales
Black River	Pamelia, Lowville, Leray	Roches dolomitiques et calcaires gréseux
Chazy	Laval	Grès, calcaires, dolomies calcaireuses, shales
Beekmantown	Beauharnois	Dolomies massives laminées, niveaux contenant calcite, dolomie, gypse et halite
	Theresa	Interstratification de grès dolomitiques, de grès quartzitiques et de dolomies marines
Potsdam	Cairnside	Grès quartzitiques à grains moyens arrondis, bien triés et cimentés
	Covey Hill	Grès feldspatiques à grains grossiers mal cimentés

1: Tiré de Globensky (1987)

Les dépôts meubles (Figure 1.3) ont été mis en place principalement lors de la dernière glaciation du Wisconsinien et de l'invasion marine de la mer de Champlain. Les dépôts meubles ont été étudiés par Karrow et Occhietti (1989), LaSalle (1981, 1985) et Tremblay et Lamothe (2005, Figure 1.3).

Les dépôts meubles sont principalement des sédiments fins (Ma), connus sous le nom d'argile de la Mer de Champlain et du till glaciaire (T, Tv). Il y a différents dépôts de sable et gravier (A, At, E, Mb, CH, Ld, Lb, Gx, Gs) et d'importantes surfaces couvertes par des dépôts organiques. La couverture des dépôts meubles atteint jusqu'à 50 m (Lavigne, 2006). Tremblay (2006) a utilisé les résultats de Lavigne (2006) pour estimer les épaisseurs respectives des différents dépôts meubles.

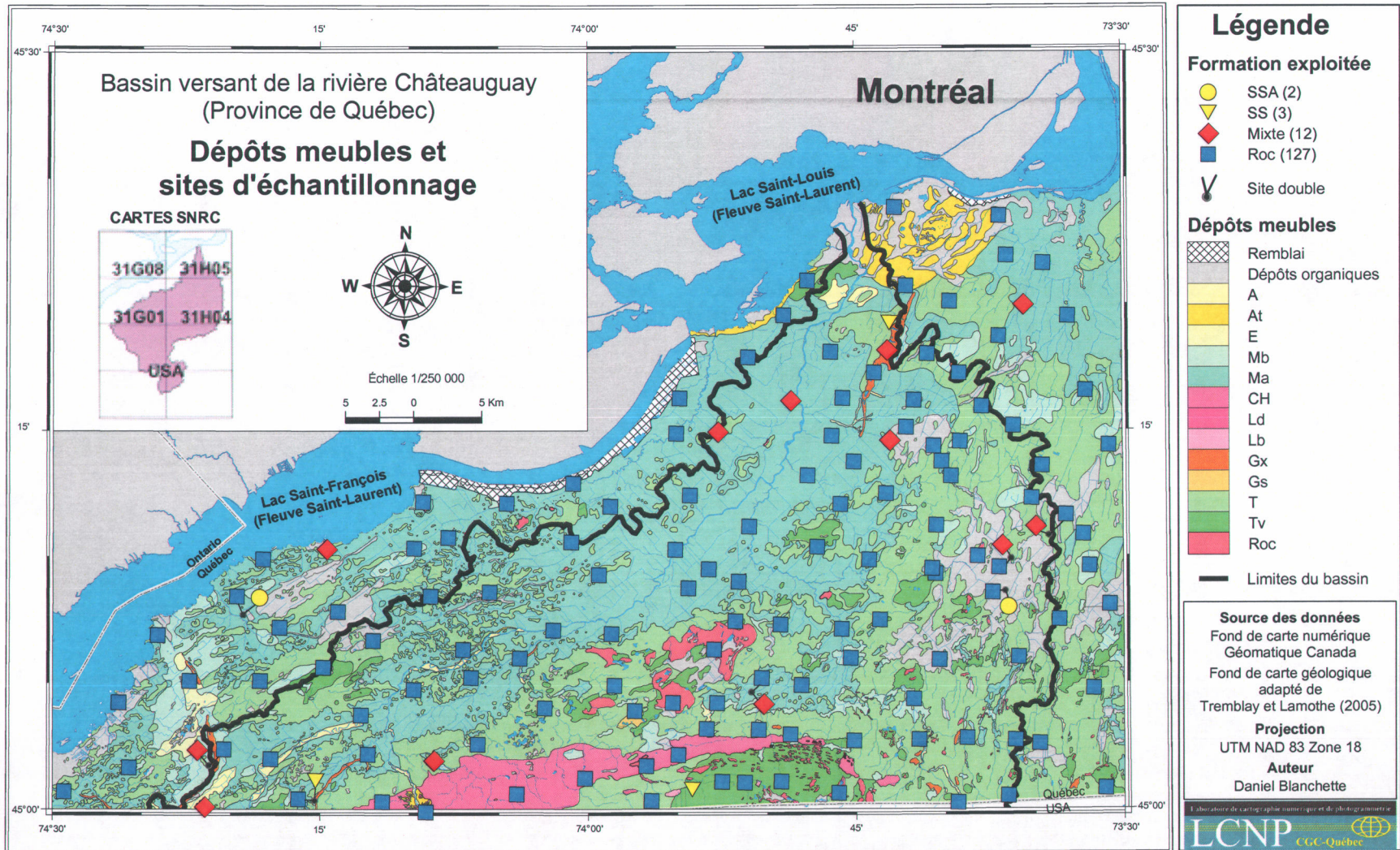


Figure 1.3: Carte des dépôts meubles (modifié de Tremblay et Lamothe, 2005). Formation exploitée, SSA: sédiments sous l'argile; SS: sédiments; Mixte: interface sédiments-roc; Roc: roc. Sable et gravier, A: alluvions fluviales; At: alluvions de terrasse fluviales; E: éoliens; Mb: marins peu profond; CH: Complexe de Covey Hill; Ld: deltaïques; Lb: littoraux; Gx: juxtaglaciaires; Gs: épandage sub-aquatique

### 1.2.3 Contextes hydrogéologiques

Les différents contextes hydrogéologiques de l'écoulement de l'eau souterraine (conditions libre, semi-confinée et confinée; zone de recharge, intermédiaire et exutoire) sont établis par rapport à la présence et l'épaisseur des différents dépôts meubles (Croteau, 2006; Figure 1.4). Les conditions de nappe confinée sont associées à la présence d'argile d'au moins 5 m d'épaisseur. Elles sont principalement situées le long de la rivière Chateauguay, en certains secteurs de la rivière Des Anglais et de la rivière Noire, dans le secteur de Saint-Constant, et le long du fleuve Saint-Laurent, du côté ouest. Les conditions de nappe libre sont associées aux affleurements rocheux ainsi qu'aux endroits où le till est absent ou inférieur à 3 m d'épaisseur. Ces conditions sont principalement localisées dans la région de Covey Hill et de Franklin au sud du feuillet topographique 31H04. Les conditions de nappe semi-confinées sont définies par la présence d'argile inférieur à 5 m d'épaisseur ou à du till d'au moins 3 m d'épaisseur. Elles dominent la couverture du territoire et sont localisées entre les secteurs en conditions de nappe libre et confinée.

Croteau (2006) a défini les taux de recharge de l'eau souterraine en se basant sur la nature et l'épaisseur des sols et des dépôts meubles. La principale zone de recharge correspond à Covey Hill, où l'écoulement de l'eau souterraine est en condition de nappe libre. Elle correspond au niveau piézométrique le plus élevé sur la Figure 1.5 (Benoît, 2005). Les flèches sur la Figure 1.5 indiquent les directions générales de l'écoulement de l'eau souterraine. La divergence des directions d'écoulement tout le long des limites du bassin versant définit la ligne de partage des eaux. Les limites du bassin versant sont aussi considérées comme zones de recharge. La recharge s'y effectue généralement en condition de nappe semi-confinée. La convergence des directions d'écoulement indique les principales zones exutoires de l'eau souterraine vers les eaux de surfaces. Ces zones sont associées à de bas niveaux piézométriques. Elles correspondent aux corridors des rivières principales et au fleuve Saint-Laurent. Des conditions de nappe confinée caractérisent généralement ces zones où il y a tout de même un contact hydraulique discontinu entre l'aquifère rocheux et les cours d'eau (Lavigne, 2006). Les zones intermédiaires de l'écoulement sont localisées entre les zones de recharge et exutoires. Les eaux souterraines qui circulent dans ces zones évoluent généralement en condition de nappe semi-confinée.

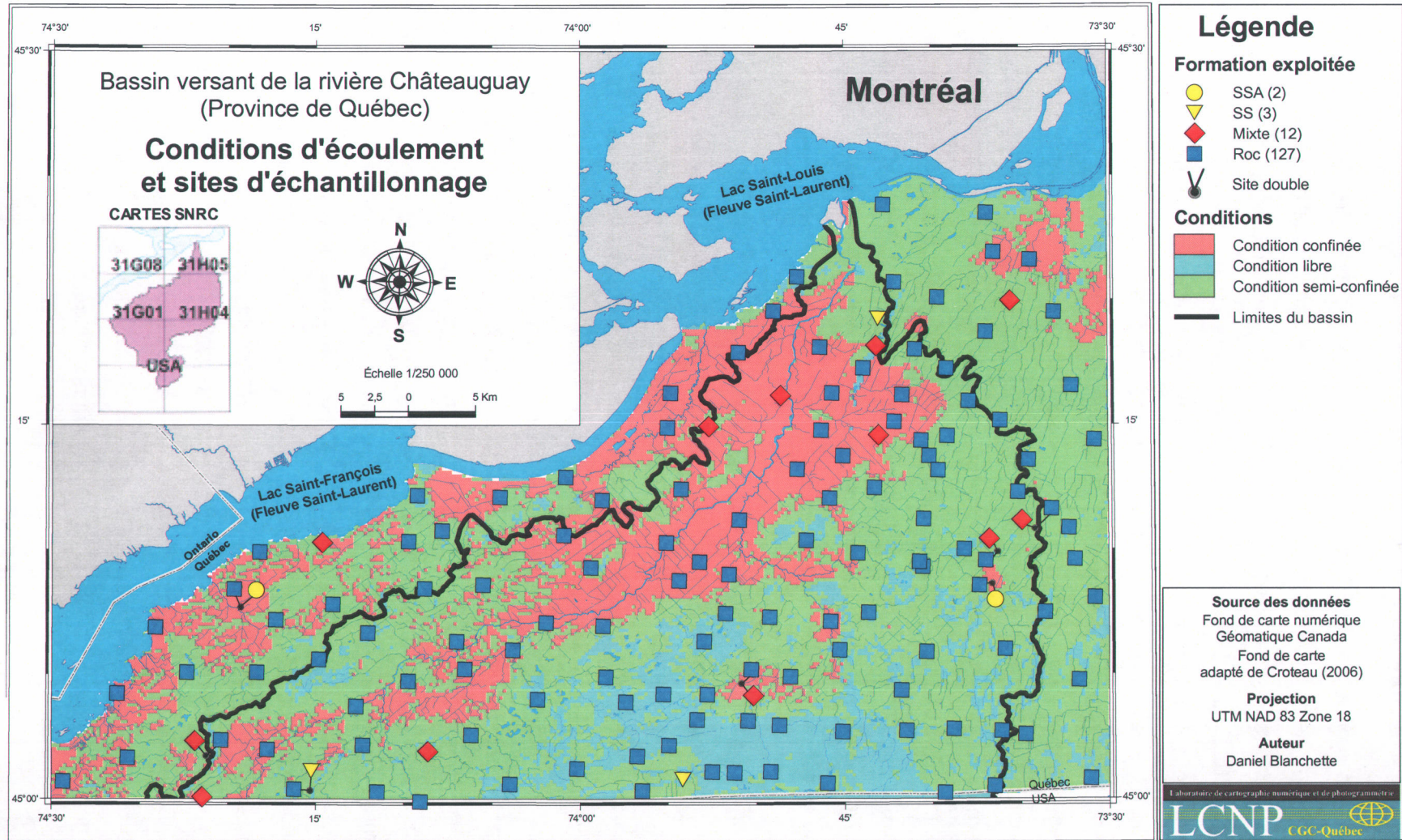
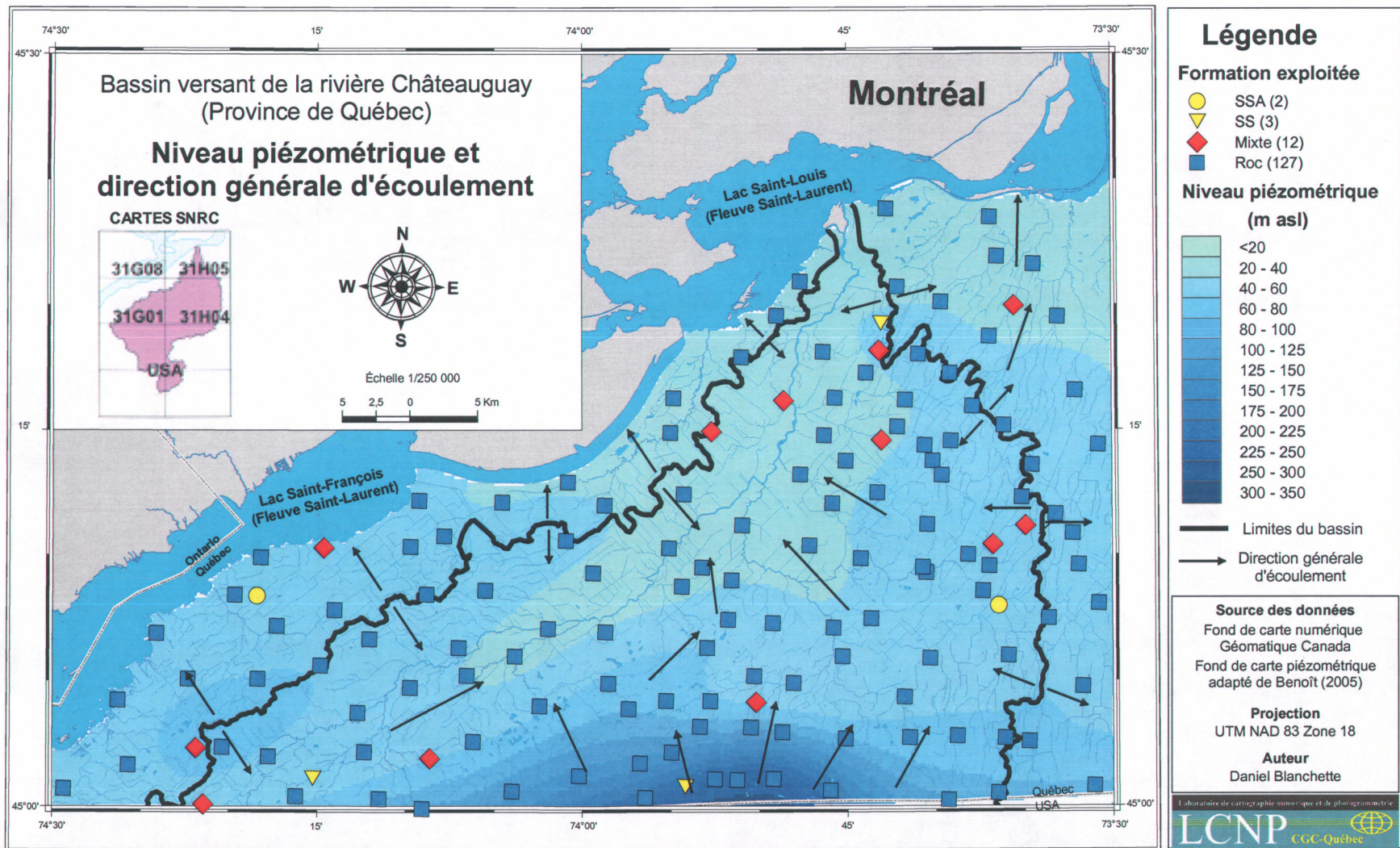


Figure 1.4: Distribution des conditions d'écoulement de l'aquifère rocheux régional (modifié de Croteau, 2006). Formation exploitée, SSA: sédiments sous l'argile; SS: sédiments; Mixte: interface sédiments-roc; Roc: roc



⇒

Figure 1.5: Carte piézométrique de l'aquifère rocheux et directions générales de l'écoulement (modifié de Benoît, 2005). Formation exploitée: SSA: Sédiments sous l'argile; SS: Sédiments; Mixte: Interface sédiments-roc; Roc: roc.

### **1.3 Objectifs**

Dans l'optique premier de définir régionalement la qualité de l'eau souterraine, cinq objectifs sont définis:

1. Caractériser la composition chimique des eaux souterraines distribuée sur l'ensemble de la zone d'étude selon les contextes géologiques et hydrogéologiques, et étudier la variation de la composition chimique selon la profondeur;
2. Comparer la composition chimique des eaux échantillonnées avec les normes établies par le CCME (2003) et vérifier si cette qualité peut-être zonée;
3. Définir les types d'eau par les cation et anion dominants et les comparer avec les résultats obtenus dans un autre secteur des Basses-Terres du Saint-Laurent (projet Basses-Laurentides, Cloutier, 2004);
4. Corréler les types d'eau et leur qualité avec les contextes géologiques et hydrogéologiques;
5. Identifier les processus chimiques et physiques qui sont responsables de la variation de la qualité d'eau régionalement et les étudier plus spécifiquement le long de sections géochimiques suivant l'écoulement de l'eau souterraine.

### **1.4 Méthodologie**

#### **1.4.1 Compilation des données existantes**

La compilation des données existantes a été réalisée au début du projet (Croteau *et al.*, 2003). Cette phase d'acquisition a permis d'accumuler des données provenant de plusieurs sources différentes, parmi lesquelles on retrouve:

- des rapports hydrogéologiques produits par des firmes d'ingénierie et ministères du gouvernement du Québec;
- une banque de méta-données sous formes électroniques traitant de la région d'étude (rapport interne, rapport ministériels, rapport d'expertise, carte, article, base de données, thèse, mémoire, livre, communication public, personne ressource);
- la banque de données hydrogéologiques du MDDEP (SIH: Système d'Informations Hydrogéologiques);

- des cartes de formats papier et électronique couvrant la région et traitant de topographie, pédologie, géologie de surface, géologie du socle rocheux, et des limites administratives et limites de bassin et sous-bassins.

La compilation de ces informations a mis en évidence un manque de connaissances au niveau hydrogéochimique. Plusieurs études locales et régionales ont été réalisées à des périodes différentes dans le secteur d'étude (section 1.1); mais aucune ne pouvait souscrire complètement aux objectifs définis pour ce projet. Celui-ci permet donc de compléter les données manquantes et d'actualiser les connaissances sur la géochimie des eaux souterraines du bassin versant. Les données compilées ont été utilisées pour la planification de la campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine, qui est résumée dans la section suivante.

#### **1.4.2 Échantillonnage**

La campagne d'échantillonnage a eu lieu à l'été 2004. Durant cette période, 144 échantillons globaux ont été prélevés pour la caractérisation régionale et 22 échantillons multi-niveaux ont été prélevés pour étudier la variation hydrogéochimique selon la profondeur. La méthodologie est décrite dans le protocole d'échantillonnage de Bourque et Cloutier (2001). Une mise à jour du protocole en fonction des connaissances acquises lors de la campagne d'échantillonnage réalisée pour le projet Châteauguay est présentée à l'annexe B.

Les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans des puits privés, municipaux et scolaires, et dans des puits d'observations du MDDEP. L'eau émergente d'une source en condition artésienne a aussi été échantillonnée. La distribution géographique des points d'échantillonnage a été guidée par les différents contextes géologiques et hydrogéologiques du territoire définis à la section 1.2. En général, les données techniques telles que la profondeur totale des puits et les formations exploitées sont obtenues directement des propriétaires. Pour les puits d'observation nouvellement forés par le MDDEP et les puits municipaux, les informations proviennent de rapports de forage. Certains puits ont été retracés dans la banque de données SIH du MDDEP. Pour d'autres puits, la longueur du tubage et l'ouverture au roc ont été estimés à partir de l'interpolation de l'élévation de la surface du roc (Lavigne, 2006) et d'un modèle tridimensionnel de l'épaisseur des dépôts meubles (Tremblay, 2006). Le tableau 1.2 présente un résumé de certaines caractéristiques techniques des puits et de leur

distribution à travers les différents contextes géologiques et hydrogéologiques. Les données complètes sont présentées à l'annexe C. Les puits ont généralement un diamètre de 15.2 cm (6"). Les puits échantillonnés ont été classés en 4 groupes selon les formations géologiques exploitée pour l'approvisionnement en eau souterraine. Entre parathèses, est indiqué le nombre de puits associés aux différents groupes et leur distribution à travers les contextes géologique et hydrogéologiques.

Tableau 1.2: Résumé des caractéristiques et de la distribution des puits à travers les différents contextes géologiques et hydrogéologiques

Formations exploitées			
	Roc (127)	Mixte (12)	SSA-SS (5)
Dolomie (85)		Till/Dolomie (7)	*Till (5)
Grès (35)		Till/Grès (1)	
Calcaire (6)		Till/Calcaire (1)	
Shale (1)		Sable/Dolomie (2)	
		Argile/Dolomie (1)	
Profondeur totale des puits (m)			
min	8.6	6.9	**6.1
médiane	33.2	12.2	**10.4
max	123.4	25.9	**20.7
Longueur du tubage (m)			
min	1.7	6.9	**6.1
médiane	11.7	12.2	**10.4
max	68.0	25.9	**20.7
Ouverture au roc (m)			
min	0	0	na
médiane	16.7	0	na
max	94.3	1.53	na
Conditions de l'écoulement de l'eau souterraine			
Libre (19)		Semi-confinée (7)	Semi-confinée (3)
Semi-confinée (77)		Confinée (5)	Confinée (2)
Confinée (31)			
Zones de l'écoulement de l'eau souterraine			
Recharge (28)		Recharge (5)	Recharge (2)
Intermédiaire (58)		Intermédiaire (4)	Intermédiaire (2)
Exutoire (41)		Exutoire (3)	Exutoire (1)

\*: Source échantillonnée incluse, \*\*: Source échantillonnée exclue. min: valeur minimale; médiane: valeur centrale; max: valeur maximale. Unité exploitée, Roc: roc; Mixte: interface sédiment-roc; SSA: sédiments sous l'argile; SS: sédiments

La prise d'un échantillon se fait en trois étapes. La première étape consiste à vérifier et préparer les instruments utilisés pour mesurer les paramètres physico-chimiques *in situ* de l'eau souterraine (Annexe B). Ensuite, une purge de l'eau des puits est effectuée avant la prise de chaque échantillon. Cette purge sert à vidanger l'eau présente dans les puits et dans les systèmes de tuyauterie permettant ainsi d'obtenir une eau représentative des conditions *in situ* de l'aquifère. La durée de la purge est conditionnée



par deux facteurs: l'utilisation du puits et la stabilité des paramètres *in situ*. L'utilisation du puits renseigne sur la fréquence du pompage de l'eau souterraine. Pour un puits dans lequel un pompage est effectué régulièrement, l'eau est considérée relativement fraîche. Dans un tel cas, seulement la stabilité des paramètres physico-chimiques est considérée. Cette méthodologie a été appliquée pour les puits domestiques et les puits municipaux. Par contre, pour un puits utilisé sporadiquement ou pour un puits d'observation, un volume d'eau correspondant à au moins 3 fois le volume contenu dans le puits devait être extrait avant la prise d'un échantillon. De plus, les paramètres physico-chimiques *in situ* devaient répondre aux critères de stabilité (tableau 1.3). Cette méthodologie a été appliquée pour les puits scolaires et tous les puits d'observation du MDDEP. Elle a également été appliquée pour la prise des échantillons multi-niveaux. Par contre, après la purge complète d'au moins 3 volumes de la colonne d'eau, chaque niveau a été par la suite purgé pour un volume total d'eau correspondant au volume contenu entre les coussins qui isolent le niveau et le volume total de la tuyauterie qui sert à acheminer l'eau à la surface. La purge de ce dernier volume sert à rincer le système pour éliminer toutes traces de la colonne d'eau initiale. Le tableau 1.3 présente les instruments utilisés pour les mesures des paramètres physico-chimiques *in-situ* ainsi que les critères de stabilité observés lors de la purge de l'eau souterraine. Les critères de stabilité sont appliqués pour un ensemble de 3 mesures consécutives chacune prise à un intervalle de 5 minutes.

Tableau 1.3: Critères de stabilité observés pour les mesures des paramètres *in situ*

Paramètre	Sonde/Instrument	Précision	Critères de stabilité
Température	Thermomètre en verre	± 0.1 °C	± 0.2 °C
pH	Sonde YSI 63	± 0.1 unité de pH	± 0.2 unité de pH
Conductivité Spécifique à 25 °C	Sonde YSI 63	± 2% de la mesure en uS/cm	± 4% de la mesure en uS/cm
Oxygène dissous	Sonde YSI 63	± 0.2 mg/L	± 0.4 mg/L
	Sonde YSI 550A	± 0.3 mg/L	± 0.6 mg/L
Potentiel oxydo-réduction	Sonde redox ORP d'Hanna	± 10 mV	± 20 mV

Une fois la purge terminée, le prélèvement des échantillons est effectué selon la procédure décrite à l'Annexe B. Le tableau 1.4 présente l'ensemble des paramètres chimiques analysés en laboratoire. Le nombre d'échantillons soumis aux analyses pour chacun des paramètres est indiqué dans la deuxième colonne. Les contenants et les

préservatifs utilisés pour la conservation des échantillons, les types de filtres utilisés et les différents laboratoires qui ont effectué les analyses chimiques sont aussi présentés. Les méthodes analytiques appliquées par les différents laboratoires sont documentées à l'annexe D.

Tableau 1.4: Liste générale des paramètres chimiques analysés

Paramètres	Nbre <sup>1</sup>	Bouteille <sup>2</sup>	Agent de conservation	Filtration <sup>3</sup>	Laboratoire
Ag, Al, As, B, Ba, Br, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sr, Zn, U	183	60 ml, P 125 ml, P	Acide nitrique	0.45 µm, P	Laboratoire de la qualité du milieu CEAEQ, Québec
Hg	183	15 ml, P	Acide nitrique + solution d'Or	0.45 µm, P	
Cl, F, SO <sub>4</sub> , Alcalinité totale, Couleur	175	500 ml, P	aucun	aucune	
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , N-total	175	125 ml, P	Acide sulfurique	0.45 µm, N	
CID, COD	175	125 ml, P	aucun	aucune	
<i>E. Coli</i> , Coliformes totaux, Colonies atypiques	144	250 ml, P	Thiosulfate de sodium	aucune	
Phosphore inorg. total	175	250 ml, P	Acide sulfurique	0.45 µm, N	Laboratoire des pollutions industrielles CEAEQ, Laval
Cyanures totaux	175	250 ml, P	NaOH	aucune	
Sulfures totaux	175	250 ml, P	Acétate de zinc + NaOH	aucune	
δ <sup>2</sup> H et δ <sup>18</sup> O	27, 28	60 ml, P	aucun	aucune	Delta-Lab CGC-Québec
<sup>3</sup> H, δ <sup>13</sup> C	27, 25	1 L, P	aucun	aucune	EIL-Université de Waterloo
<sup>14</sup> C	25	250 ml, V 1 L, P	aucun	aucune	Isotrace-Université de Toronto

1: Nombre total d'échantillons: 183 (caractérisation régionale: 144; multi-niveaux: 22; duplicatas: 9; blancs de terrain et de transport: 8)

2: P = Plastique (HDPE) V = Verre

3: P = Polyéthylène N = Nitrocellulose

### 1.4.3 Traitement, analyse des données et présentation des résultats

Le traitement et l'analyse des données sont basés sur la méthodologie appliquée pour le projet des Basses-Laurentides avec l'application successive de 3 logiciels (Cloutier, 2004). Le premier logiciel utilisé est PHREEQC version 2.8 (Parkhurst et Appelo, 1999) fournit avec le logiciel Aquachem version 4.0 (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003) discuté dans le paragraphe suivant. C'est un logiciel de modélisation hydrogéo chimique développé par le U.S. Geological Survey. Des versions antérieures de ce programme sont disponibles sur leur site internet (USGS). Ce logiciel est utilisé pour établir les concentrations des espèces présentes dans les eaux échantillonnées, calculer les indices de saturation pour certaines phases minérales et vérifier la qualité des analyses chimiques par un test d'électroneutralité. Les résultats d'analyses chimiques, fournis par

les laboratoires, représentent les concentrations totales de chacun des éléments analysés. L'utilisation du logiciel PHREEQC permet d'établir les concentrations des différentes espèces en solution à partir des concentrations totales des éléments analysés. L'exemple de spéciation présenté à l'annexe E, démontre entre autre, que l'élément calcium (Ca) en solution est distribué a l'intérieur de dix espèces différentes, dont l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  est l'espèce dominante. Cette étape de spéciation est primordiale afin de répondre aux différents objectifs. La qualité des analyses chimiques est vérifiée en appliquant la règle de l'électroneutralité. Cette règle consiste à vérifier la différence en % du contenu (en meq/L) entre les anions et les cations. Une différence de  $\pm 5\%$  pour juger de la qualité des analyses est généralement recommandée (Appelo et Postma, 1999). Pour le présent projet, une limite de  $\pm 10\%$  a été jugée acceptable pour éviter un rejet d'un trop grand nombre d'échantillon. Les échantillons dont l'électroneutralité n'est pas située à l'intérieur de l'intervalle de  $\pm 10\%$  sont rejetés du groupe servant à répondre aux différents objectifs.

Les résultats de la spéciation sont ensuite importés dans le logiciel Aquachem version 4.0 (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003) pour constituer une base de données hydrogéochimiques. Il permet lui aussi de vérifier la qualité des analyses chimiques produites par les laboratoires, de produire des graphiques, de comparer les résultats d'analyses avec les normes de potabilité, de faire des statistiques et de déterminer les types d'eau.

Le logiciel Statistica version 6.0 (Statsoft, 2004) est utilisé pour les analyses statistiques. Ce logiciel permet d'effectuer des statistiques multivariées du type AHC (analyse hiérarchique regroupée) et ACP (analyse en composante principale). Ces analyses multivariées sont utilisées pour faire ressortir les caractéristiques de la composition chimique des eaux souterraines pour l'ensemble du territoire. Elles permettent d'identifier plus précisément les processus chimiques et physiques qui ont un effet sur la qualité d'eau régionale.

Toutes les données sont géoréférencées et les résultats sont présentés sous forme de cartes thématiques produites à l'aide du logiciel Arcmap version 9.0 (ESRI Inc., 2004).

## 1.5 Accès aux données du projet

Dans le cadre du projet global de la caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Châteauguay, la Commission Géologique du Canada-Division Québec a développé une base de données de terrain (Field Capture 2003-2006). Cette base de données permet d'intégrer toutes les informations générales au projet, les données recueillies sur le terrain, etc. (figure 1.6). Les différentes données recueillies sont intégrées dans la base de données par le biais de formulaires disponible sur un site internet accessible seulement aux participants du projet. Le public a accès aux informations générales et à la liste des participants au projet par un site internet (Ressources Naturelles Canada). La Figure 1.6 présente l'interface du site d'entrée des données.

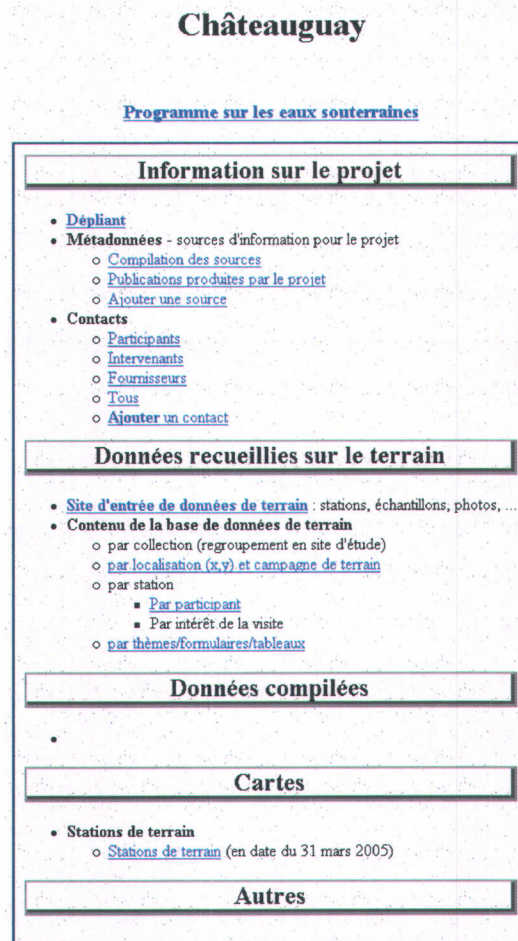


Figure 1.6: Interface du site d'entrée de données

La Figure 1.7 présente la structure d'entrée par laquelle les données géochimiques recueillies à l'été 2004 sont intégrées à la base de données de terrain. La localisation se définit par les coordonnées géographiques X et Y (UTM NAD 83 zone 18) d'un puits échantillonné. Si deux puits sont situés l'un par rapport à l'autre à une distance inférieure à 10 m, ils sont inscrits sous la même localisation. L'objet définit le point d'échantillonnage. Par exemple, le puits 1 pourrait être un piézomètre tandis que le puits 2 pourrait être un puits tubulaire ouvert au roc. La station correspond à une visite de l'objet. Chaque période ininterrompue lors d'une visite est considérée comme une station. Par exemple, si un même puits est visité 2 fois à 2 semaines d'intervalles, 2 nouvelles stations seront attribuées à cette localisation. Finalement, les attributs correspondent aux travaux effectués à chaque station.

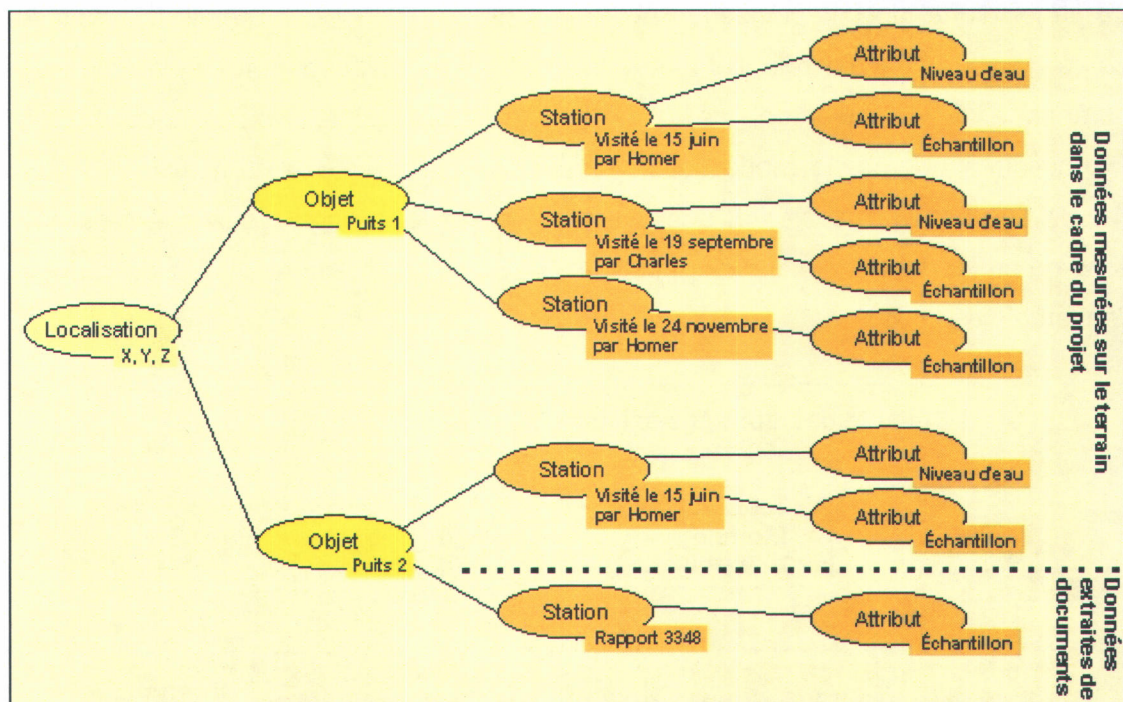


Figure 1.7: Structure d'entrée des données géochimiques

À l'exception de la base de données informatique, tous les produits générés sont en général présentés à la fin de ce mémoire (annexes). Des cartes qui résument les problématiques de qualité d'eau sont intégrées à l'atlas hydrogéologique du projet global (Côté *et al.*, 2006). Les principaux produits générés sont:

- des données physico-chimiques et chimiques récentes de l'eau souterraine couvrant la totalité de la zone d'étude et les différents contextes géologiques et hydrogéologiques (Annexe F);
- une carte thématique qui présente un résumé de la composition chimique et la distribution des différents types d'eau (Annexe I, Carte 2.12);
- des cartes thématiques qui présentent la distribution des paramètres chimiques les plus importants. (Annexe I et Atlas du projet global, Côté *et al.*, 2006);
- des sections géologiques qui présentent l'évolution géochimique de l'eau souterraine le long de sections géochimiques (Figures 2.12 et 2.13, Annexe J).

### 1.6 Liens avec les autres projets de maîtrise

Le projet global de caractérisation hydrogéologique comporte 7 projets de maîtrise: la caractérisation géochimique, l'étude de la recharge de l'eau souterraine, la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine, la détermination des propriétés hydrauliques du roc, la modélisation numérique inverse de la transmissivité du roc, l'étude des dépôts meubles et une étude sociologique. La figure suivante présente les liens du projet de caractérisation géochimique (Échantillonnage et Qualité de l'eau) avec l'ensemble des travaux.

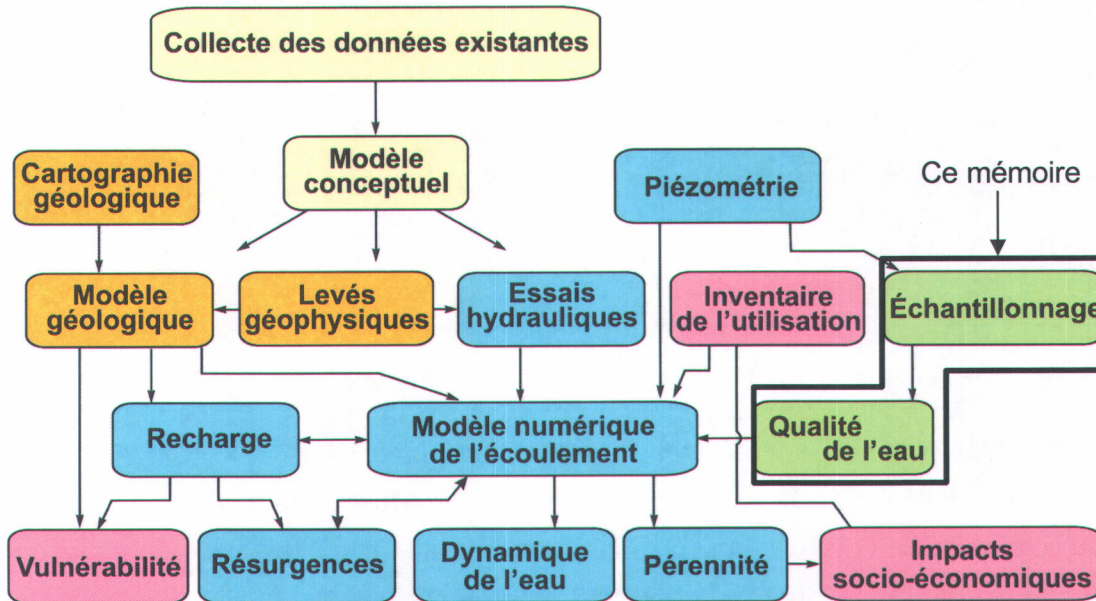


Figure 1.8: Présentation des différents aspects du projet global

Certains projets comme l'étude de la recharge de l'eau souterraine, la détermination des propriétés hydrauliques du roc, la modélisation numérique de la transmissivité du roc et l'étude des dépôts meubles produisent des résultats essentiels à la réalisation du projet de caractérisation géochimique. En retour, la géochimie peut aider à identifier les zones de recharge et valider le modèle d'écoulement de l'eau souterraine.

## **1.7 Structure du mémoire**

Ce mémoire de maîtrise est divisé en trois chapitres. Le chapitre d'introduction décrit les informations générales sur le projet, les aspects généraux de la région d'étude, les contextes géologiques et hydrogéologiques ainsi que la méthodologie suivie. Le deuxième chapitre, sous forme d'article, concerne les résultats de la caractérisation géochimique régionale en réponse aux objectifs. Le dernier chapitre relève les principales conclusions du projet. Les annexes sont présentées à la fin du mémoire.





## **CHAPITRE 2 Article sur la caractérisation géochimique**

### **Hydrochemical assessment of groundwater quality in the Châteauguay River watershed, Québec, Canada**

Daniel Blanchette<sup>a</sup> , René Lefebvre<sup>a</sup> , Miroslav Nastev<sup>b</sup> , Vincent Cloutier<sup>c</sup>

a: Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec

b: Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, GSC-Quebec Division, Québec

c: Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Amos

#### **Abstract**

A hydrochemical study was conducted in the Québec portion of the Châteauguay River watershed. The objective was to characterize groundwater chemical composition, in order to define its quality and assess the variations due to geochemical and physical processes under observed geological and hydrogeological settings. During the 2004 field campaign, 144 groundwater samples and 22 multilevel samples were collected from private wells, municipal and school wells, monitoring wells and one spring distributed in the study area. Samples were analysed for a complete set of chemical parameters: major, minor and trace elements, bacterial content, stable ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) and radioactive ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) isotopes. Concentrations of ionic species were calculated during the speciation using a hydrochemical equilibrium model.

Results indicate that major elements Ca, Mg, Na, K, Cl,  $\text{SO}_4$  and anions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  compose more than 92% of the total dissolved solids. Their concentrations are mostly controlled by hydrogeological rather than the geological factors. Comparison with the drinking and irrigation criteria of the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) shows that most water quality problems are related to aesthetic standards, such as hardness, total dissolved solids (TDS), Fe and Mn content. Analysis of tritium ( $^3\text{H}$ ) and  $^{14}\text{C}$  supports inferred zones of groundwater recharge and also indicates the presence of groundwaters of various ages in the aquifer system. Groundwater shows a wide range of compositions, as indicated by 12 water types defined on the basis of major ions, but the

predominant water type is Ca-HCO<sub>3</sub>, which occurs in most geological and hydrogeological contexts. Analyses of the multilevel samples show a weak variation of the chemical composition with depth. Principal Component Analysis (PCA) highlights the importance of geochemical processes. Results show that ~80% of the chemical variation can be explained by mixing between fresh water with more saline former Champlain Sea water, with possible halite dissolution, dolomite and gypsum dissolution and dissolution of Fe-Mn and F-Sr bearing minerals.

Two cross sections were drawn to enlighten the evolution of groundwater geochemistry along major down flow paths. These sections show the correlations between water type groups, clusters defined by hierarchic cluster analysis (HCA), components defined by principal components analysis (PCA) and groundwater flow conditions. The conceptual model that emerges from these sections involves Ca-HCO<sub>3</sub> and Na-Cl water types as the two end members of the groundwater geochemical evolution. Processes of carbonates dissolution, ion exchange, water mixing with near-stagnant remnant Champlain Sea water and possibly halite dissolution exert the major control on the evolution of the two end members. Comparison of water types and of the conceptual model in the study area with those defined for the Basses-Laurentides area, North of the St. Lawrence River, shows significant differences related to groundwater flow conditions, despite a similar lower paleozoic over crystalline rock basement.

## Résumé

Une étude hydrogéochimique a été effectuée dans la portion québécoise du bassin versant de la rivière Châteauguay. Les objectifs de l'étude étaient de caractériser la composition chimique des eaux souterraines pour en définir sa qualité et expliquer les variations associées aux processus physiques et chimiques contrôlés par les contextes géologiques et hydrogéologiques. Durant les travaux de terrain de l'été 2004, 144 échantillons d'eau souterraine et 22 échantillons multi-niveaux ont été prélevés dans des puits privés, municipaux et scolaires, puits d'observation et une source uniformément distribués sur l'ensemble du territoire. Les échantillons ont été analysés pour une série complète de paramètres chimiques: éléments majeurs, mineurs et traces, paramètres bactériologiques, isotopes stables ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) et radioactifs communs ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ). La spéciation a été déterminée par modélisation hydrogéochimique pour obtenir les concentrations des différentes formes des éléments analysés.

Les résultats indiquent que les éléments majeurs Ca, Mg, Na, K, Cl,  $\text{SO}_4$  et anions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , composent plus de 92% de la charge dissoute totale. Leurs concentrations sont principalement contrôlées par des facteurs hydrogéologiques plutôt que géologiques. La comparaison avec les critères de la qualité d'eau du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME) pour l'eau potable et l'irrigation des cultures indique que les problèmes observés sont majoritairement d'ordre esthétique, tels que dureté, matière dissoute totale (MDT), Fe et Mn. Les analyses du tritium ( $^3\text{H}$ ) et du  $^{14}\text{C}$  attestent d'une recharge récente de l'eau souterraine et de la présence d'eaux d'âges variées dans le système aquifère. L'eau souterraine de la région d'étude montre une composition chimique variée donnant lieu à l'identification de 12 types d'eau. Le type Ca- $\text{HCO}_3$  domine en nombre et se retrouve dans tous les contextes géologiques et hydrogéologiques. L'analyse des échantillons multi-niveaux indique une faible variation en profondeur de la composition chimique pour l'épaisseur de roc étudiée. L'utilisation de l'analyse en composante principale (ACP) a permis de démontrer que ~80% de la variation chimique résulte de processus majeurs de mélange entre des eaux fraîches et des eaux résiduelles de la mer de Champlain, avec possiblement la dissolution d'halite, de dolomite et de gypse ainsi que de minéraux ferreux et manganésifères et de minéraux riches en F et Sr.

Deux sections géochimiques ont été réalisées pour suivre l'évolution géochimique des eaux souterraines le long de lignes générales d'écoulement. Ces sections illustrent de façon précise les corrélations entre les types d'eau, les clusters définis par l'analyse hiérarchique regroupée (AHC), les composantes principales (ACP) et les conditions d'écoulement de l'eau souterraine. Le modèle conceptuel de l'évolution géochimique des eaux souterraines qui en découle propose deux pôles d'eaux Ca-HCO<sub>3</sub> et Na-Cl modifiés par des processus de dissolution des carbonates, d'échange ionique, de mélange d'eau fraîche avec des eaux résiduelles de la mer de Champlain, et possiblement, de dissolution de halite. La comparaison des types d'eau et des modèles conceptuels définis pour les secteurs du bassin versant de la rivière Châteauguay et des Basses-Laurentides (Nord du fleuve Saint-Laurent) révèle des différences significatives entre ces zones d'études, imputables aux conditions d'écoulement de l'eau souterraine.

## 2.1 Introduction

The Châteauguay River watershed straddles the Canada – USA border in southwestern Québec and northeastern New York State. The Québec part of the watershed, located south of Montréal, is mostly a rural area with approximately 200 000 inhabitants over 1400 km<sup>2</sup>. About 22% of the population relies on groundwater as a source of potable water. The lack of sufficient knowledge on the groundwater resource, the high and variable groundwater use, and the concern of citizens over the effects of the largest groundwater contamination case in Québec, the Mercier Lagoons, led the Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) to start a joint study with the Geological Survey of Canada (GSC) and the Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) on assessment of the groundwater resource in the watershed. A particular effort was directed towards the definition of the regional groundwater quality.

Previous hydrogeological studies were conducted locally in the Châteauguay River watershed to define the hydrogeological characteristics of the aquifer, wells capacity and the siting of new wells (Belliveau, 1975; Dessureault, 1974; Géomines Ltée, 1983; Jolicoeur, 1976; Tremblay, 1963, 1975). Bergeron and Govare (2000) and Tremblay (1967) documented groundwater quality of Ormstown and Sainte-Clotilde-de-Châteauguay as did McCormack (1981) for the entire study area. Based on the results of 31 samples, McCormack (1981) concluded that groundwater suffered from hardness and iron problems. The same conclusions were drawn from the few chemical data of local studies. Groundwater chemical composition of the area was also used as a tool for mineral potential assessment (Pelletier *et al.*, 1985). This study, with more than 4000 samples, is the widest ever conducted in the watershed. The Mercier Lagoons contamination was also studied by Roy (1973) to assess the possibility of groundwater contamination in the municipality of Saint-Paul-de-Châteauguay. Poulin (1977) further defined the nature and the extent of the contamination. Recently, Pontlevoy (2004) developed a groundwater flow model and Racine (2005) proposed some contamination control methods for that site. The results of previous studies ignored some important chemical elements or had too few samples to define the current regional groundwater quality. The present study intended to fill that gap with 144 aerielly distributed groundwater samples and 22 multilevel samples.

Geochemistry has been widely used in groundwater assessments for other purposes than groundwater quality. Dindane *et al.* (2003) combined major ions and stable isotopes to identify the chemical characteristics and the origin of the groundwater in a shallow aquifer located in Morocco. Fisher and Mullican (1997) used chemical analyses to define hydrochemical facies, identify the origin of groundwater and the processes that explained the chemical composition of groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert in Texas, USA. Vidal *et al.* (2000) showed, by the combination of chemistry and Principal Component Analysis (PCA), that the chemical composition of groundwater around Lugo city in Spain reflects contamination by agricultural activities. Geochemistry was also used by Iwatsuki *et al.* (2005) to study the groundwater geochemical evolution up to depths of 1000 m below the surface around the Mizunami underground research laboratory (MIU), Japan. Cloutier (2004) studied groundwater chemical composition in the Basses-Laurentides region located on the north shore of the St. Lawrence River, in geological and hydrogeological contexts very similar to the Châteauguay River watershed. The combination of major, minor and trace elements as well as stable and radioactive isotopes were used with PCA to characterize groundwater quality and define processes responsible for it. Hierarchic Cluster Analysis (HCA) was also applied for the definition of geochemical zones. A conceptual model of the geochemical evolution of the groundwater was also defined for this area.

The present study focuses on the Québec portion of the Châteauguay River watershed. Based on Cloutier (2004), 5 objectives were identified: 1) characterize the regional and vertical variation of the groundwater chemical composition, 2) define groundwater quality and assign water types, 3) relate water types with their geological and hydrogeological contexts, 4) identify the dominant physical and geochemical processes that control groundwater chemical composition, and 5) study the geochemical evolution of the groundwater. This study also aimed to compare the water types and the conceptual model of geochemical evolution in the study area with those defined in the Basses-Laurentides study (Cloutier, 2004).

## **2.2 Study area**

The Châteauguay River watershed extends over the Canada – USA border in southwestern Québec and northeastern New York State. Of the total 2543 km<sup>2</sup> area, approximately 55% is located in Québec (Figure 2.1).

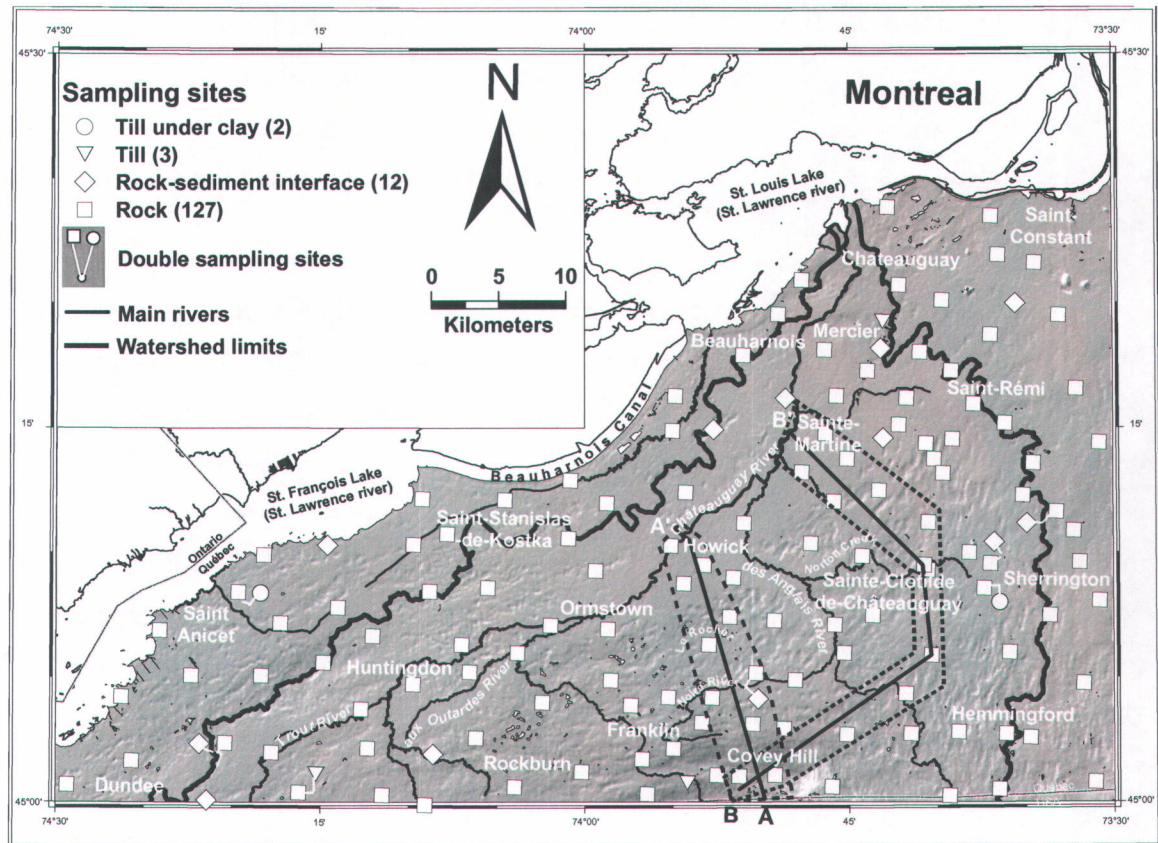


Figure 2.1: Map of the study area showing its physiography, hydrography and the Châteauguay River Watershed boundary in Quebec. Groundwater sampling sites are also shown as well as the location of cross sections A-A' and B-B' (Figures 2.12 and 2.13). The dashed lines encompass the sampling sites used for these cross sections

Agriculture is the main economic activity in the predominantly rural region to the south. To the north, urban and industrial zones alternate with agriculture areas. The general topography is hilly to the south and flat to the north. Located at the Canada-USA border, Covey Hill is the highest morphological feature with an elevation of 340 m above sea level (asl). The St. Lawrence River, with an altitude of approximately 20 m asl near the Montreal island, is the major discharge zone of the region. Surface water and groundwater flows follow closely the terrain topography. With a source from the Lower and Upper Châteauguay lakes, the Châteauguay River is part of a radial drainage occurring around the Adirondacks mountains from the south to north (Nastev *et al.*, in prep.). The main tributaries to the Châteauguay River are, from west to east, the Trout River, Aux Outardes River, and des Anglais River.

The regional aquifer units are found in the Cambro-Ordovician sedimentary rocks of the St. Lawrence Lowlands (Globensky, 1987). At the base of the sequence, sandstones of

the Potsdam Group are found in the central and southern parts of the study area. They are surrounded by the overlying dolostone of the Beekmantown Group. The northeastern part of the study area is underlain by limestones of the Chazy, Black River and Trenton Groups, and by shales of the Utica and Lorraine Groups. Rock outcrops occur mainly near Covey Hill in the south.

Unconsolidated sediments in the study area were laid down during the last Wisconsin glacial period and the later Champlain sea event (Tremblay, 2006). Till are commonly found to the south. To the north, fine marine clays overlie them. Occasionally, sandy to gravelly sediments of glacial origin can be found on Covey Hill proper as reworked till or in characteristic elongated forms (eskers) in the Châteauguay Valley. The extent and thickness of till and fine marine clays greatly influence recharge and groundwater flow conditions (Croteau, 2006; Nastev *et al.*, in prep.). Various degrees of confinement of the regional rock aquifer occur in the area, depending on the nature of sediment cover. Unconfined conditions are assigned where shallow till (<3 m) occurs or rock outcrops; semi-confined flow conditions are assigned to areas with the presence of more than 3 m of till and/or less than 5 m of clay; confined flow conditions are considered present when the clay layer is at least 5 m thick.

The regional distribution of the recharge rate to the regional aquifer units was determined by Croteau (2006). Recharge is highest on and in the vicinity of Covey Hill (> 170 mm/y) where unconfined conditions and the highest piezometric levels prevail (Nastev *et al.*, in prep.). For this study, watershed limits also correspond to recharge areas. The areas located further downgradient between these recharge areas and the discharge zones, located along major streams, are considered as intermediate areas.

### **2.3 Methodology**

Groundwater samples were collected from 144 private wells, municipality and school wells, observation wells (MDDEP) as well as one spring. In addition to the sites bulk samples, multi-level samples (usually 2-3 samples per well) were collected in 9 observation wells drilled in the rock aquifer at depth intervals isolated by a straddle packer system. Data on these wells can be found in Appendix C (Annexe C). Well depths vary between 6.1 m and 123.4 m. They can be divided in 4 groups according to the host Quaternary units and/or bedrock formations (Figure 2.1). The most important



group comprises 127 wells that intercept rock formations. Twelve intercept the interface between sediments and rock and four are located in sediments (till) with two of these under the uppermost clay. Water from a spring coming from the till was also sampled. Dolostone is the most widely intercepted rock type. Till is mostly found in wells that draw groundwater from sediments, or directly at the rock interface. Sampled groundwater flowed mostly through intermediate areas, between zones of recharge and discharge and under semi-confined conditions, as defined by Croteau (2006).

The standard sampling procedure is described in Appendix B. The water in each well was purged for at least 3 times the water volume initially present in the well and/or until stability of the *in-situ* physico-chemical parameters was attained (T, pH, specific electrical conductivity, DO, Eh). Stability was attained when 3 consecutive measures, taken at 5 minutes intervals, were within the stability criteria.

Samples were analysed in the laboratory for the major, minor and trace inorganic elements. Stable isotopes ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) and radioactive isotopes ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) were analysed on few samples. Microbiological parameters (*E. coli*, total coliforms, atypic colonies) were also determined. A set of 25 chemical parameters was compared with the CCME (2003) standards to define groundwater quality for drinking and irrigation uses. PHREEQC 2.8 (Parkhurst and Appelo, 1999) was used to define concentrations of ionic species for most elements, using *in-situ* physico-chemical parameters as condition indicators. It was also used to calculate saturation index (SI) with respect to various mineral phases and the electronic balance. The electronic balance was used to validate analyses used for modelisation, with an acceptance limit of  $\pm 10\%$  in meq/L. Nevertheless, all the samples were used for the determination of the groundwater quality. Results presented in Appendix F, indicate that 138 samples satisfy electronic balance within  $\pm 5\%$ ; 11 samples were between  $\pm 5\%$  and  $\pm 10\%$  and 1 sample between  $\pm 10\%$  and  $\pm 15\%$ . Nine samples were over  $\pm 15\%$ . These last 9 samples were rejected for further analysis. Electronic balance was not considered for 7 samples because Cl and  $\text{SO}_4$  concentrations were missing. Concentrations of their corresponding ions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) were computed by Aquachem 4.0 (Waterloo Hydrogeologic, 2003), assuming they were the only ions required to satisfy the electronic balance. To sum up, 135 samples were retained for regional assessment (144 when groundwater quality was concerned) and 22 for vertical variation of the chemical composition. Speciation results were also analysed with Aquachem 4.0 for the definition of the water types and Piper diagram presentation.

Statistica 6.0 (Statsoft, 2004) was used to perform basic statistics, as well as multivariate statistical analysis (Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchic Cluster Analysis (HCA)) to determine similarities and correlations (Davis, 1973). HCA was applied to help define geochemical zones in the study area and PCA was used to define the major geochemical and physical processes that control the geochemistry of the groundwater. Both methods used the same data set, which is a matrix of 135 samples by 14 chemicals parameters ( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ). These chemical parameters were previously used by Cloutier (2004).  $\text{HS}^-$  being replaced by Si because of the numerous values below the detection limit (<DL), obtained for total sulphides (Table 2.1), and the possible influence of geochemical processes related to silicate mineral phases.

Statistical analyses generally assume normal or log-normal distribution of chemical concentrations (Güler *et al.*, 2002). In the present case,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and Si concentrations show a mostly normal distribution. Other parameters were log-transformed. Then, each concentration was normalized with the corresponding mean and standard deviation values of the distribution to obtain equal weights in the analysis and to avoid bias by parameters showing highest concentrations (Davis, 1973). For speciation and multivariate statistical analysis, concentrations under detection limit (<DL) were set to half of the DL (Farnham *et al.*, 2002). Few missing concentrations of minor ions such as  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$  and  $\text{Mn}^{2+}$  were estimated from the regional distribution observed in the present study, or from previous studies.

## 2.4 Chemical results and groundwater quality

Table 2.1 summarizes the descriptive statistics of the analytical results as well as a few calculated parameters obtained from the 144 groundwater samples used for the definition of the groundwater quality. The complete chemical data set as well as the multilevel samples data are presented in Appendix F. Descriptive statistics related to geological and hydrogeological contexts are presented in Appendix G. The table also presents CCME criteria and the portion of samples showing quality problems regarding drinking and irrigation uses.

Table 2.1: Summary of the geochemical data

Parameters	Drinking water		Irrigation water		Valid N	min	25%	50%	75%	max
	Criteria	% of samples	Criteria	% of samples						
Temp. (°C)	na	na	na	na	144	8.1	9.0	9.5	10.1	17.9
Specific cond. (uS/cm)	na	na	na	na	144	61	569	773	1049	5090
DO (mg/L)	na	na	na	na	138	0.06	0.16	0.29	0.93	9.35
Eh (mV)	na	na	na	na	133	-221	52	96	150	442
Ag (ug/L)	na	na	na	na	142	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.016
Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	na	na	na	na	143	8.6	190	260	310	1100
Br (ug/L)	na	na	na	na	142	2.0	6.2	11	22	1300
Ca (mg/L)	na	na	na	na	144	1.50	48	70	100	360
DIC (mg/L)	na	na	na	na	143	7.0	46	62	75	250
DOC (mg/L)	na	na	na	na	138	<0.2	0.7	1.1	2.0	85
I (ug/L)	na	na	na	na	142	<0.5	1.00	1.95	4.10	670
K (mg/L)	na	na	na	na	144	0.65	1.95	3.50	5.55	20
Li (ug/L)	na	na	2500	0	142	<0.06	2.40	4.95	7.40	160
Mg (ug/L)	na	na	na	na	144	0.46	22	32	41	70
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/L)	na	na	na	na	144	<0.02	0.02	0.10	0.22	4.50
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> (mg N/L)	na	na	na	na	144	<0.02	<0.02	0.02	0.065	13
Total-N (mg N/L)	na	na	na	na	143	0.02	0.12	0.23	0.43	13.3
Ni (ug/L)	na	na	200	0	142	<0.02	<0.02	0.31	0.78	5.30
P (ug/L)	na	na	na	na	142	<2	<2	9.15	24	1600
Tot. Inorganic P (mg P/L)	na	na	na	na	144	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	1.29
Si (mg/L)	na	na	na	na	142	<0.03	4.70	5.50	6.40	9.90
Sr (ug/L)	na	na	na	na	144	21	280	660	1550	26000
Total sulphides (mg/L)	na	na	na	na	144	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	34
**Aesthetic criteria										
Cl (mg/L)	250	4.2	0.1	18.2	143	<0.1	10	27	70	1200
Color (U.C.V.)	15	3	na	na	139	<1	1	2	4	76
Cu (ug/L)	1000	0	200-1000	0	142	<0.05	0.31	0.82	1.90	62
<sup>a</sup> Hardness (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	200	76	na	na	144	5	205	283	376	733
Fe (ug/L)	300	50.7	5000	0	144	<1	59.5	345	745	4300
<sup>b</sup> H <sub>2</sub> S <sub>(g)</sub> (ug/L)	50	6.3	na	na	144	0.66	3.7	5.5	8.0	4027
<sup>a</sup> TDS (mg/L)	500	56.9	500-3500	57.0	144	31	404	535	710	2834
Mn (ug/L)	50	37.5	200	5.6	143	0.038	11	29	79	690
Na (mg/L)	200	4.2	na	na	144	1.20	11	26	60	1200
pH	6.5-8.5	2.8	na	na	144	5.67	7.22	7.47	7.71	8.49
SO <sub>4</sub> (mg/L)	500	2.1	na	na	138	<0.5	45	75	150	850
Zn (ug/L)	5000	0	na	na	142	<0.7	1.2	3.55	7.0	52.00
**Health criteria										
Al (ug/L)	100	0	5000	0	142	<0.1	0.3	0.5	1.0	46
As (ug/L)	25	0	100	0	142	<0.03	0.19	0.41	0.89	12
B (ug/L)	5000	0	500-6000	3.5	143	3.2	13	41	120	1800
Ba (ug/L)	1000	2.1	na	na	142	1.40	49	91.5	150	5600
Cd (ug/L)	5	0	5.1	0	142	<0.004	0.006	0.010	0.015	0.078
Cr (ug/L)	50	0	na	na	142	<0.04	<0.04	0.11	0.48	6.80
Total cyanides (mg/L)	0.2	0	na	na	144	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	0.015
F (mg/L)	1.5	<1	1	2.8	140	<0.04	0.10	0.175	0.33	3.20
Hg (ug/L)	1	0	na	na	144	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.05
<sup>b</sup> NO <sub>3</sub> (mg/L)	45	<1	na	na	144	0.044	0.044	0.088	0.288	57.6
Pb (ug/L)	10	0	200	0	142	<0.02	<0.02	0.03	0.09	1.40
Se (ug/L)	10	0	20-50	0	142	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.7
U (ug/L)	20	0	10	0	142	0.002	0.087	0.290	0.710	6.6
Isotopes										
<sup>2</sup> H	na	na	na	na	23	-94.4	-85.8	-80.1	-74.1	-66.0
<sup>18</sup> O	na	na	na	na	24	-12.59	-11.90	-11.50	-11.13	-10.00
Tritium	na	na	na	na	23	<0.8	6.1	12.0	14.5	17.8
<sup>13</sup> C	na	na	na	na	23	-21.70	-14.96	-14.13	-12.73	-5.94
<sup>14</sup> C (pmC)	na	na	na	na	23	27.70	55.79	76.12	91.53	99.86
<sup>14</sup> C age <sup>c</sup> (y BP)	na	na	na	na	23	10	710	2190	4690	10310

\*\* : Criteria groups related to drinking water use      a: Calculated      b: Defined species  
c: Uncorrected radiocarbene ages (Libby meanlife of 8033 y)      <: Under detection limit

The highest concentrations are related to the major elements: Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> and anions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. They can reach as much as 1 200 mg/L for Cl and Na. The descriptive statistics presented in Appendix G indicate that elements concentrations are controlled by hydrogeological contexts rather than geological contexts. On the average,

major elements compose more than 92% of the dissolved matter in the sampled water. The range of total dissolved solids (TDS) concentrations indicates that groundwater is mostly fresh (Freeze and Cherry, 1979). The chemical parameters compared to the CCME standards for drinking and agricultural uses are listed in the Table 2.1. A total of 25 parameters were used for drinking water quality: 13 related to health criteria and 12 related to aesthetic criteria. Irrigation water quality was defined based on 16 parameters. Drinking water quality is affected mainly by aesthetic parameters. Quality problems related to hardness, TDS, Fe and Mn are ubiquitous over the study area (Maps 2.2 to 2.17; Appendix I). To a lesser extent, groundwater shows local aesthetic problems related to excessive H<sub>2</sub>S, Cl, Na, Color, pH and SO<sub>4</sub> content. Isolated Ba, F or NO<sub>3</sub><sup>-</sup> quality problems were identified on 5 samples. For irrigation use, groundwater shows quality problems related to B, Cl, F, Mn and TDS.

Most samples analysed for isotopes show the presence of tritium, which is an indication of relatively recent recharge (Clark and Fritz, 1997). Samples that show tritium values under detection limit (<0.8 TU) are located along the south shore of the Châteauguay River between Ormstown and Sainte-Martine. For the purpose of the plot, tritium values lower than the DL were set to DL/2. These low tritium values correlate with the samples showing the oldest uncorrected <sup>14</sup>C ages (Figure 2.2), which should be affected by the presence of dead carbon (<sup>14</sup>C-free carbon). The presence of dead carbon results in the dilution of <sup>14</sup>C in the groundwater samples leading to an increase of the <sup>14</sup>C uncorrected ages. Dead carbon is added in groundwater by dolomite/calcite dissolution. The correlation indicates that groundwater of this sector is submodern (recharge prior to 1952, Clark and Fritz, 1997). The plot shows that tritium increases when <sup>14</sup>C uncorrected ages decrease over ~ 3000 y BP. Groundwater of all recharge areas shows the presence of tritium and <sup>14</sup>C ages mostly lower than 2000 y BP. Groundwater flowing through the Mercier Esker shows the oldest uncorrected <sup>14</sup>C ages of all the recharge area whereas Covey Hill has one of the youngest. Uncorrected ages at the Mercier Esker could be an indication of the inversion of the flow direction that is now occurring from the bedrock to the esker due to high groundwater pumping applied in order to control groundwater contamination (Racine, 2005). Uncorrected <sup>14</sup>C ages indicate that groundwater of widely variable ages are present in the watershed.

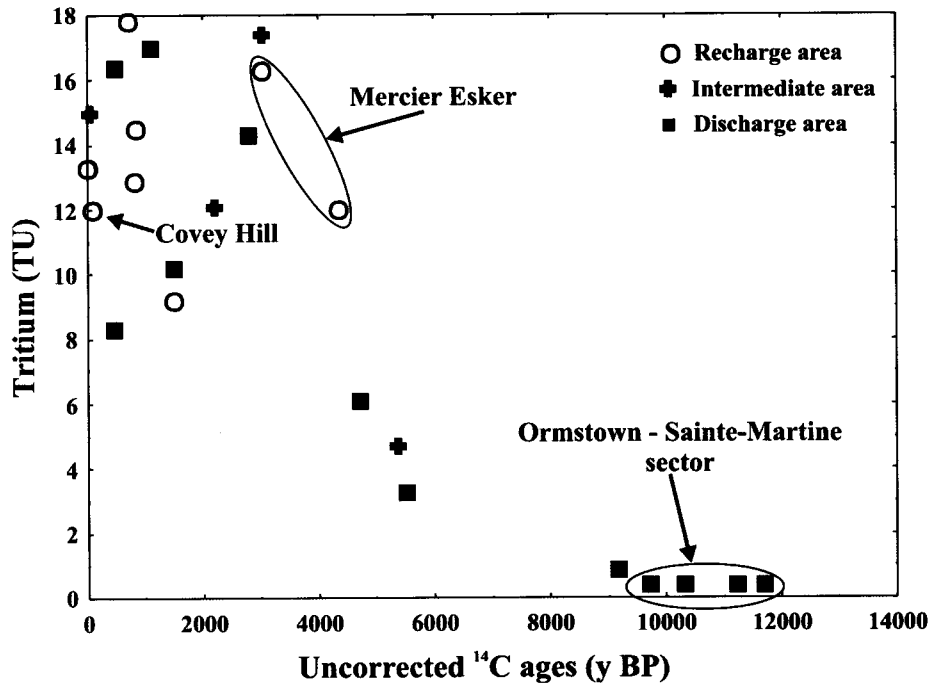


Figure 2.2: Relation between tritium and <sup>14</sup>C uncorrected ages

## 2.5. Groundwater chemistry

### 2.5.1 Water types

The definition of water types is based on major ion concentrations in meq/L and categorize the global chemical composition of samples and correlate groundwater chemical composition with geological and hydrogeological contexts. Water types were defined in Piper diagram, with  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  as major cations and  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  as major anions. Twelve water types were thus defined: 7 with dominant major ions: Ca- $\text{HCO}_3$ , Mg- $\text{HCO}_3$ , Na- $\text{HCO}_3$ , Na-Cl, Ca- $\text{SO}_4$ , Na- $\text{SO}_4$ , Ca-Cl, and 5 with mixed ions: alkaline earth ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )- $\text{HCO}_3$ , Mixed (Mx) cations- $\text{HCO}_3$ , Mx cations-Cl, Na-Mx anions, Ca-Mx anions. Criteria to define a group were: single cation or anion with a proportion higher than 20% in meq/L, or 2 or 3 cations or anions with concentration between 10% and 20% (Cloutier, 2004). Table 2.2 presents the median concentrations in mg/L of each major ion for all 12 water types for the 135 samples retained for the regional assessment. Complete descriptive statistics are presented in Appendix H.

Table 2.2: Median concentrations for all the water types

Type Groups	Water types	Samples (N)	Median concentrations (mg/L)						
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
G1	Alk earth-HCO <sub>3</sub>	2	44.0	25.4	23.9	4.2	286	13.0	53.2
	Ca-HCO <sub>3</sub>	78	71.5	29.2	12.9	2.4	308	25.0	49.9
	Mg-HCO <sub>3</sub>	5	43.2	38.0	27.8	3.0	272	11.0	54.0
G2	Mx cations-HCO <sub>3</sub>	14	54.8	31.2	51.2	4.0	327	34.0	67.6
	Na-HCO <sub>3</sub>	12	25.5	21.5	120	4.4	335	52.5	58.5
G3	Mx cations-Cl	2	108	50.8	106	3.3	352	275	72.3
	Na-Cl	8	36.2	24.3	328	15.9	260	360	162
	Na-Mx anions	1	53.0	46.6	188	8.8	294	160	257
G4	Ca-SO <sub>4</sub>	9	137	12.8	15.4	3.6	200	15.0	273
	Na-SO <sub>4</sub>	1	136	26.8	188	15.1	152	230	440
G5	Ca-Cl	2	13.5	3.0	9.5	1.7	27.9	24.0	13.7
	Ca-Mx anions	1	119	41.2	63.7	3.1	272	130	100

Table 2.2 shows that the dominant water type in the study area is by far the Ca-HCO<sub>3</sub> type. The second and the third most presented water types are the Mx cations-HCO<sub>3</sub> and the Na-HCO<sub>3</sub> types. Based on the Basses-Laurentides study, the 12 water types were further assembled into 5 groups, G1 through G5 (Cloutier, 2004). The Figure 2.3 presents the water types distribution and groups into a given Piper diagram (Piper, 1944). This classification of water types simplifies the discussion about processes and regional distribution of water types.

Figure 2.3 shows that groundwater in the study area has a wide range of chemical composition. Water types Ca-HCO<sub>3</sub>, Mg-HCO<sub>3</sub> and Alk earth-HCO<sub>3</sub> (85 samples) occupy a relatively small surface of the Piper diagram. This clustering is defined as G1 and is dominated by the Ca-HCO<sub>3</sub> water type. The G2 group occupies the largest area in the diagram. The 26 samples of this group are defined by the Mx cations-HCO<sub>3</sub> and Na-HCO<sub>3</sub> water types. Group G3 with 11 samples and G4 with 10 samples are respectively dominated by Na-Cl and Ca-SO<sub>4</sub> water types. With only 3 samples, G5 is the smallest group. Regional distribution of the water types (Figure 2.11) shows that Ca-HCO<sub>3</sub> type of the group G1 dominates in all hydrogeological and geological settings

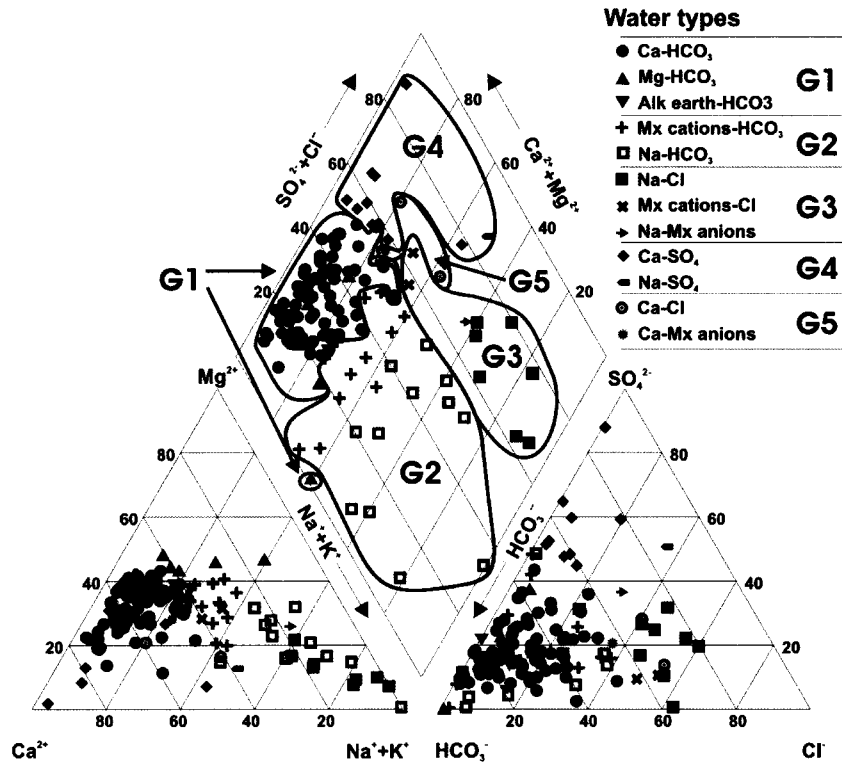


Figure 2.3: Water types distribution and groups (G1 through G5)

The analytical results from the multi-level samples were used to study the vertical variation of the chemical composition. For each of the 9 sampled rock wells, the samples collected at different depths show weak variation of the ion concentrations, mainly  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ , and similar TDS as for tritium and  $^{14}\text{C}$  analyzed on multilevel samples of two wells. In addition, in most of the wells the same water type was observed for all collected samples. Only two wells show change of the water type with depth. One well shows the water type changing from  $\text{Ca-HCO}_3$  to  $\text{Mx cations-HCO}_3$ , whereas the other one changed from  $\text{Alk earth-HCO}_3$  to  $\text{Mx cations-HCO}_3$ . This can be explained by the gain of the  $\text{Na}^+$  with depth. However, as depicted on the Piper diagram (Figure 2.3), these water types are still close in major ions composition.

### 2.5.2 HCA and groundwater grouping

Results of the HCA are presented with a dendrogram in Figure 2.4. HCA allowed the grouping of groundwater samples into clusters of relatively homogenous chemical characteristics. This method defines the chemical similarities between each possible pairs of samples measured by the Euclidean distance (Davis, 1973). Closest sample pairs with highest similarities were grouped first. These groups were further joined by a

linkage rule according to Ward's method (Davis, 1973). The procedure was repeated until all samples were linked. This was applied to help define geochemical zones in the study area as done for the Basse-Laurentides study.

In Figure 2.4, the phenon line is used to define the number of resulting clusters. It was positioned at a linkage distance of 19, to define a number of major clusters (6) similar as defined by Cloutier (2004). The Stiff diagram (Stiff, 1951) associated to the mean chemical composition of each cluster shows the pattern related to the concentration of the most important major ions for each cluster. Descriptive statistics of the chemical parameters for each cluster are presented in Appendix H and summarized in Table 2.3. The table 2.3 presents the highest median for a given ion or parameter in bold characters, whereas the lowest median is underlined.

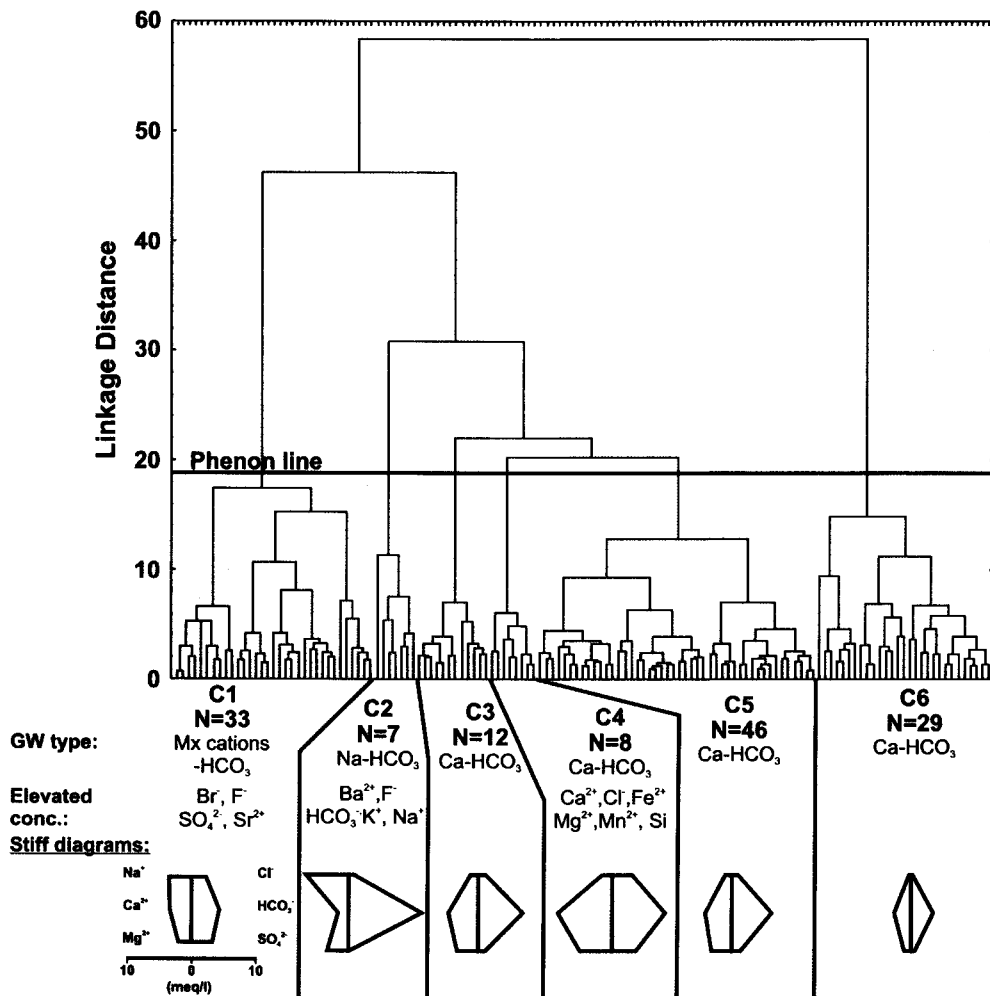


Figure 2.4: Dendrogram and mean chemical composition of clusters with Stiff diagrams



Table 2.3: Median concentrations (mg/L) for each cluster

Cluster	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Samples (N)	33	7	12	8	46	29
Ca <sup>2+</sup>	67.1	<u>27.0</u>	78.8	<b>143</b>	70.3	44.5
Mg <sup>2+</sup>	24.6	33.9	33.8	<b>51.4</b>	32.5	<u>10.9</u>
Na <sup>+</sup>	79.5	<b>129</b>	23.4	29.9	19.7	<u>6.5</u>
K <sup>+</sup>	5.3	<b>8.8</b>	6.5	2.6	3.1	<u>1.7</u>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	260	<b>589</b>	358	426	320	<u>178</u>
Cl <sup>-</sup>	78.0	25.0	35.0	<b>94.0</b>	29.0	<u>6.6</u>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>153</b>	<u>4.8</u>	44.0	150	53.8	23.2
Ba <sup>2+</sup>	<u>0.026</u>	<b>0.788</b>	0.058	0.067	0.110	0.081
Br <sup>-</sup>	<b>0.076</b>	0.035	0.008	0.022	0.011	<u>0.005</u>
F <sup>-</sup>	<b>0.384</b>	<b>0.384</b>	<u>0.076</u>	0.110	0.146	0.116
Fe <sup>2+</sup>	0.242	0.067	<u>0.003</u>	<b>1.1</b>	0.316	0.020
Mn <sup>2+</sup>	0.017	<u>0.002</u>	<u>0.002</u>	<b>0.123</b>	0.036	0.012
Sr <sup>2+</sup>	<b>2.7</b>	0.842	0.272	0.560	0.555	<u>0.207</u>
Si	5.3	5.7	5.0	<b>7.6</b>	5.8	<u>4.9</u>
TDS	645	559	619	<b>1114</b>	535	<u>303</u>
Hardness	275	192	338	<b>569</b>	310	<u>173</u>
Casing length	14.2	<b>25.9</b>	9.0	11.9	12.2	<u>7.0</u>
Median water type	Mix cations-HCO <sub>3</sub>	Na-HCO <sub>3</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>

Cluster C1 is characterised by a mixed cations-HCO<sub>3</sub> water type and has the highest median concentrations for SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Br<sup>-</sup>, F<sup>-</sup> and Sr<sup>2+</sup>. Relative to the other clusters, it has elevated concentrations in Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup>. Cluster C2 has a Na-HCO<sub>3</sub> water type characterized by the highest median concentrations for Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ba<sup>2+</sup> and F<sup>-</sup>. Cluster C2 is also characterized by the lowest median concentrations for Ca<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. This cluster has also the highest median casing length, suggesting that wells corresponding to this cluster are located deeper. Cluster C3 has a Ca-HCO<sub>3</sub> water type characterized by the lowest median concentrations for F<sup>-</sup>, Fe<sup>2+</sup> and Mn<sup>2+</sup>. Low values of Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Br<sup>-</sup>, Sr<sup>2+</sup> are also common for the samples of this cluster. Cluster C4, also has a Ca-HCO<sub>3</sub> water type, is characterized by the highest median concentrations for Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Si, TDS and Hardness as well as high SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Cluster 5 has again a Ca-HCO<sub>3</sub> water type. It is not characterized by the highest or the lowest values of the clusters but it appears that median concentrations for most of the parameters are low. Finally, also with a Ca-HCO<sub>3</sub> water type, Cluster 6 is characterized by the lowest median concentrations of the clusters for more than half of the chemical parameters and for the casing length. Cluster 6 thus regroups the shallowest and freshest groundwater among the clusters.

### 2.5.3 PCA and geochemical processes

PCA extracts correlations and reduces the number of data in components that explain a portion of the total variance between chemical parameters (explained variance). This explained variance is mostly related to the chemical parameters showing the highest loading factor (>0.7). Resulting loading factors were obtained using Varimax rotation (Davis, 1973). These high loaded chemical parameters were used for the definition of the processes. For this study, 5 components were defined and are presented in Table 2.4.

Table 2.4: PCA components and loading factors

Parameters	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5
Ba <sup>2+</sup>	0.068	0.185	0.310	<b>-0.785</b>	-0.152
Br <sup>-</sup>	<b>0.853</b>	0.028	-0.031	0.082	0.328
Ca <sup>2+</sup>	0.037	0.348	0.347	<b>0.725</b>	-0.186
Cl <sup>-</sup>	<b>0.848</b>	0.170	0.115	0.134	-0.149
F <sup>-</sup>	0.274	0.012	-0.035	-0.042	<b>0.883</b>
Fe <sup>2+</sup>	0.071	<b>0.900</b>	0.119	-0.007	0.107
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.513	-0.117	<b>0.718</b>	-0.125	-0.059
K <sup>+</sup>	0.643	-0.057	0.130	0.073	0.335
Mg <sup>2+</sup>	0.339	0.119	<b>0.815</b>	0.139	-0.056
Mn <sup>2+</sup>	-0.023	<b>0.913</b>	0.046	0.163	0.041
Na <sup>+</sup>	<b>0.821</b>	-0.046	0.183	-0.030	0.359
Si	-0.166	0.163	<b>0.791</b>	-0.056	0.182
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.233	0.167	0.041	<b>0.833</b>	0.187
Sr <sup>2+</sup>	0.205	0.193	0.109	0.297	<b>0.800</b>
Exp. Variance (%)	22.3	14.0	15.1	14.4	13.8
Cumulative (%)	22.3	36.3	51.4	65.8	79.6

Bold values: loading >0.7

Approximately 80% of the total variance is explained by 5 components that can be related to dominant chemical species or processes (Table 2.4). Component 1 is related to salinity (Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>), Component 2 to dissolution of Fe-Mn bearing minerals (Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>), Component 3 to dolomite dissolution in bedrock and unconsolidated sediments (Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Component 4 to gypsum dissolution also identified in geological materials (Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), and Component 5 to dissolution of F-Sr bearing minerals (F<sup>-</sup>, Sr<sup>2+</sup>).

Figure 2.5 shows the processes related to the salinity component. Cl<sup>-</sup> and Br<sup>-</sup> ions are generally used for the identification of salinity origin and related processes (Richter *et al.* 1993). Two major trends can be identified in Figure 2.5. The first shows a similar Cl<sup>-</sup>/Br<sup>-</sup> ratio with the increase of Cl<sup>-</sup> concentrations and is mainly correlated to water types of

groups G2 and G3. Because of the former presence of saline water (Champlain Sea) during the geological history of the study area, this trend can be associated to water mixing between fresh water and remnants of the Champlain Sea water. The Champlain Sea retreat, around 9500 years ago and could have left saline water in geological material.

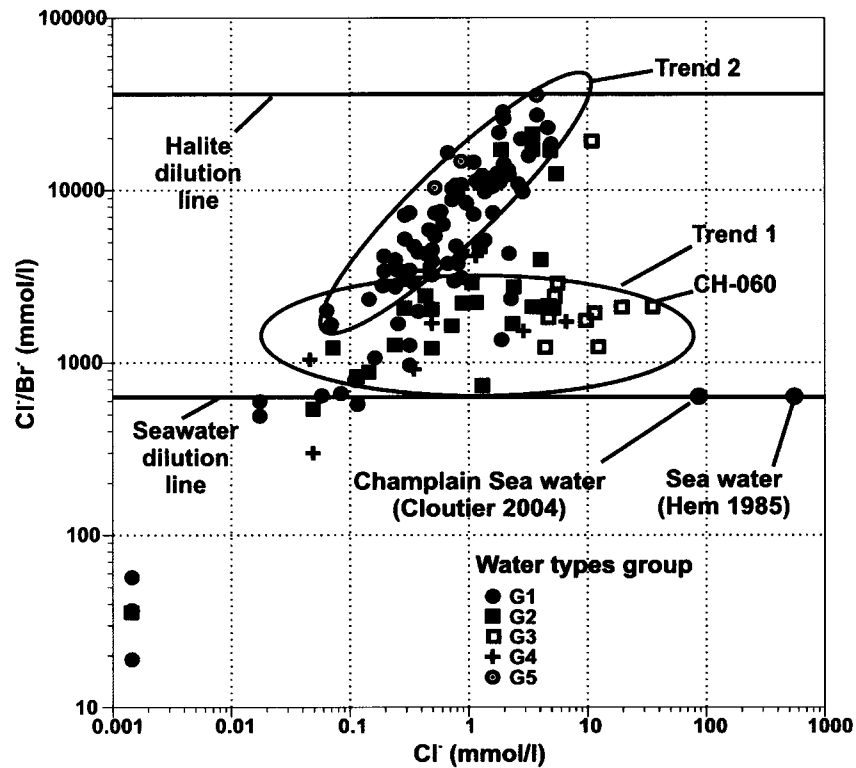


Figure 2.5: Processes related to salinity (Component 1) based on  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  vs  $\text{Cl}^-$  trends

The range of  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  ratio for the samples, however, is higher than the one observed by Cloutier (2004). This could be explained by the second trend where the  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  ratio increases with the increase of  $\text{Cl}^-$  concentrations. The additional source of  $\text{Cl}^-$  would be halite ( $\text{NaCl}$ ) dissolution (equation 1), whose presence was identified in the dolostone (Globensky, 1987) and marine clay (Tremblay, 2006).



There are no indications of road salt dissolution, which could also be a possible explanation of this second trend, as observed for the Basses-Laurentides study. The  $\text{Br}^-$  content was also considered to evaluate the proportion of fresh water and Champlain Sea water in the study area. The saline end member was obtained from the CH-060

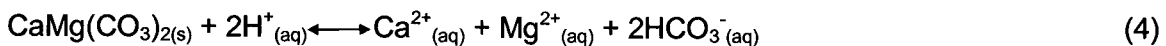
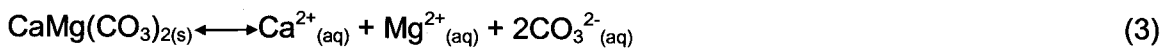
sample (Figure 2.5) that is characterized by Na-Cl water type with the highest Br<sup>-</sup> concentration (1.3 mg/L) and TDS (2834 mg/L). Uncorrected <sup>14</sup>C age of this sample is 10310 BP and it is located in an area where tritium values are under DL (<0.8 TU). The ratio between Br<sup>-</sup> concentration of this sample and that of the Champlain Sea, 23 mg/L (Cloutier, 2004), indicates that the most saline sampled water is a mixture of 6% of Champlain sea water and 94% of fresh water.

The processes associated to PCA Components 3 and 4 are shown in Figure 2.6. The ratio between the sum of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> concentrations and the sum of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations for the majority of samples is aligned on a 1-1 line. This is an indication that for these samples, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ions originate from 2 main sources interpreted as dolomite (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2(s)</sub>) and gypsum (CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O<sub>(s)</sub>) dissolution, since they are commonly present in the sediment cover and the basement rocks. Groundwaters are unsaturated relative to gypsum (Figure 2.7) and the dissolution process could have followed the reaction expressed by equation 2 (Appelo and Postma, 1999).



Figure 2.7 shows that groundwaters are mostly in equilibrium or oversaturated with respect to barite (BaSO<sub>4(s)</sub>), which was identified in geological material in the area. Together with the negative loading of Ba<sup>2+</sup> ions, this indicates that barite precipitation has a possible control on gypsum dissolution process.

Generally, in groundwater systems, dolomite dissolution will occur following equation 3 if groundwaters are unsaturated and following equation 4 if dolomite is attacked by proton (H<sup>+</sup>).



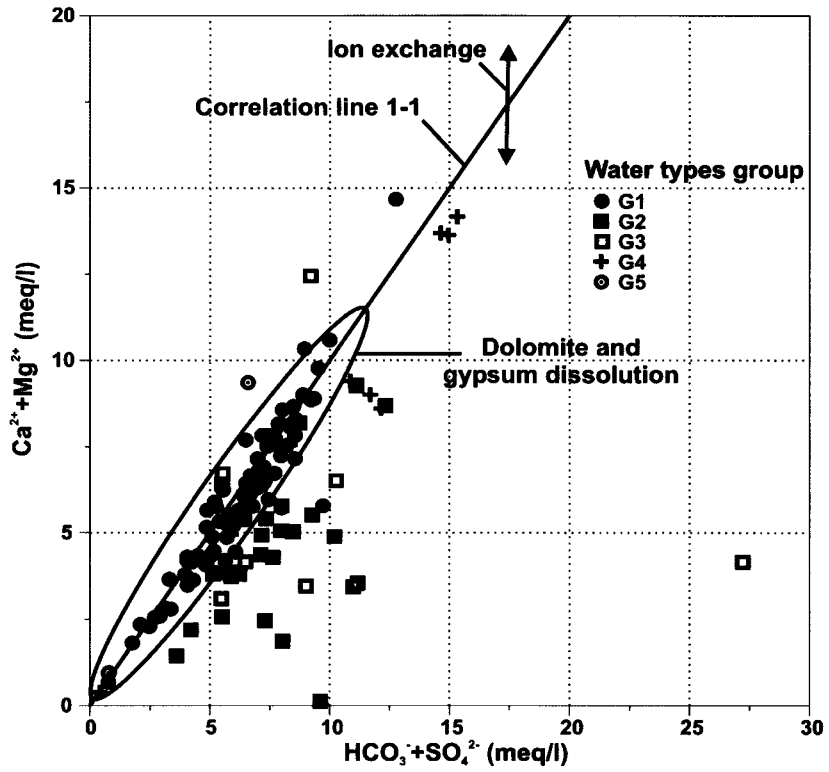


Figure 2.6: Processes related to Components 3 and 4

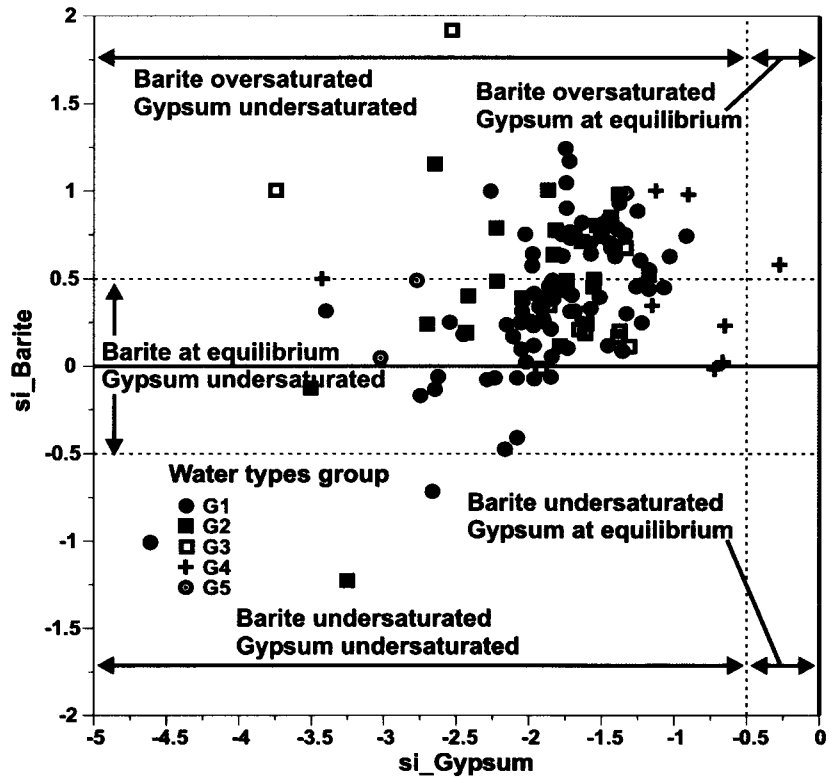


Figure 2.7: Relationship between barite and gypsum saturation indexes

Figure 2.8 presents the relation between dolomite and calcite ( $\text{CaCO}_{3(s)}$ ) saturation indexes. Those minerals were also identified in the geological material present in the area. Figure 2.8 shows that calcite dissolution is possible and it usually occurs in the same manner as dolomite dissolution. In Figure 2.8, the rate of increase of calcite SI with dolomite SI is lower when calcite and dolomite saturation are met. This suggests that calcite precipitation could exert a possible control over dolomite dissolution.

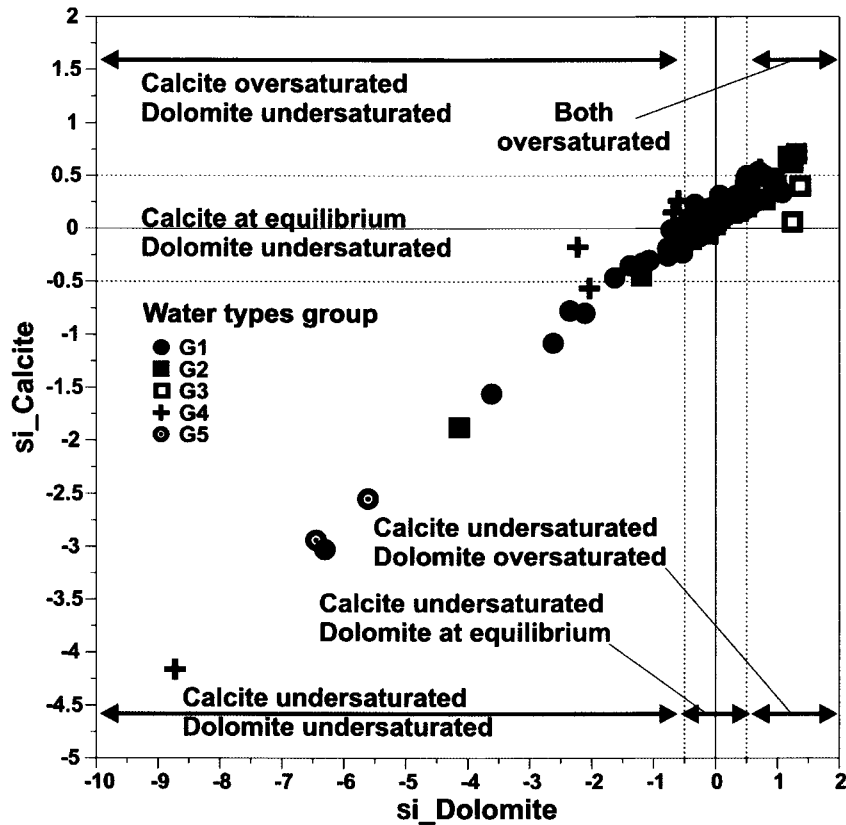
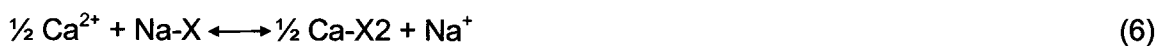
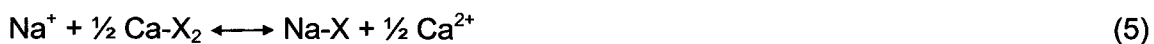


Figure 2.8: Relationship between dolomite and calcite saturation indexes

Samples, mainly of groups G2 and G3, show a net deficit in  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  concentrations (Figure 2.6). This can be interpreted as related to ion exchange (equation 5 and 6, Appelo and Postma, 1999), where the deficit in  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  or in  $\text{Na}^+$  correlates with the surplus of  $\text{Na}^+$  or  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  (Figure 2.9, Fisher and Mullican, 1997; Miretzky *et al.*, 2000). The ion exchange process seems to occur for all samples and it appears more intensive for samples of groups G2 and G3 (Figure 2.9).



Where X refers to an exchanging site.

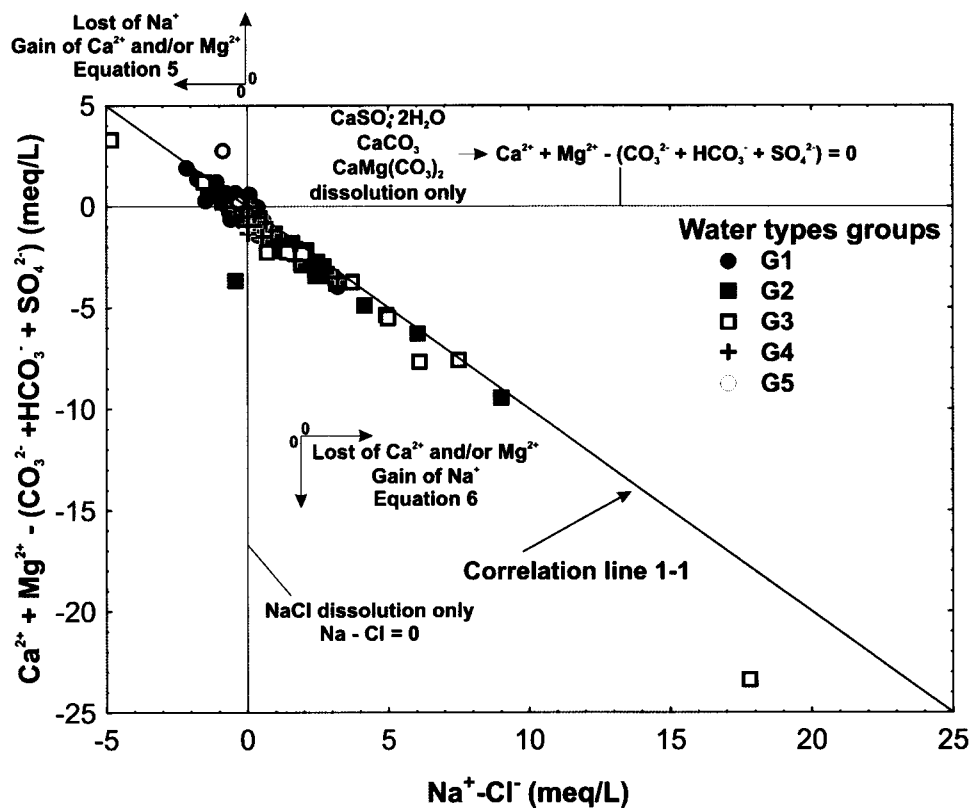


Figure 2.9: Graph showing evidence of the ion exchange process

### 2.5.4 Correlation between groundwater classifications

The Piper diagram in the Figure 2.10 presents the groundwater samples distribution inside G1 to G5 fields of Figure 2.3, with symbols according to their cluster number C1 to C6 in Figure 2.4. Groundwater samples belonging to groups G2 and G3 belong mostly to Clusters C1 and C2. G4 groundwaters are also mostly related to Cluster C1. The 3 samples of group G5 are in Clusters C5 and C6. Samples of group G1 are found in every cluster but Clusters C5 and C6 contain most of the samples from this group.

Tables 2.5a to 2.5d present 4 matrices relating various systems of classification of water samples, that is, clusters vs water type groups (a), clusters vs dominant components (b), clusters vs groundwater flow conditions, and groundwater groups vs dominant components (d). The numbers in these tables indicates the number of samples. Bold numbers highlight the major relations.

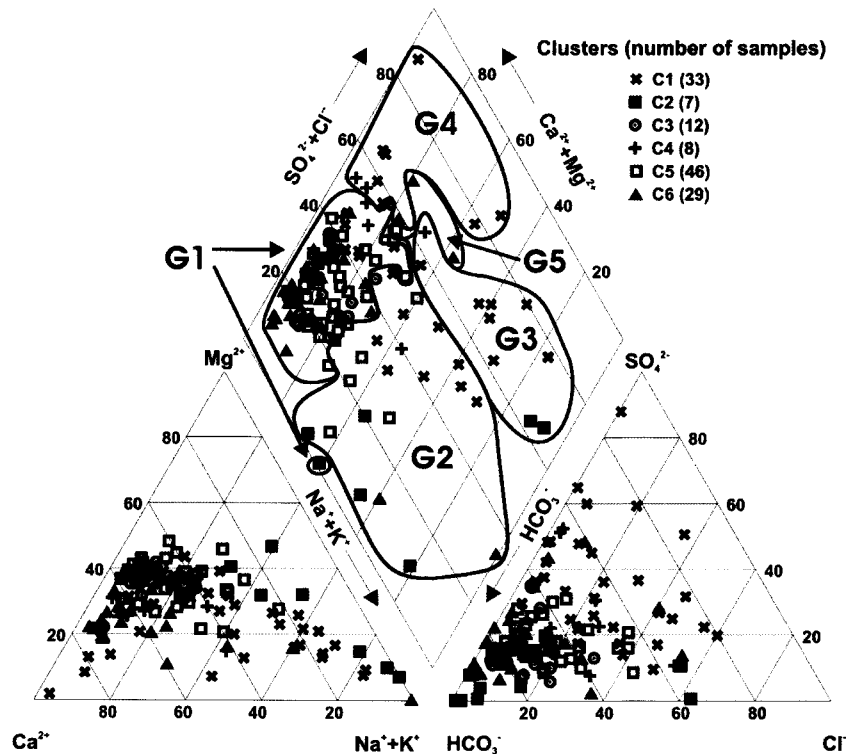


Figure 2.10: Relationship between groups of water types and clusters

The relationship between clusters and groups illustrated in Figure 2.10 and discussed previously are shown in Table 2.5a. Table 2.5b shows that Component 2 related to the dissolution of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  bearing minerals is dominant for the majority of the samples of Clusters C5 and C6 as well as G1 group (Table 2.5d). Component 3 related to dolomite dissolution is also important for samples that belong to G1. The weak loading factor (Table 2.4) of  $\text{HCO}_3^-$  ions related to Component 2 indicates that concentrations of  $\text{HCO}_3^-$  are independent of those of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$ . Thus, other processes besides dolomite dissolution and possibly calcite dissolution should play a major role in the presence Ca- $\text{HCO}_3$  water type. Table 2.5c indicates that groundwater samples of Clusters C5 and C6 are mostly found under semi-confined conditions for C5, as well as under unconfined conditions for C6. Table 2.5d shows that Component 1 related to salinity is dominant for water types of group G3 and important for Group G2. Processes of groundwater mixing between fresh groundwater and former stagnant Champlain Sea water and possibly halite dissolution may play an important role on the chemistry of samples categorized in Clusters C1 and C2. Compared to samples of group G1, samples of group G2 show an increase in the proportion of  $\text{Na}^+$  ions over  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  ions, whereas  $\text{HCO}_3^-$  ions are still dominant (Figure 2.10). This suggests that ion



exchange is an important process for groundwater samples of group G2. Figure 2.9 has previously suggested that ion exchange is also an important process for the groundwater samples of Group G3. Table 2.5c clearly indicates that groundwater in Clusters C1 and C2 are mostly found under semi-confined and confined groundwater flow conditions.

Tables 2.5: Relations between groundwater samples classifications. Tables show number of samples falling in corresponding classifications: a) clusters and groups, b) clusters and dominant component, c) clusters and flow conditions, d) dominant component and groups. Tables show the dominant water type of each group and cluster and processes related to component are indicated

		Groups					Tot	
		Ca-HCO <sub>3</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>	Na-Cl	Ca-SO <sub>4</sub>	Ca-Cl		
Clusters	Mx cations-HCO <sub>3</sub>	C1	8	10	8	7	0	33
	Na-HCO <sub>3</sub>	C2	1	4	2	0	0	7
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C3	11	1	0	0	0	12
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C4	4	1	1	2	0	8
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C5	37	8	0	0	1	46
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C6	24	2	0	1	2	29
Tot			85	26	11	10	3	

		Components					Tot	
		Salinity	Fe-Mn diss.	Dol. diss.	Gyp. diss.	F-Sr diss.		
Clusters	Mx cations-HCO <sub>3</sub>	C1	11	1	1	10	10	33
	Na-HCO <sub>3</sub>	C2	4	0	2	0	1	7
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C3	4	0	4	4	0	12
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C4	0	0	6	2	0	8
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C5	4	21	14	2	5	46
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C6	2	13	3	6	5	29
Tot			25	35	30	24	21	

		Flow cond.			Tot	
		Unconf.	S.-conf.	Conf.		
Clusters	Mx cations-HCO <sub>3</sub>	C1	3	16	14	33
	Na-HCO <sub>3</sub>	C2	0	1	6	7
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C3	0	10	2	12
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C4	0	8	0	8
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C5	4	29	13	46
	Ca-HCO <sub>3</sub>	C6	12	15	2	29
Tot			19	79	37	

		Groups					Tot	
		Ca-HCO <sub>3</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>	Na-Cl	Ca-SO <sub>4</sub>	Ca-Cl		
Components	Salinity	PC1	6	9	9	0	1	25
	Fe-Mn diss.	PC2	29	3	0	1	2	35
	Dol. diss.	PC3	24	4	1	1	0	30
	Gyp. diss.	PC4	15	2	0	7	0	24
	F-Sr diss.	PC5	11	8	1	1	0	21
	Tot			85	26	11	10	3

Groundwater samples in Clusters C3 and C4 belong to groundwater Group G1 (as for Cluster C5 and C6), but these samples show Component 2 as indicative of dominant processes. Component 3 is dominant for Cluster C4, whereas Components 1 and 4 are related to Cluster C3. Samples of these clusters are preferentially located under semi-confined conditions. The Ca-SO<sub>4</sub> water types belonging to Group G4 are mostly in Cluster C1. They show Component 4, related to gypsum dissolution, as indicative of the dominant process. Groundwater samples of Groups G2 and G3 are mostly found under confined and semi-confined conditions. Samples belonging to Group G5 are categorized in Clusters C5 and C6. Components 2 and 1 characterize these samples.

### 2.5.5 Geochemical zones

Figure 2.11 presents geochemical zones based on the general correlations between water types groups and clusters.

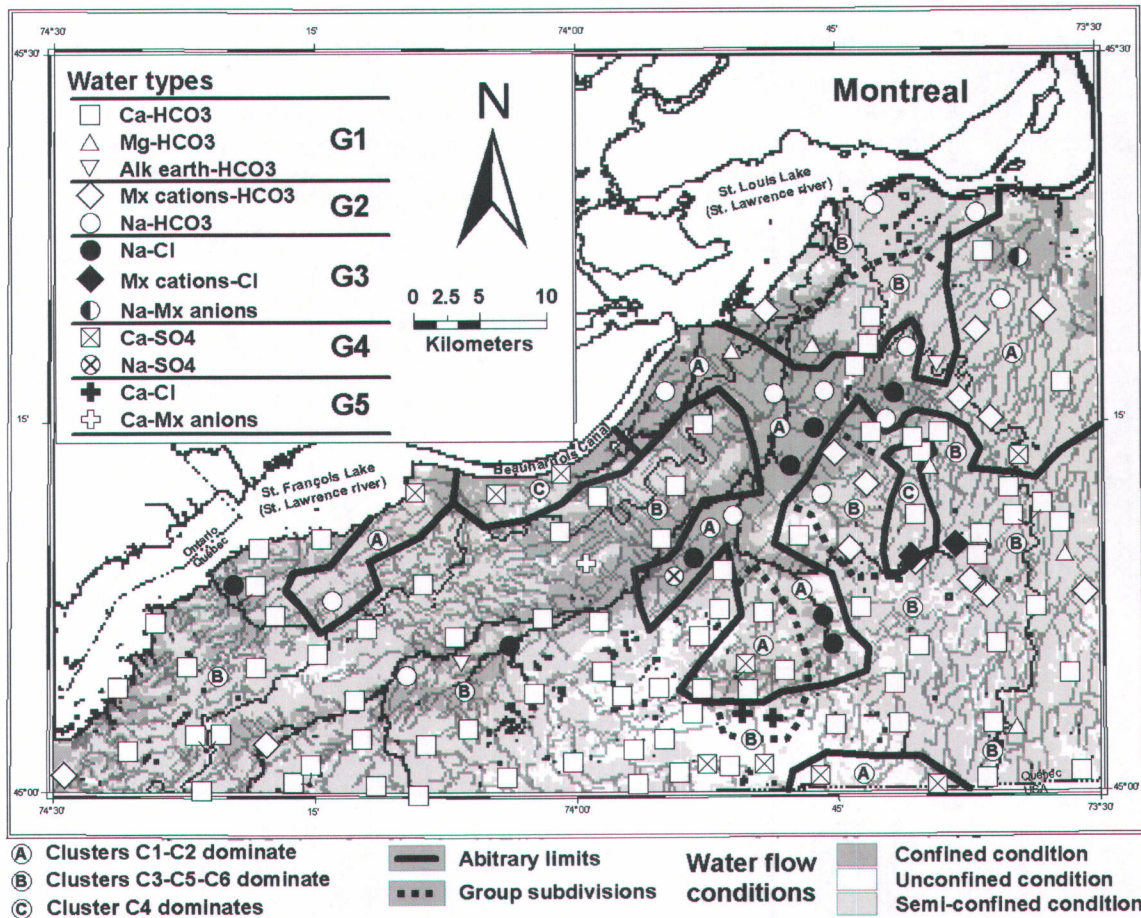


Figure 2.11: Geochemical zones based on the correlations between groups and clusters

The somewhat arbitrary limits used for the zoning are based on the previous correlations observed and discussed in Section 2.5.4. In some sectors, samples of particular clusters were unique and could not be zoned inside their respective zone. Those samples were zoned within the dominant surrounding clusters. Following the correlations, samples of Clusters C1 and C2 were zoned together as well as Clusters C5 and C6. Samples of Cluster C3 were joined to Clusters C5 and C6 because samples of Group G1 dominate this cluster and because median concentrations (Table 2.4) are mostly low. Samples of Clusters C4 are zoned alone because this cluster is the only one dominated by water types of Group G1 that show the highest median concentrations for some ions as well as

dolomite dissolution related to dominant Component 3. Also based on the correlations, dashed lines subdivide important zones of water type groups inside some cluster zones.

Recharge areas, Covey Hill and watershed limits mostly under unconfined and semi-confined conditions, are characterized by groundwater of Ca-HCO<sub>3</sub> type of Group G1 that belong to the Clusters association C3-C5-C6. However, groundwater recharge at Covey Hill exhibits both Ca-HCO<sub>3</sub> water as well as Ca-SO<sub>4</sub> of Group G4. In the North-eastern part of the watershed, between Mercier and Saint-Rémi, groundwater recharge under semi-confined conditions shows water types of Group G2 that belong to Clusters C1-C2.

Intermediate areas are generally characterized by groundwater similar as the one found in recharge areas, that is water types of Group G1 belonging to Clusters C3-C5-C6. These groundwaters are found under a combination of unconfined and semi-confined conditions in the area delimited by the Aux Outardes River to the West, Howick and Norton Creek in the North. This type of groundwater is also found in the intermediate areas under confined and semi-confined conditions in the western part of the study area between the St. Lawrence and Châteauguay Rivers. Groundwater characterized by water types of Group G2 zoned with Clusters C3-C5-C6 is found in intermediate areas under a succession of semi-confined and confined conditions East of Sainte-Martine. Under similar flow conditions, groundwaters related to Clusters C1-C2 that belong to Groups G2-G3 are found North of Saint-Rémi to Saint-Constant and Southeast of Mercier.

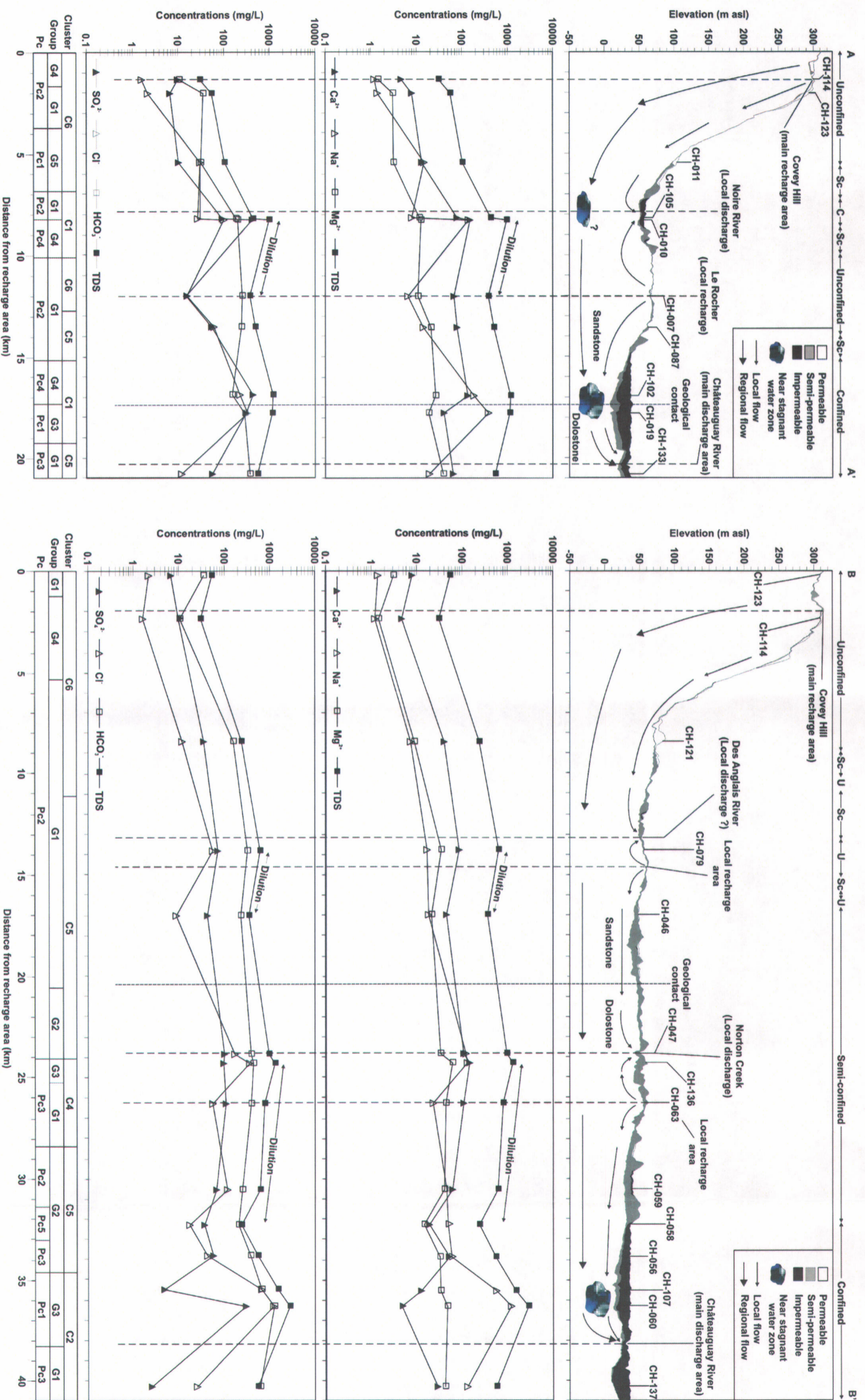
Discharge areas along the St. Lawrence River show variations in the correlations of groundwater classifications. From Saint-François Lake through the Southwest, groundwaters are of Ca-HCO<sub>3</sub> water type of Group G1 that belonging to the Clusters association C3-C5-C6. This portion along the river is characterized by a variety of confined and semi-confined groundwater flow conditions. Along the Beauharnois Canal where confined conditions prevail, groundwater belongs to Cluster C4 with Group G4 water type in the Southern part, and with Group G2 water types belonging to Clusters C1-C2 in the Northern part of the canal. To the North, where semi-confined conditions prevail, groundwater still belongs to Group G2 but changes for the Clusters association C3-C5-C6. A similar pattern of correlation variations is observed along the Châteauguay River, where a variety of confined and semi-confined conditions prevails. On the North

shore and the Southwest portion from Ormstown, groundwaters are mostly of Ca-HCO<sub>3</sub> water type of Group G1 belonging to Clusters association C3-C5-C6. Where confined conditions cover a large area, water type of Groups G2 and G3 that belong to the Clusters association C1-C2 characterize groundwater. This is observed for the sector between Ormstown and Mercier previously identified as an area where remnant Champlain Sea water occurred. Groundwater of Groups G2-G3, related to Clusters C1-C2, characterize an area near Aux Anglais River where confined conditions are present. At the Norton Creek, a discharge area under semi-confined conditions is mostly characterized by groundwater of Groups G2-G3 belonging to Clusters C3-C5-C6.

## **2.6. Groundwater spatial evolution**

### **2.6.1 Geochemical cross sections**

The general correlations between clusters, groups of water types, components and groundwater flow conditions are specifically illustrated along two main groundwater flow paths in the two cross-sections shown in Figures 2.12 and 2.13. The locations of these sections are presented in Figure 2.1. They feature areas with different general groundwater flow path lengths, exhibiting marked variations in water types, from Covey Hill, which is considered as the main regional groundwater recharge area (Croteau, 2006), all the way to the Châteauguay River, which is considered as the main discharge area within the watershed (Lavigne, 2006). The top of Figures 2.12 and 2.13 shows the surface and bedrock topography, the nature and thickness of the surficial sediments that control aquifer conditions (permeable rock, sand and gravel and organic deposits, semi-permeable till, and “impermeable” clay), groundwater flow conditions (confined, semi-confined and unconfined), inferred local and regional flow directions, relative position of sampling wells and indications of morphological features (rivers, hill, etc...).



Figures 2.12 (left) and 2.13 (right): Geological, hydrogeological and geochemical cross sections A-A' and B-B' (Location shown on Figure 2.1). The top figure shows a geological cross section with inferred local and regional groundwater flow paths. The location and name of water samples are also shown on the top figure. Flow conditions indicated on top of the figure are based on the surficial geology (Unconfined, U; Semi-Confined, Sc; Confined, C). The two lower figures respectively show the concentrations of the main cations and anions. The boxes at the bottom of the figure indicate the classifications of the groundwater according to cluster analysis, water type Groups and principal components (Pc) analysis of the water samples.



The two graphs below show the concentrations of major cations and anions. Boxes at the bottom indicate samples classification according to cluster analysis, water type and principal component analysis, with distance from the recharge area. Some interpretations are also indicated on the cross sections. On both cross sections, the geological contact between sandstone and dolostone is indicated.

## **2.6.2 Geochemical processes**

### ***General geochemical variations***

On cross section A-A' (Figure 2.12), the main geochemical trend observed is an increase in ion concentrations starting in the main unconfined recharge area, on Covey Hill. TDS increases from about 30 mg/L to 996 mg/L at the Noire River, where confined conditions prevail (station CH-010). Through Le Rocher, where unconfined conditions prevail, TDS decline to 378 mg/L (station CH-007). Increase in ion concentrations resumes from Le Rocher to the Châteauguay River, where mostly confined conditions prevail. TDS reach is highest values with 1188 mg/L, at station CH-102, and 1148 mg/L, at station CH-019.

The variations in ions concentrations along the first 24 km of cross section B-B', from Covey Hill to Norton Creek, is similar to what is observed over the total length of cross section A-A'. TDS increase from 30 mg/L to 628 mg/L at station CH-079. Along that path, groundwater flows from unconfined conditions at the recharge area through mixed semi-confined and unconfined flow conditions. Ion concentrations decrease between stations CH-079 and the next one CH-046, down to 355 mg/L. From there, semi-confined conditions prevail all the way to the Norton Creek, with an increasing trend in ion concentrations and a second peak in TDS, with 1294 mg/L reached at station CH-136. In the last portion of cross section B-B', groundwater flows under a succession of semi-confined and confined conditions. Where under semi-confined conditions prevail (CH-063, CH-058), ion concentrations decrease. The lowest TDS value is reached at station CH-058, with a value of 237 mg/L. The final portion of cross section B-B' is marked by an increase of ion concentrations towards the Châteauguay River where confined conditions prevail. TDS reach their highest concentration, with 2834 mg/L at station CH-060.

### ***Dissolution and ion exchange processes***

On both cross sections, increase in ion concentrations follows the main (Covey Hill) or secondary recharge areas, along the groundwater flow path. This implies that geochemical processes contribute ions to the groundwater as it flows through the fractured rock aquifers. However, geochemical processes within the sediment cover should also contribute to ion concentrations throughout water infiltration. These processes were discussed in section 2.5.3 and can be tracked down in the cross sections through geochemical groundwater evolution.

On cross section A-A',  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  show the same behaviour from station CH-114 on Covey Hill to station CH-010 next to the Noire River.  $\text{SO}_4^{2-}$  ions show a trend similar to  $\text{Ca}^{2+}$  whereas the trend in  $\text{Na}^+$  is similar to  $\text{Cl}^-$ . These behaviours suggest that dolomite, gypsum as well as halite dissolution contribute to the increasing trend in concentrations. The pH increases from 5.67 to 7.45 between these stations is consistent with dolomite dissolution (Equation 4, Section 2.5.3). Samples from the stations CH-114, CH-123, CH-011 and CH-105 plot close to a 1-1 correlation line such as the one illustrated in Figure 2.6. This confirms that dolomite and gypsum dissolution plays an important role on the chemical composition of these samples. These samples also plot in the trend 2 of Figure 2.5, indicating possible halite dissolution. Similar observations suggest that these processes, that is dolomite, gypsum and halite dissolution, also play an important role elsewhere along both cross sections, with a similar increasing trend in ion concentrations.

Ion exchange was previously suggested as an important factor that modify the chemical composition (Figure 2.9). This seems to apply to groundwater between stations CH-102 and CH-019 in cross section A-A', where  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{HCO}_3^-$  increase, whereas  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  decrease. This suggests that ion exchange proceeded as indicated by Equation 6 (Section 2.5.3), mostly between  $\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$ . The  $\text{HCO}_3^-$  increase indicates that dolomite dissolution is enhanced, in order to compensate the loss of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ . This is consistent with the pH increase from 7.61 to 7.95. Similar observations suggest that the same ion exchange process occurred between stations CH-056 and CH-060 in cross-section B-B'.



### ***Local recharge and dilution***

Local groundwater recharge in areas covered only by till or where rock is outcropping affects groundwater geochemistry. This is apparent by the decrease in TDS and ion concentrations in both cross sections, where concentration peaks are followed by a decrease in concentrations of most ions and TDS. In cross section A-A' (Figure 2.12), this happens in the area of station CH-007. The decrease is interpreted as a dilution effect of the flowing groundwater recharged by fresh groundwater. Qualitative interpretation of "high" tritium value (14.3 TU) and "young" uncorrected  $^{14}\text{C}$  age (2780 y BP) at the CH-007 station supports the concept of dilution of older groundwater by recent recharge. In cross section B-B', the same process occurs around station CH-046. Groundwater flowing at that station previously encountered a small area of unconfined conditions, where recharge could have taken place. Local recharge and dilution also occurs between the Norton Creek and the Châteauguay River, under semi-confined conditions, until thick clay generates confined conditions (CH-063 down to CH-058). The topography shows that station CH-063 is located in an area where surface elevation is slightly higher than the Norton Creek. A Tritium value of 10.2 TU at station CH-136 suggests recent recharge. As seen for Le Rocher plateau (cross section A-A'), local groundwater recharge could thus be occurring on this small increase in bedrock surface height.

### ***Former Champlain Sea water and mixing***

Cloutier (2004) found traces of the original Champlain Sea water in one well of the Basses-Laurentides area. That point on Figure 2.5 shows that the salinity is significantly lower than normal sea water. The Basses-Laurentides and the Châteauguay watershed share the same geological history. Furthermore, groundwater flows under similar geological and hydrogeological contexts in their respective areas. It is thus reasonable to assume the former presence of original Champlain Sea water in the aquifers of the study area, since this interior sea also covered the Châteauguay watershed.

Both cross sections show samples with high peaks of TDS concentrations mostly where confined conditions prevail. In cross section B-B' (Figure 2.13), a strong increase in  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and TDS concentrations is observed from station CH-058 to station CH-060. This strong increase in concentrations could indicate a contribution from former Champlain Sea water likely near-stagnant, since it still provides dissolved salt to the nearby

groundwater. Actually, samples from stations CH-060 and CH-107 show similar  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  molar ratio (2080 and 2066), similar old  $^{14}\text{C}$  uncorrected ages (10310 y BP and 9720 y BP), and the same absence of tritium activity (<0.8 TU). In Section 2.5.3, it was suggested that the sample from station CH-060 shows the higher proportion of near-stagnant former Champlain Sea water. The bottom elevation (surface elevation – well depth) of this well (~0 m asl) indicates that it is probably an area of low groundwater flow protected by the presence of thick impermeable clay. This would be the reason for the presence of near-stagnant former Champlain Sea water that was not totally flushed by fresher groundwater flow but has mixed with this slow flowing groundwater.

In cross section A-A', the fast increase in  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  concentrations at stations CH-102 and CH-019 suggests once again the potential presence of near-stagnant former Champlain Sea water. The similar  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  molar ratios (1730, 1700) of these samples plot in the water mixing zone of Figure 2.5. This is supported by low, undetected, tritium (<0.8 TU) and old uncorrected  $^{14}\text{C}$  ages (11680 and 11220 y BP) obtained from groundwater samples at 2 different depths in the fractured rock (45 and 70 m) at station CH-019. The elevations of these rock fractures (-8 and -33 m asl) suggest the presence of near-stagnant former Champlain Sea water closer to the rock surface and deeper in the fractured rock. This stagnation zone could be again related to a zone of low groundwater flow protected by the presence of a thick cover of impermeable clay.

Also in cross section A-A', the sudden increase in concentrations of TDS,  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  between stations CH-105 and CH-010 at the Noire River could also be related to the presence of near-stagnant former Champlain Sea water. The bottom well at station CH-010 is approximately 76 m deeper than at station CH-105 (91.4 m vs 15.85 m). It is speculated that the well at station CH-010 is located closer to the near-stagnant former Champlain Sea water. The presence of stagnant groundwater is not supported by isotopic data ( $^{14}\text{C}$ ). However, the  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  molar ratio (1502) of the sample at station CH-010 plots within the trend 1 of Figure 2.5, interpreted as mixing between fresh and remnant Champlain Sea waters. The bottom of the well at station CH-019 is as deep as the one at station CH-010 (-36 and -37 m asl). That last observation increases the strength of our assumption of a near-stagnant Champlain Sea water at station CH-010.

In cross section B-B', a strong increase of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  concentrations is also observed for samples at stations CH-047 and CH-136, next to the Norton Creek.  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  molar

ratios (16659, 18952) plot in the trend of possible halite dissolution on Figure 2.5. As previously mentioned, no data support the alternative process of contamination by road salt to explain the increase in  $\text{Cl}^-$ .

In cross section A-A', the plateau located in the area of Le Rocher seems to be an area of local recharge and the local flow lines drawn imply that the Noire River would be a local discharge area where mostly confined conditions prevail. The convergence of groundwater flow originating from various depths to the Noire River could be another explanation for the TDS,  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  increases at this possible discharge area. This observation can also be applied to the Norton Creek in cross section B-B'. Even though local recharge may occur in this area (station CH-063), the Norton creek could also be a local discharge area. As for station CH-010 at the Noire River (cross section A-A'), flow convergence could be the reason of the increasing salinity observed at the Norton Creek. It is considered that local discharge at the Noire River as well as the Châteauguay River occurs only where windows in the impervious overlying clays, thus allowing an hydraulic connection between the rock aquifers and the streams (Lavigne, 2006).

### **2.6.3 Geochemical conceptual model**

Figure 2.14 presents the geochemical evolution conceptual model that provides a synthesis of the hydrochemistry of groundwater in the Châteauguay River watershed. This model integrates our general understanding of the groundwater evolution from the main recharge area at Covey Hill through the Châteauguay River considered as the main discharge area of the watershed.

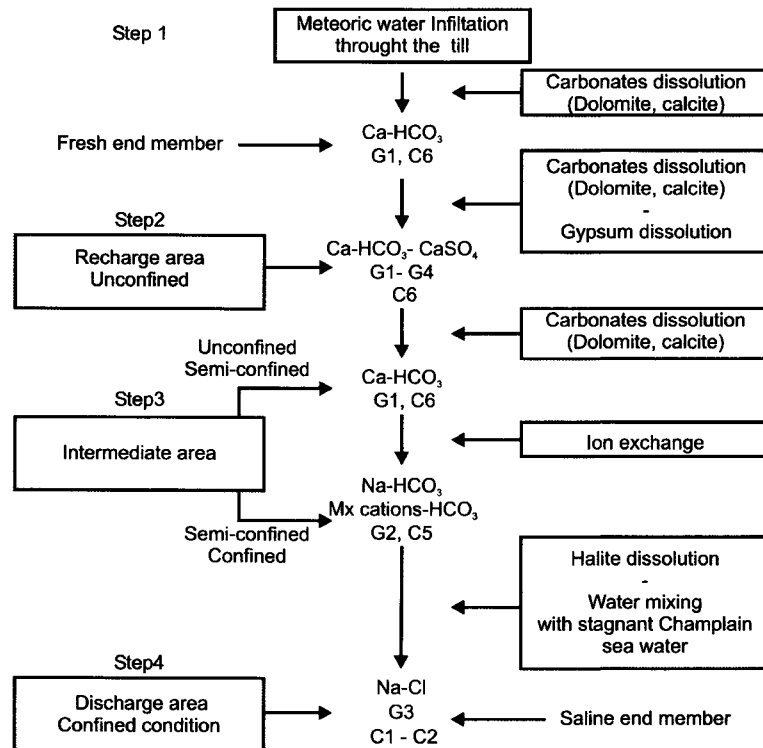


Figure 2.14: Conceptual model of groundwater geochemical evolution

The first step is the infiltration of meteoric water through the till that covers most of the recharge area on Covey Hill. Dissolution of carbonates minerals (dolomite, calcite) produces a groundwater of Ca-HCO<sub>3</sub> type of Group G1 belonging to Cluster C6. Thus, Ca-HCO<sub>3</sub> water type represents the fresh end member in the geochemical evolution. In step 2, under unconfined conditions, the infiltrated water percolates to the water table and flows through the recharge area where dissolution of carbonates still produces Ca-HCO<sub>3</sub> and gypsum dissolution produces newly Ca-SO<sub>4</sub> water type of Group G4 that belongs also to Cluster C6. In step 3, groundwater flows through the intermediate zone where 2 various flow conditions were observed. The first condition is the succession of unconfined conditions followed by alternating unconfined and semi-confined conditions. Groundwater flowing through this succession will usually conserve the signature of the recharge area with a water type of Ca-HCO<sub>3</sub> of Group G1. These waters will evolve from Cluster C6 to Cluster C5. These conditions prevail from Covey Hill to Howick and from Covey Hill to the Norton Creek. The second type of groundwater flow conditions is found between the Norton Creek and the municipality of Sainte-Martine. This condition consists in the succession of semi-confined and confined conditions. Groundwater that flows through this setting is generally characterized by Group G2 (Na-HCO<sub>3</sub>, Mx cations-

HCO<sub>3</sub>) that belongs to Cluster C5. In the intermediate areas, based mostly on cross section B-B' (Figure 2.13), the active carbonates dissolution initially maintains the recharge signature of groundwater, but progressively with the flow of groundwater, ion exchange becomes important enough to produce an evolution in the water type leading to Mx cations-HCO<sub>3</sub> and Na-HCO<sub>3</sub> water types. The final step of the evolution model is the flow in the discharge areas, where flow occurs mostly under confined conditions. Groundwater evolves from water types of Group G2 of Cluster C5 to groundwater of Group G3 (Na-Cl) belonging to Clusters C1 and C2. Na-Cl water type represents the saline end member of the geochemical evolution. This water type is interpreted to be the result of water mixing between fresh water and near-stagnant former Champlain Sea water present deeper in the bedrock or in zones of low flow in the bedrock protected by the presence of thick clay. It was also suggested that halite dissolution could possibly occur to explain an observed trend in Cl<sup>-</sup> concentrations that cannot be explained by water mixing.

## 2.7 Discussion

Cloutier (2004) previously studied the groundwater hydrochemistry in the Basses-Laurentides area. This sector is located on the North shore of the St. Lawrence River, North West of Montréal. The study area covers 1500 km<sup>2</sup> and the groundwater evolves in similar geological and hydrogeological contexts as the present study. It is thus interesting to compare the groundwater hydrogeochemistry of these two study area.

Based on 146 samples mostly from rock formations, groundwater of the Basses-Laurentide area is characterized by water types of groups G1 to G4. G5 water types were not observed. Our study in the Châteauguay Watershed shows a significantly higher number of samples characterized by Ca-HCO<sub>3</sub> and Ca-SO<sub>4</sub> water types and less samples characterized by Na-HCO<sub>3</sub> and Na-Cl types. Confined conditions of the Basses-Laurentides area were characterized by G2 and G3 water types. G2 and G3 water types in our study area were also mostly found under semi-confined and confined conditions with a predominance of Ca-HCO<sub>3</sub> in both. Both studies show the predominance of Group G1 water types under unconfined and semi-confined conditions. In fact, the highest proportion of the Basses-Laurentides area under confined conditions relative to the present study area might explain the difference in the relative quantity of water types of groups G2 and G3 found in the Basses-Laurentides compared to Châteauguay.

Both conceptual models for each area explained the evolution from the recharge area to the discharge with mostly the same water types and processes. The difference is the possible addition of halite dissolution to the mixing groundwater processes to explain the Na-Cl end member in the Châteauguay River watershed. In the Basse-Laurentides area, clay pore water diffusion is put forward to explain Na-Cl end member as well as water mixing with stagnant Champlain Sea water. The high proportion of area under confined conditions in the Basses-Laurentides could also explain these differences. The thickness of clay in the Basses-Laurentides can reach as much as 90 m, whereas the thicker clay deposit in the Châteauguay River watershed is only about 40 m. This greater thickness of clay conferred to the Basses-Laurentides area a protection that reduced the flushing of the water contained in the clay pore and thus favoured diffusion. This could be the reason for the presence of original Champlain Sea water found by Cloutier (2004, Figure 2.5) in the Basses-Laurentides. This Champlain Sea water showed a TDS of 11 337 mg/L. This confirmed that the most saline groundwater found in Châteauguay watershed with a TDS of 2834 mg/L is not representative of the original Champlain Sea water. It can be concluded that the conditions present in the groundwater flow system in the Châteauguay River watershed allowed more flushing of Champlain Sea water than the one of the Basses-Laurentides, thus leading to the main differences observed in the groundwater geochemistry of these two areas. This is confirmed by the presence of zone where groundwater are protected by convergent-divergent flow pattern found in 2 buried valleys of the Basses-Laurentides but absent in the Châteauguay River flow system.

## **2.8 Conclusion**

In conclusion, the regional aquifer units of the Châteauguay River watershed area consist of Cambro-Ordovician sedimentary rocks (sandstone, dolomite, limestone and shale). The assessment was based on groundwater samples collected in 144 rock wells and 22 multi-level samples collected in 9 wells. The location of sampling sites was decided first to have uniform coverage of the study area, and second to include the various hydrogeological and geological settings present in the watershed: major fractured aquifer units and unconsolidated sediments, groundwater flow conditions (unconfined, semi-confined, confined), and location on the regional flow lines (recharge, intermediate, discharge). The analytical program consisted in the measurement of the *in*

*situ* physico-chemical properties, and laboratory analyses of the complete set of inorganic parameters, microbiological parameters, and stable and radioactive isotopes.

Major elements Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, and anions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> show the highest concentrations, dominated by Cl and Na. Descriptive statistics show that hydrogeological conditions exert a major control on the elements concentrations than geological settings. Major elements constitute more than 92% of the total dissolved charge in mg/L. TDS concentrations indicate that groundwater are mostly fresh. The presence of Tritium in most of the sampled groundwater is an indication of relatively recent recharge in the watershed. Uncorrected ages of <sup>14</sup>C, however, imply that groundwater of variable ages is present in the study area. Their relation combined to Cl<sup>-</sup>/Br<sup>-</sup> ratio indicate that the sector between Ormstown and Sainte-Martine is a discharge area where mixing between fresh and near stagnant former Champlain Sea water occurred. This mixed groundwater was evaluated to be composed of 94% of fresh water and 6% of Champlain sea water.

Based on the comparison with the CCME standards, problems with groundwater quality for drinking and irrigation uses are mostly related to aesthetics criteria (hardness, TDS, Fe and Mn). Groundwater chemical composition was combined into 12 water types based on the dominant major ion content, with the Ca-HCO<sub>3</sub> type being dominant in all geological and hydrogeological contexts. Analyses of the multilevel samples show a weak variation of the chemical composition with depth. The important processes playing a role in the chemical variation of the groundwater were defined with the Principal Component Analysis: mixing of fresh water and near-stagnant former Champlain Sea water; possibly halite dissolution; dolomite and gypsum dissolution; and dissolution of Fe-Mn and F-Sr bearing minerals. Study of the components related to dissolution of dolomite and gypsum allowed to identify the possible occurrence of dissolution and precipitation of barite and calcite mineral phases. Ion exchange as appears to be a dominant process over all the study area. Correlations between water type groups and clusters defined with the Hierarchic Cluster Analysis (HCA), and their regional distribution indicate that recharge areas are mostly characterized by groundwater of Ca-HCO<sub>3</sub> type of Group G1 belonging to Clusters association C3-C5-C6. These kinds of groundwater were also found in intermediate and discharge areas.

Two cross sections were used to show and explain more precisely the geochemical processes, occurrence of possible local discharge area and the possible area where

occurred near-stagnant former Champlain Sea water. Both cross sections were also used to show correlations between water type groups, clusters, components and groundwater flow conditions. The synthesis of the geochemical evolution led to the development of a 4 step conceptual model of groundwater geochemical evolution from the main recharge area, Covey Hill, to the main discharge area, the Châteauguay River. Ca-HCO<sub>3</sub> and Na-Cl water types were defined as the two opposite end members of the geochemical evolution. Processes of carbonates dissolution, ion exchange, water mixing with near-stagnant former Champlain Sea water and possibly halite dissolution exert the major control on this end member evolution. Comparison of the defined water types and conceptual model with those defined for the Basses-Laurentides study area revealed differences between the 2 study areas that can be related to differing dominant groundwater flow conditions.

## **2.9 Acknowledgements**

GSC contribution ###. This study was partly funded by the Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, the Geological Survey of Canada (GSC) and INRS-Eau, Terre et Environnement. Author R.L. acknowledges a NSERC operating grant. Inorganic and microbiological analyses were performed at the Laboratoire de la qualité du milieu and the Laboratoire des pollutions industrielles of the Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. Analyses of stable and radioactive isotopes were performed at the Delta-Lab of the GSC-Québec division, the Environmental Isotope Laboratory at the University of Waterloo and the Isotrace Laboratory at the Toronto University. The authors would like to thank Charles Lamontagne, Nadine Roy, Marc-André Lavigne, Anne Croteau, Tommy Tremblay, Denis Lavoie, Nicolas Benoît, Réjean Godin, Roger Morin, Raymond Perron and Joanie Vachon for the help provided for this study. The collaboration of the local population and municipal authorities is acknowledged. Dr. Normand Tassé, INRS-ETE, and Dr. Steve Grasby, GSC-Calgary division are thanked for their useful comments and review of an initial draft of this manuscript.



## Chapitre 3 Conclusion

La géochimie des eaux souterraines a été caractérisée dans la portion québécoise du bassin versant de la rivière Châteauguay. La caractérisation a permis d'assembler une nouvelle série de données complètes et actuelles de la composition chimique des eaux souterraines de cette région. La comparaison de ces données avec les normes de qualité d'eau et leur analyse ont permis de répondre aux objectifs de ce projet. Ces objectifs étaient de définir la composition chimique des eaux souterraines pour qualifier la qualité des eaux et identifier les processus et conditions géologiques et hydrogéologiques qui contrôlent la géochimie des eaux souterraines. La variation de la composition chimique en fonction de la profondeur et le long de 2 sections géochimiques a aussi été étudiée. Pour réaliser cette étude, 144 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés pour la caractérisation régionale, tandis que 22 échantillons multi-niveaux ont servi à l'étude de la variation selon la profondeur au roc. Ces échantillons ont été prélevés dans des puits privés, municipaux et scolaires, puits d'observation du MDDEP et une source distribués sur l'ensemble du territoire. Les échantillons d'eau ont été analysés pour les éléments majeurs, mineurs et traces, le contenu bactériologique ainsi que les isotopes stables et radioactifs.

Les données brutes indiquent que les éléments majeurs Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> et les anions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> représentent généralement plus de 92% de la charge dissoute dans les eaux souterraines. Ces eaux sont généralement considérées comme non salines selon les valeurs calculées de la matière dissoute totale. Les statistiques descriptives des données brutes indiquent que les contextes hydrogéologiques exercent un plus grand contrôle sur les concentrations des éléments que les contextes géologiques. Un ensemble de 25 paramètres chimiques reliés à des objectifs esthétiques et de santé démontre que les problèmes de qualité pour l'utilisation des eaux comme source d'eau potable et pour l'irrigation des cultures sont essentiellement d'ordre esthétique et reliés à la dureté, à la matière dissoute totale, au fer et au manganèse. Des problèmes mineurs de qualité reliés à la santé ont été observés pour le baryum, les fluorures totaux et les nitrates. Les datations de l'eau souterraine par le tritium et le <sup>14</sup>C indiquent que les eaux de recharge de l'eau souterraine sont récentes et que des eaux d'âges variables sont présentes dans le système d'écoulement souterrain.

La classification des types d'eau a été faite sur la base des ions majeurs;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cette classification a démontré que la composition chimique des eaux souterraines est variable et se résume à 12 types d'eau dont les principaux sont les types  $\text{Ca-HCO}_3$ , Mx cations- $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Na-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-SO}_4$ ,  $\text{Na-Cl}$  et  $\text{Mg-HCO}_3$ . Le plus abondant, le type  $\text{Ca-HCO}_3$ , est présent dans tous les contextes géologiques et hydrogéologiques. L'observation des types d'eau pour les échantillons multi-niveaux montre que la composition chimique varie faiblement en profondeur pour l'épaisseur de roc investiguée. Les types d'eau ont été classés en 5 groupes. Le premier groupe G1, dominé par le type  $\text{Ca-HCO}_3$ , est aussi formé des types d'eau  $\text{Mg-HCO}_3$  et  $\text{Alk earth-HCO}_3$ . Le groupe G2 est un mélange pratiquement homogène de Mx cations- $\text{HCO}_3$  et  $\text{Na-HCO}_3$ . Le groupe G3, dominé par le type  $\text{Na-Cl}$ , est complété par les types Mx cations- $\text{Cl}$  et  $\text{Na-Mx anions}$ . Le groupe G4 est formé de  $\text{Na-SO}_4$  et  $\text{Ca-SO}_4$  qui lui domine le groupe. Finalement le groupe G5, très mineur, est formé des types  $\text{Ca-Cl}$  et  $\text{Ca-Mx anions}$ .

La classification hiérarchique regroupée (*Cluster Analysis*) a subdivisé les échantillons de la caractérisation régionale en 6 clusters d'eau souterraine en fonction de la similarité de la composition chimique basée sur les ions majeurs et mineurs  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  et de l'élément mineur Si. Chaque cluster a été qualifié d'un type d'eau défini par les concentrations médianes des ions majeurs des échantillons de chaque groupe. Le cluster C1 est caractérisé par le type d'eau Mx cations- $\text{HCO}_3$  et regroupe 33 échantillons dont les concentrations médianes sont les plus élevées pour  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$  et  $\text{Sr}^{2+}$ . Le cluster C2 est caractérisé par le type d'eau  $\text{Na-HCO}_3$  et regroupe 7 échantillons qui montrent les concentrations médianes les plus élevées pour  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  et  $\text{F}^-$ . Il est aussi caractérisé par les concentrations médianes les plus faibles pour  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ce cluster est aussi caractérisé par la médiane la plus élevée pour la longueur de tubage, suggérant que les eaux souterraines de ce cluster se trouvent surtout en contexte confiné. Le cluster C3 est caractérisé par le type d'eau  $\text{Ca-HCO}_3$  et regroupe 12 échantillons qui montrent les plus faibles médianes pour les ions  $\text{F}^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Mn}^{2+}$ . Le cluster C4 regroupe 8 échantillons et est caractérisé par le type d'eau  $\text{Ca-HCO}_3$  et les médianes les plus élevées pour les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , Si, MDT, dureté et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Le cluster C5 est défini par le type d'eau  $\text{Ca-HCO}_3$  et regroupe 46 échantillons. Ce cluster n'est pas caractérisé par les médianes les plus élevées ou les plus faibles, mais il apparaît que les concentrations pour la plupart des

ions sont faibles. Le cluster C6 est caractérisé par le type d'eau Ca-HCO<sub>3</sub> et regroupe 29 échantillons qui montrent les plus faibles médianes pour plus de la moitié des paramètres.

L'utilisation de l'analyse en composante principale (*Principal Component Analysis*) a permis d'identifier les processus géochimiques majeurs reliés à 5 composantes qui expliquent ~80% de la variabilité de la composition chimique de l'eau souterraine. La composante 1 reliée à la salinité, d'après les corrélations élevées de Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et Br<sup>-</sup>, explique 22.3% de la variance et les processus déduits de ces corrélations sont des processus de mélange d'eau fraîche avec des eaux plus salines ayant la signature de la mer de Champlain et possiblement la dissolution d'halite. La composante 2 explique 14% de la variance et a été reliée à la dissolution de minéraux riches en Fe-Mn. La composante 3 reliée à la dissolution de la dolomie explique 15.1% de la variance. Le processus de la dissolution du gypse a été déduit de la composante 4 qui explique 14.4% de la variance totale. La cinquième composante explique 13.8% de la variance et montre une forte corrélation entre F<sup>-</sup> et Sr<sup>2+</sup> interprétée comme un processus de dissolution de minéraux riches en F-Sr. L'échange ionique a aussi été identifié et semble aussi jouer un rôle de premier plan, d'après les tendances des concentrations en sodium et calcium dans les eaux souterraines. L'analyse des indices de saturation suggère que la dissolution de la calcite et de la barite sont possibles et qu'elles pourraient avoir un contrôle respectivement sur la dissolution de la dolomite et du gypse.

Sur la base de corrélations établies entre les groupes de types d'eau (G1 à G5) et les clusters d'eau souterraines (C1 à C6), les eaux de recharge qui évoluent sous des conditions libres et semi-confinées sont généralement de type Ca-HCO<sub>3</sub> du Groupe G1 et des clusters C3-C5-C6, à l'exception de la recharge sur Covey Hill qui montre des eaux Ca-HCO<sub>3</sub> et Ca-SO<sub>4</sub> du groupe G4. Les eaux des zones intermédiaires évoluent principalement sous des conditions d'écoulement confinées et sont aussi généralement caractérisées par des eaux de type Ca-HCO<sub>3</sub> du groupe G1 et des clusters C3-C5-C6. Ces eaux sont plutôt du groupe G2 à l'est de Sainte-Martine et des groupes G2-G3 classifiés dans les clusters C1-C2 au nord de Saint-Rémi. Les eaux qui évoluent dans les zones d'émergence sous des conditions mixtes confinées-semi-confinées sont généralement caractérisées par le type d'eau Ca-HCO<sub>3</sub> du groupe G1 et des clusters C3-C5-C6. Dans les zones d'émergence où des conditions franches semi-confinées sont présentes, les eaux sont principalement du groupe G2 des clusters C3-C5-C6. Aux

endroits où les conditions confinées dominent, les eaux de types du groupe G3 des clusters C1-C2 ainsi que des eaux du groupe G2 caractérisent principalement ces zones d'émergence.

Deux sections géochimiques ont présenté plus spécifiquement la variabilité de la composition chimique des eaux souterraines à l'intérieur d'un cadre d'évolution géochimique général. L'utilisation des ions majeurs et de la TDS ont démontré les effets des contextes hydrogéologiques et des principaux processus sur l'évolution des concentrations. Des zones de recharge locales de l'eau souterraine apparaissent comme des éléments importants affectant la géochimie des eaux souterraines. Ces sections ont aussi mis en évidence des conditions engendrant un écoulement limité qui permettent de préserver la signature géochimique d'anciennes eaux provenant de la Mer Champlain qui n'ont pas été complètement lessivées.

Un modèle conceptuel de l'évolution géochimique a été défini sur la base des corrélations entre groupes de types d'eau et clusters d'eau souterraine ainsi que sur les deux sections géochimiques présentées. Les types d'eau Ca-HCO<sub>3</sub> et Na-Cl sont des pôles représentant respectivement les eaux de recharge récente et des eaux anciennes gardant la signature géochimique de la Mer de Champlain. Entre ces pôles, les processus de dissolution des carbonates, d'échange ionique, de mélange d'eau et possiblement de dissolution d'halite contrôlent l'évolution de l'eau souterraine.

La géochimie des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay a été comparée à celle de la région des Basses-Laurentides. La différence entre les conditions dominantes de l'écoulement de l'eau souterraine semble à l'origine de la distinction entre les types d'eau et les modèles géochimiques conceptuels représentatifs des systèmes aquifères du bassin versant de la rivière Châteauguay et des Basses-Laurentides. Cette constatation permet de souligner l'importance prépondérante du contexte d'écoulement sur la géochimie des eaux souterraines pour deux régions qui ont été soumises à un historique géologique semblable, possèdent des aquifères du même type et où des processus géochimiques très similaires sont en cause.

## BIBLIOGRAPHIE

- Appelo, C.A.J., Postma, D., 1999. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam, 536 p.
- BAPE, 2000. *L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur-Tome I. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec*, Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 480 p.
- Belliveau, L., 1975. *Expertise de pompage au puits desservant la municipalité de Saint-Isidore, comté de Laprairie*. Compagnie Internationale des Eaux Ltée, Montréal, Québec, 5 p.
- Benoît, N., 2005. *Définition de la transmissivité du bassin de la rivière Châteauguay par modélisation inverse*. Mémoire de maîtrise, Montréal, École Polytechnique.
- Bergeron, L., Govare, É. 2000. *Caractérisation préliminaire des eaux souterraines, corporation municipale de Sainte-Clotilde-de-Châteauguay*. BGA Environnement, Services-Conseils, Montréal, Québec, 19 p.
- Blanchette, D., Roy, N., 2004. *Protocole d'échantillonnage de la caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay*. Commission Géologique du Canada, Québec. 51 p.
- Bourque, É., Cloutier, V., 2001. *Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine: caractérisation hydrogéochimique régionale*. 36 p.
- CCME – Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2003. *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, Sommaire des recommandations*. 20 p. [http://www.ccme.ca/publications/ceqg\\_rcqe.fr.html#316](http://www.ccme.ca/publications/ceqg_rcqe.fr.html#316). Consulté en 2004-2005.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328 p.
- Clark, T.H., Globensky, Y., Hofmann, H., 1979, *Stratigraphie Paléozoïque des Basses-Terres du Saint-Laurent du Québec: excursion A-7*. Association Géologique du Canada, Association Minéralogique du Canada, Québec, 39 p.
- Cloutier, V., 2004. *Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des Basses-Terres du Saint-Laurent, Québec, Canada*. Thèse de doctorat, Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement. 382 p.
- Côté, M.J., Lachance, Y., Lamontagne, C., Nastev, M., Plamondon, R., Roy, N., 2006. *Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay. Collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique-Eau, Terre et Environnement*. Québec: Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 64 p.

Croteau, A., Murat, V., Lefebvre, R., 2003. Synthèse initiale et base de données de l'hydrogéologie du bassin versant de la rivière Châteauguay. Version préliminaire, Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement, 31 p.

Croteau, A., 2006. Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis. Mémoire de maîtrise, Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement. 322 p.

Davis, J.C., 1973. Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons Inc., New York, 550 p.

Dessureault, R., 1974. Aménagement de deux puits tubulaires à Saint-Rémi, comté de Napierville. Services Techniques en Eau Souterraine Inc. Dorval, 19 p.

Dindane, K., Bouchaou, L., Hsissou, Y., krimissa, M., 2003. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. Journal of African Earth Sciences, 315-327.

ESRI Inc., 2004. Arc Map software, version 9.0.

Farnham, I.M., Singh, A.K., Stetzenbach, K.J., Johansson, K.H., 2002. Treatment of nondetects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 60, 265-281.

Fisher, R.S., Mullican, W.F., III, 1997. Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. Hydrogeology Journal, 5 (2), 4-16.

Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Géomines Ltée., 1983. Étude hydrogéologique, région de Saint-Rémi. Géomines Ltée, Montréal, 22 p.

Globensky, Y, Ziserman, A., 1979. Recommandations pour une prospection minière des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère des Richesses naturelles, Québec, S-101.

Globensky, Y., 1981. Région de Huntingdon. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction Générale de l'Exploration Géologique et Minérale, Québec, 198, 53 p.

Globensky, Y., 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Direction Générale de l'Exploration Géologique et Minérale, Québec, MM 85-02, 63 p.

Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, A.K., 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal, 10, 455-474.

Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T., 2005. Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU). Applied Geochemistry, 20, 2283-2302.

Jolicoeur, M., 1976. Travaux exploratoires pour établir le site du nouveau puits Ranney, Ville de Châteauguay. Compagnie Internationale des Eaux Ltée, Montréal, 13 p.

Karrow, P.F., Occhietti, S., 1989. Le Quaternaire des Basses-Terres du Saint-Laurent, Le quaternaire du Canada et du Groenland. Commission Géologique du Canada, Ministère des Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, 907 p.

LaSalle, P., 1981. Géologie des dépôts meubles de la région de Saint-Jean-Lachine. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Direction Générale de l'Exploration Géologique et Minérale, Direction des levés géologiques, Rapport préliminaire, DVP-780, 13 p.

LaSalle, 1985. Géologie des sédiments meubles de la région de Lacolle-Saint-Chrysostome, Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Direction Générale de l'Exploration géologique et Minérale, Rapport préliminaire, ET 83-21, ISBN 2-550-11216-4, 13 p.

Lavigne, M.-A., 2006. Modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, Québec, Institut National de la Recherche Scientifique - Eau, Terre et Environnement. 106 p.

Lavigne, M.-A., Nastev, M., Lefebvre, R., this issue. Numerical simulation of groundwater flow in the transboundary Châteauguay aquifers. Hydraulic properties and model calibration. Submitted to the Canadian Water Resources Journal.

Lavoie, D., 2004. Geological, Stratigraphic and Structural Settings of the Châteauguay Area, St. Lawrence Platform of Southern Quebec. Geological Survey of Canada, Quebec Division, Quebec, 13 p.

Lavoie, D., Salad Hersi, O., Hilowle Mohamed, A., Nowlan, G.S., 2002. Subaerial unconformity at the Potsdam-Beekmantown contact in the Quebec Reentrant: regional significance for the Laurentian continental margin history. Bulletin of Canadian petroleum geology, 50, 419-440.

McCormack, R., 1981. Étude hydrogéologique: bassin versant de la Châteauguay. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement, Direction générale des inventaires et de la recherche, Programme des connaissances intégrées, Québec, E.F-2, 175 p.

MDDEP - Ministère du Développement durable, Environnement et Parc. La gestion de l'eau au Québec. [http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/consultation/gestion\\_eau.htm](http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/consultation/gestion_eau.htm). Consulté en 2005-2006.

Miretzky, P., Conzonno, V., Cirelli, A.F., 2000. Hydrochemistry of pampasic ponds in the lower stream bed of Salado River drainage basin, Argentina. Environmental Geology, 39, 951-956.

Nastev, M., Lamontagne, C., Tremblay, T., Lavoie, D., Hardy, F., Lamothe, M., Croteau, A., Blanchette, D., Lavigne, M.-A., Peron, R., Roy, N., Morin, R., Corland, B., Paradis, D., Benoît, N., Godin, R., Dagenais, M.P., Lefebvre, R., Marcotte, D., Rouleau, A., Chapuis,

R., Guay, L., in prep. Hydrogeologic overview of the Châteauguay River basin. Submitted to the Canadian Water Resources Journal.

Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 99-4259.

Pelletier, M., Lalonde, J.-P., Chouinard, N., 1985. Géochimie des eaux souterraines dans la région de Montréal, données brutes et cartes de compilation. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction Générale de l'Exploration Géologique et Minérale, Service de Géochimie-Géophysique, DV 84-15, 436 p.

Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. American Geophysical Union, Papers, Hydrology, p. 914-923.

Pontlevoy, O., 2004. Modélisation hydrogéologique pour supporter la gestion du système aquifère de la région de Ville-Mercier. Mémoire de maîtrise, Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement, 98 p.

Poulin, M., 1977. Groundwater contamination near a liquid waste lagoon, Ville Mercier, Quebec. M.Sc. thesis, Waterloo, University of Waterloo, 158 p.

Racine, C., 2005. Étude des alternatives de contrôle des panaches d'eau souterraine contaminée par des liquides immiscibles denses et légers, Ville-Mercier, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise, Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement.

Ressources Naturelles Canada. Les eaux souterraines: caractérisation hydrogéologique régionale du bassin versant de la rivière Châteauguay. [http://pes.rncan.gc.ca/p3/a8/index\\_f.php](http://pes.rncan.gc.ca/p3/a8/index_f.php). Consulté en 2005.

Richter, B.C., Kreitler, C.W., Bledsoe, B.E., 1993. Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization. Boca Raton, C.K. Smoley, FL.

Roy, R., 1973. Analyses d'eau et contamination de l'eau souterraine à Saint-Paul de Châteauguay, comté de Châteauguay. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles, Québec, N/Dossier 300-553/11, 3 p.

Simard, G., Des Rosiers, R., 1979. Qualité des eaux souterraines du Québec. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service des eaux souterraines, rapport HG-13, 160 p.

Statsoft Inc, 2004. STATISTICA (data analysis software system), version 6.

Stiff, H.J., 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology, 3, 15-17.

Tremblay, J.J., 1963. Levé hydrogéologique à Saint-Rémi, comté de Napierville. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles, Service des Eaux, Gaz et Pétrole, Québec, Rapport no 548, 5 p.



Tremblay, J.J., 1967. Levé hydrogéologique à Ormstown, comté de Châteauguay. Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses Naturelles, Service de l'hydrogéologie, Québec, Rapport 682, 4 p.

Tremblay, J.J., 1975. Épreuve de pompage à Sainte-Martine, comté de Châteauguay. Services Techniques en Eau Souterraine, Dorval, 12 p.

Tremblay, T., 2006. Hydrostratigraphie et géologie du Quaternaire dans le bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec. Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal.

Tremblay, T., Lamothe, M., 2005. Géologie des formations superficielles du bassin-versant de la rivière Châteauguay: feuillets topographiques Saint-Chrysostome 31H/4, Lachine H/5 et Huntingdon G/1. Montréal, Université du Québec à Montréal, 34 p.

USGS – US Geological Survey. PHREEQC (Version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. [http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc/](http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/).

Vidal, M., Melgar, J., Lopez, A., Santoalla, M.C., 2000. Spatial and temporal hydrochemical changes in groundwater under the contaminating effects of fertilizers and wastewater. *Journal of Environmental Management*, 60:3, 215-225.

Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003. Aquachem Software, version 4.0.

# **ANNEXE A**

**Descriptions minéralogique  
du socle rocheux**

Tableau A1: Descriptions minéralogiques du socle rocheux<sup>1</sup>

Formation/membre	Composition minéralogique
Tétreauville	70-71% calcite, 20% silice, 6% oxyde d'aluminium, 2-3% hématite, 1% magnésite.
Saint-Michel	90% calcite, 8-12% silice, 1% magnésite.
Deschambault	93-99% calcite, 5% (silice, oxyde d'aluminium, hématite, magnésite).
Laval	61% quartz, 35% carbonate, 1% microcline, 3% (hornblende, biotite, zircon).
Beauharnois	dolomite, quartz, minéraux d'argile, calcite, gypse, halite, magnétite, pyrite.
Theresa	35-98% dolomite, 2-59% quartz, 1-2% plagioclase et microcline, traces-5% (magnétite, zircon, pyrite, hornblende).
Cairnside	91-99% quartz, 1-3% plagioclase et microcline, traces (magnétite, zircon, biotite, hornblende, séricite, épidote apatite).
Covey Hill	80-99% quartz, 3-10% plagioclase et microcline, 1-3% (Zircon, magnétite, hornblende, apatite et tourmaline).

1: Tiré de Globensky (1987)

## **ANNEXE B**

**Résumé du protocole d'échantillonnage pour la caractérisation  
géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière  
Châteauguay  
(Blanchette et Roy, 2004)**

## 1 Carnet de terrain / fiches d'informations à noter sur place

Le carnet de terrain utilisé pour la consignation des informations est présenté par Blanchette et Roy (2004). Il est très important de bien consigner le plus d'informations possibles pour retour ultérieur et parce que ces informations sont intégrées à la base de données sous Access à l'aide de formulaires conçus à cet effet (ces formulaires sont aussi accessibles par internet à partir de WGIMS).

## 2 Paramètres analysés

Les paramètres analysés sont présentés dans le tableau 1. Les nombres d'échantillons analysés pour les différents paramètres sont indiqués. Les informations au sujet des contenants et des volumes, les agents de conservation, la filtration et les laboratoires responsables des analyses y sont inclus. Des informations sur les différents paramètres analysés sont présentées par Blanchette et Roy (2004).

Tableau 1: Liste des paramètres analysés

Paramètres	Nbre <sup>1</sup>	Bouteille <sup>2</sup>	Agent de conservation	Filtration <sup>3</sup>	Laboratoire
Ag, Al, As, B, Ba, Br, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sr, Zn, U	183	60 ml, P 125 ml, P	Acide nitrique	0.45 µm, P	Laboratoire de la qualité du milieu CEAEQ, Québec
Hg	183	15 ml, P	Acide nitrique + solution d'Or	0.45 µm, P	
Cl, F, SO <sub>4</sub> , Alcalinité totale, Couleur	175	500 ml, P	aucun	aucune	
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , N-total	175	125 ml, P	Acide sulfurique	0.45 µm, N	
CID, COD	175	125 ml, P	aucun	aucune	
<i>E. Coli</i> , Coliformes totaux, Colonies atypiques	144	250 ml, P	Thiosulfate de sodium	aucune	
Phosphore inorg. total	175	250 ml, P	Acide sulfurique	0.45 µm, N	Laboratoire des pollutions industrielles CEAEQ, Laval
Cyanures totaux	175	250 ml, P	NaOH	aucune	
Sulfures totaux	175	250 ml, P	Acétate de zinc + NaOH	aucune	
δ <sup>2</sup> H et δ <sup>18</sup> O	27, 28	60 ml, P	aucun	aucune	Delta-Lab CGC-Québec
<sup>3</sup> H, δ <sup>13</sup> C	27, 25	1 L, P	aucun	aucune	EIL-Université de Waterloo
<sup>14</sup> C	25	250 ml, V 1 L, P	aucun	aucune	Isotrace-Université de Toronto

- 1: Caractérisation régionale et multi-niveaux incluant les blancs et les duplicatas  
 2: P = Plastique V = Verre  
 3: P = Polyéthylène N = Nitrocellulose

### **3 Préparation des bouteilles/ étiquetage**

#### **3.1 Lavage de bouteilles**

Les bouteilles de verre pour l'analyse de l'isotope radioactif  $^{14}\text{C}$  ainsi que les contenants de plastiques pour Ag, Al, As, B, Ba, Br, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sr, Zn, U et Hg doivent être préalablement nettoyées (Blanchette et Roy, 2004).

#### **3.2 Étiquetage**

Noter sur les étiquettes: le nom de l'échantillon et les paramètres à analyser à partir de cet échantillon. Étiqueter les bouteilles préalablement à leur remplissage afin d'éviter les problèmes d'étiquettes qui ne collent pas sur les bouteilles. Utiliser des étiquettes plastifiées (imperméables) et des crayons à encre indélébile et vérifier que le nombre de bouteilles est exact.

Nom_échantillon
Paramètres_à_analyser

### **4 Assurance qualité / duplicata**

Il est recommandé de prélever des duplicata d'échantillons d'eau pour vérifier la qualité des résultats d'analyse en laboratoire. On recommande de prélever de 5 à 10 % des échantillons en duplicata.

### **5 Assurance qualité / blanc de terrain et blanc de transport**

Il est recommandé de produire des blancs de terrain et des blancs de transport d'eau ultrapure pour vérifier la qualité de la technique de décontamination pour le prélèvement des métaux, l'air environnant ainsi que la méthode d'expédition au laboratoire. On recommande de produire de 5 à 10 % des échantillons en blanc.

### **6 Eau brute**

Afin de connaître la qualité naturelle de l'eau souterraine il est nécessaire de prélever des échantillons d'eau brute et non d'eau traitée puisque les traitements, tels que la chloration par exemple, peuvent modifier la composition chimique de l'eau.

Le prélèvement des échantillons d'eau brute doit être fait préférablement le plus près possible de l'ouvrage de captage, avant que l'eau n'atteigne un réservoir ou les systèmes de distribution ou de traitement. La composition chimique de l'eau échantillonnée est ainsi la plus représentative possible de celle de l'aquifère.

## 7 Purge

L'eau doit être purgée jusqu'à l'atteinte de la stabilité des paramètres physico-chimiques tels la température, la conductivité spécifique, le pH, l'oxygène dissous, le potentiel redox, la turbidité ou une combinaison de ces paramètres. On peut ainsi s'assurer que l'eau n'a pas résidé dans le puits ou la tuyauterie, ce qui pourrait en changer la composition. Lorsque la recharge du puits est lente ou que le puits est en inactivité depuis un certain temps ou que des tests (injection) et/ou travaux ont été effectués dans un temps rapproché, il est préférable de purger l'eau jusqu'à l'atteinte d'un volume d'eau correspondant à un certain nombre de fois (normalement de 3 à 5 fois) le volume d'eau présent dans le puits et le gravier filtre autour de la crépine dans le cas d'un piézomètre. Si le niveau de l'eau dans le puits est inconnu, il est préférable de considérer un volume d'eau comme étant la profondeur totale du puits.

Pour la prise d'échantillons multi-niveaux à une profondeur précise, en utilisant le système de packers (coussins gonflants), si une purge de 3 à 5 volumes d'eau dans le puits a été réalisée auparavant faire la purge d'au moins un volume d'eau compris entre les deux packers et la longueur de tubage utilisé pour amener l'eau à la surface afin de rincer le système. Sinon, débiter avec la purge d'au moins 3 à 5 volumes du puits en question.

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques analysés sur le terrain / précision des lectures et critères de stabilité à atteindre lors de la purge

Paramètres <i>in-situ</i>	Instruments	Précision	Critères de stabilité
Température (°C)	Thermomètre en verre	± 0,1	± 0,2
pH (sans unité)	Sonde YSI 63	± 0,1	± 0,2
Conductivité (uS/cm)	Sonde YSI 63	± 2% sur une suite de 3 mesures	± 4% sur une suite de 3 mesures
Oxygène dissous (mg/L)	Sonde YSI 63	± 0,2	± 0,4
	Sonde YSI 550A	± 0,1	± 0,6
Potentiel oxydoréduction (mV)	Sonde redox d'Hanna ORP	± 0,1	± 20

## **8 Aérateur / boyau d'arrosage**

Lorsque l'échantillonnage est effectué à un robinet, il est nécessaire d'enlever l'aérateur du robinet, afin d'éviter d'oxyder l'échantillon et de prévenir une contamination bactériologique. Le remplissage directement dans les bouteilles d'échantillonnage doit être effectué lorsque c'est possible (ex: robinet) afin d'éviter de contaminer les échantillons avec des récipients intermédiaires. Il est également très important d'enlever les boyaux d'arrosage (ex: boyau d'arrosage relié à un robinet extérieur d'une maison) reliées à des robinets parce qu'elles peuvent contaminer les échantillons (ex: contamination bactériologique).

## **9 Agents de conservation**

Des agents de conservation doivent être ajoutés à certaines bouteilles d'échantillonnage selon les recommandations du laboratoire (voir le tableau ci-haut). Les agents de conservation, souvent déjà présents dans les bouteilles, sont fournis par les laboratoires qui procèdent à l'analyse. Le remplissage des bouteilles doit être fait en prenant soin de ne pas perdre l'agent de conservation.

## **10 Filtration**

### **10.1 Contenants pour l'analyse des métaux, NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, N-total et Phosphore inorganique. total**

Filtrer l'eau des bouteilles qui seront analysées pour les métaux (identifiées métaux 60 ml et 125 ml, et Hg 15 ml) et les nutriments (NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>, N-total et NH<sub>4</sub> 125 ml, Phosphore inorganique total 250 ml) pour éviter la dissolution de particules en solution par les agents de conservation.

Note: lors d'études de caractérisation hydrogéochimique régionales, on désire caractériser l'eau de l'aquifère et non celle d'un puits en particulier, qui peut contenir des particules en suspension due aux particularités de construction de l'ouvrage de captage. Les échantillons destinés à subir des analyses pour les paramètres tels que les métaux dissous doivent donc être filtrés sur place de façon à éliminer les particules en suspension. Les agents de conservation peuvent dissoudre certains éléments en suspension, et modifier les résultats des concentrations en éléments dissous, de là l'importance de la filtration sur place. Les échantillons sont acidifiés afin d'éviter la



précipitation ou l'adsorption des métaux sur les parois des contenants et minimiser la prolifération bactérienne ainsi que certaines réactions d'oxydation.

Type de filtre: des filtres (filtres de nitrocellulose de 0.45 microns pour les nutriments, MEF, 1994, et filtre de téflon de 0.45 microns, CEAEQ, communication personnelle) avec des seringues (polyéthylène, 60cc, polypropylène, 20cc) sont utilisés pour la filtration des échantillons. Placer le filtre dans le bon sens (entrée-sortie) !!!!! Voir les inscriptions sur le filtre pour savoir quelle extrémité doit être connectée à la seringue ou au conduit.

Nettoyage du filtre: filtrer de 1 à 5 ml de l'eau à échantillonner avant de commencer à utiliser l'eau filtrée pour le remplissage des bouteilles. Si le volume d'eau utilisable pour le remplissage des bouteilles est limité ou que les filtres se bouchent très rapidement, ne pas prendre cette précaution.

## **11 Remplissage des bouteilles**

### **11.1 Bouteilles sans agent de conservation**

Remplir jusqu'à l'épaule les bouteilles qui ne contiennent pas d'agent de conservation après les avoir rincées avec l'eau à échantillonner.

#### *Exceptions*

Il est très important de laisser un espace de tête pour la bouteille qui sera utilisée pour les analyses bactériologiques afin que les bactéries aérobiques présentes puissent survivre. Ces bouteilles ont été nettoyées au laboratoire et elles n'ont pas à être rincée (vérifier avec le laboratoire).

Les bouteilles pour les analyses isotopiques du  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  (60 ml),  $^3\text{H}$  (1L),  $\delta^{13}\text{O}$  et  $^{14}\text{C}$  (250 ml et 1L) doivent être remplies complètement, aucune bulle d'air si possible.

### **11.2 Bouteilles avec agent de conservation**

Remplir les bouteilles qui contiennent un agent de conservation jusqu'à l'épaule, sans rincer la bouteille afin de conserver l'agent de conservation. Ne pas laisser déborder pour ne pas perdre l'agent de conservation.

*Attention!!!!!!!!!!!!*

Manipuler très prudemment les agents de conservation. Les agents de conservation sont très toxiques ou oxydants et ils traversent très facilement les vêtements. Certains nécessitent d'être dilués rapidement avec de l'eau (acides forts:  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et bases fortes:  $\text{NaOH}$ ) lorsqu'on en renverse. Voir les fiches signalétiques de ces produits. Porter des pantalons longs et éviter les lentilles cornéennes puisqu'il est très difficile de rincer les yeux en cas d'éclaboussure si l'on porte des lentilles cornéennes.

*Exceptions:*

Bouteille pour l'analyse des sulfures: remplir jusqu'à l'épaule la bouteille contenant 0.5 ml à 1ml de  $\text{NaOH}$ . Vérifier à l'aide du papier tournesol, que le pH soit supérieur à 12. Ensuite, ajouter 10 gouttes (bouteille compte gouttes de 15 ml) d'acétate de zinc, soit 4 gouttes pour 100 ml d'échantillon. Finalement, remplir la bouteille jusqu'à rebord.

*Prudence!!!!*

Toujours de rappeler que l'acide dans l'eau est un cadeau et l'eau dans l'acide est un suicide!!!!

## **12 Conservation des échantillons et délais d'analyse**

Tous les échantillons d'eau doivent être conservés à 4 °C et à l'obscurité jusqu'à leur analyse. Les bouteilles doivent parfois être livrées au laboratoire dans des temps restreints puisque l'analyse de certains paramètres doit être effectuée à l'intérieur de délais limites (Ex: le carbone organique dissous, le carbone inorganique dissous et les analyses bactériologiques doivent être analysés dans de courts délais suivant l'échantillonnage). Vérifier avec les responsables des analyses les délais à respecter avant analyses pour tous les paramètres à analyser.

## **13 Formulaire de demande d'analyse**

Remplir le formulaire de demande d'analyse (généralement fourni par le laboratoire, Blanchette et Roy, 2004). Il peut être important de noter les mesures de terrain telles la conductivité et le pH ainsi des commentaires pour des échantillons très particuliers (ex: eau très saline, très troubles...). Le chimiste responsable des analyses apprécie ces

commentaires qui lui permettent de traiter différemment les échantillons ou de les analyser dans un ordre différent.

#### **14 Envois des échantillons (ex: par Purolator)**

Demander le no de compte du bureau pour obtenir les rabais sur les envois.

Prendre soin d'utiliser du 'bubble wrap' pour entourer les bouteilles de verre pour éviter qu'elles n'éclatent durant le transport et de bien sceller les glaciaires pour éviter qu'elles ne s'ouvrent lors du transport.

#### **15 Références pour l'échantillonnage de l'eau souterraine**

É. Bourque, V. Cloutier, Protocole de prélèvement d'eau souterraine, Caractérisation hydrogéochimique régionale, Projet AFSOQUE, juin 2001.

É. Bourque, R. Lefebvre et R. Martel, Guide méthodologique de cartographie hydrogéologique régionale d'aquifères granulaires, Chapitre 7: Caractérisation géochimique de l'eau souterraine, en révision.

Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des laboratoires (1994). Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, cahiers 1: Généralités, Envirodoq EN940112, 63p., cahier 3: Échantillonnage des eaux souterraines, Envirodoq EN940114, Envirodoq EN940114, 100 p., Éditions le Griffon d'argile.

## **ANNEXE C**

**Caractéristiques techniques des puits  
et contextes géologiques et hydrogéologiques**

## **Légende du Tableau C-1**

**Station:** Identification du site d'échantillonnage

**Localisation:** Localité du site d'échantillonnage

**X:** Coordonnées UTM EST NAD 83 Zone 18, en mètres

**Y:** Coordonnées UTN NORD NAD 83 Zone 18, en mètres

**Z:** Élévation de la surface du sol au site d'échantillonnage, en mètres (DEM)

**Prof:** Profondeur totale du puits, en mètres

**L\_Tub:** Longueur totale du tubage, en mètres

**Ouv:** Ouverture au roc, en mètres (longueur forée ouverte au roc sans cuvelage)

**Ep\_Dm:** Épaisseur totale des dépôts meubles, en mètres

**Code strati.:** Stratigraphie des dépôts meubles (selon Tremblay et Lamothe, 2005)

1: Remblai

2: Dépôts organiques (O) ex: CH-004 Code Strati = 5710 = Siasg/Ma/T

3: Sédiments alluviaux (A)

4: Sédiments glacio-lacustres et lacustres (Lb)

5: Sédiments d'exondation (Siasg)

6: Sédiments marins peu profonds (Mb)

7: Sédiments marins profonds (Ma)

8: Sédiments fluvio-glaciaires (Gs)

9: Sédiments fluvio-glaciaires (Gx)

10: Till (T)

**Unité géologique à la base:** Roc sous-jacent

**Type puits:** Position stratigraphique du puits

Roc: Puits au roc

Mixte: Puits à l'interface sédiments-roc

SS: Puits, et la source, dans les sédiments

SSA: Puits dans les sédiments sous l'argile

**Lithologie exploitée:** Formation exploitée

**C\_Écou:** Conditions d'écoulement de l'eau souterraine

L: Libre

SC: Semi-confinée

C: Confinée

**P\_L\_É:** Position sur la ligne d'écoulement

R: Zone de recharge

I: Zone intermédiaire

E: Zone d'émergence

Tableau C-1: Caractéristiques techniques des puits ainsi que les contextes géologiques et hydrogéologiques

Station	Localisation	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof (m)	L_Tub (m)	Ouv (m)	Ep_Dm (m)	Code Strati.	Unité géologique	Type puits	Lithologie exploitée	C_Écou	P_L_É
CH-002	Sherrington	609656	5002194	53	61.00	17.40	43.60	13.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-003	Sherrington	609656	5002194	53	14.33	12.80	1.53	12.8	10	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	SC	I
CH-004	St-Constant	608980	5024519	32	19.81	9.14	10.67	8.6	5710	Chazy	Roc	Calcaire	C	I
CH-005	Beauharnois	590153	5016782	39	30.48	29.00	1.48	19.5	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	R
CH-006	Ormstown	580608	4992526	66	13.72	10.47	3.25	8.6	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	I
CH-007	Ormstown	587872	4995265	66	30.50	6.40	24.10	3.1	10	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-008	St-Étienne-de-Beauharnois	586017	5006568	38	11.43	9.80	1.63	9.3	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-010	Franklin	590612	4992205	54	91.40	14.20	77.20	11.3	79	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-011	Franklin	591210	4989417	90	39.60	5.20	34.40	4.6	610	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-012	St-Anicet	547013	4995899	45	29.87	17.93	11.94	13.4	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-013	St-Anicet	554589	4992603	74	33.53	15.50	18.03	15.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-014	Hinchinbrook	570600	4988105	55	18.29	6.30	11.99	5.8	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-015	Beauharnois	585165	5013688	40	21.40	18.10	3.30	17.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-016	St-Louis-de-Gonzague	577452	5007352	39	19.81	11.60	8.21	11.1	5710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-017	St-Isidore	604863	5021091	40	24.38	14.40	9.98	13.9	10	Chazy	Roc	Calcaire	SC	I
CH-019	Howick	587443	5001166	37	73.20	32.90	40.30	32.7	1710	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-020	Mercier	600530	5019404	48	6.10	6.10	0.00	6.1	10	Beekmantown	SS	Till	SC	R
CH-022	St-Urbain-Premier	600642	5010759	40	16.76	16.76	0.00	16.6	710	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	C	I
CH-023	St-Constant	610316	5020909	36	12.50	12.50	0.00	12.0	5710	Chazy	Mixte	Till/Calcaire	SC	I
CH-024	Mercier	600366	5017408	48	12.30	12.20	0.10	12.2	8	Beekmantown	Mixte	Sable/Dolomie	SC	R
CH-026	Godmanchester	555422	4986888	52	11.41	6.74	4.67	6.2	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-027	Godmanchester	567046	4998951	52	49.99	7.47	42.52	6.9	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-028	Lery	592710	5019879	37	44.79	25.00	19.79	19.3	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-029	Godmanchester	551376	4986765	89	20.50	20.00	0.50	20.0	9	Beekmantown	Mixte	Sable/Dolomie	C	R
CH-030	Pointe Leblanc	544197	4990958	45	18.29	15.30	2.99	14.8	25710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-031	Elgin	563659	4983806	87	56.39	25.91	30.48	19.4	610	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-032	Godmanchester	559223	4993622	88	48.80	7.30	41.50	2.3	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-033	Godmanchester	551376	4986765	89	48.80	23.45	25.35	19.8	9	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	R
CH-034	Sherrington	609481	4999971	47	57.60	16.40	41.20	14.0	2710	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-035	Hemmingford	605931	4984297	89	29.00	25.90	3.10	25.9	610	Potsdam	Roc	Grès	SC	E
CH-036	St-Louis-de-Gonzague	572564	5005816	43	17.00	8.00	9.00	7.5	5710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-037	Ormstown	571382	4999271	45	24.38	10.29	14.09	9.8	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-038	St-Stanislas-de-Kostka	566425	5005848	45	51.82	4.50	47.32	4.0	5710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-039	Hemmingford	610095	4988964	65	22.50	4.98	17.52	3.9	510	Beekmantown	Roc	Dolomie	L	R
CH-040	St-Bernard	616755	4985525	98	100.58	6.25	94.33	1.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	L	I
CH-041	Athelstan	558670	4983846	60	91.40	11.30	80.10	8.5	610	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E

Tableau C-1: Caractéristiques techniques des puits ainsi que les contextes géologiques et hydrogéologiques (suite)

Station	Localisation	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof (m)	L_Tub (m)	Ouv (m)	Ep_Dm (m)	Strati.	Untié géologique	Type puits	Lithologie exploitée	C_Écou	P_L_É
CH-042	St-Michel	611066	5006737	57	32.90	21.50	11.40	21.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-043	Sherrington	615359	5001814	61	54.86	16.30	38.56	15.8	510	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-044	Sherrington	614888	5004137	60	22.86	9.54	13.32	9.1	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-046	Ste-Clotilde-de-Châteauguay	604427	4994718	50	30.48	30.48	0.00	12.2	210	Potsdam	Roc	Grès	SC	I
CH-047	Ste-Clotilde-de-Châteauguay	604066	5001055	51	18.29	3.50	14.79	3.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-048	Sherrington	613210	4997842	57	24.38	6.70	17.68	6.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-049	Franklin	583427	4984122	242	25.91	14.37	11.54	8.9	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	R
CH-050	Franklin	583003	4986682	142	30.48	4.20	26.28	3.7	610	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-051	Ormstown	573634	4994459	42	18.29	11.99	6.30	5.6	37910	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-052	Hinchinbrook	573543	4984492	123	38.10	27.29	10.81	6.3	610	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-053	Ste-Martine	601795	5011804	43	34.20	28.70	5.50	27.7	17	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-054	Mercier	597135	5013859	38	33.23	33.23	0.00	18.3	7	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-055	St-Rémi	605619	5015835	51	60.30	26.50	33.80	24.4	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-056	St-Urbain-Premier	597995	5009221	38	21.95	18.10	3.85	17.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-057	St-Constant	608501	5018581	44	22.10	16.88	5.22	13.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-058	St-Urbain-Premier	597031	5006045	38	36.58	30.31	6.27	10.0	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-059	St-Urbain-Premier	600367	5006900	58	46.02	27.43	18.59	16.5	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-060	Mercier	596366	5011079	35	35.10	30.00	5.10	29.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-061	St-Louis-de-Gonzague	577351	5003022	42	16.50	9.40	7.10	8.9	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	R
CH-062	Franklin	588586	4985584	244	36.58	2.20	34.38	1.7	610	Potsdam	Roc	Grès	L	R
CH-063	Ste-Clotilde-de-Châteauguay	604075	5004607	63	85.34	14.90	70.44	14.4	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-064	St-Rémi	605110	5008256	53	60.96	21.34	39.62	7.9	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-065	Dundee	544997	4986178	55	18.29	10.40	7.89	9.9	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-066	Dundee	540228	4984396	51	31.24	20.10	11.14	19.6	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-067	St-Anicet	555993	4996519	45	19.81	18.07	1.74	8.9	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-068	Ste-Barbe	565823	5002443	44	53.34	7.88	45.46	7.4	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-069	Cazaville	549395	4992573	60	29.87	17.00	12.87	16.5	610	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-070	Ormstown	575521	4990815	64	16.80	4.90	11.86	4.6	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-071	Huntingdon	570086	4993000	60	45.72	28.20	17.52	27.7	610	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-072	Howick	589640	5000262	40	16.76	15.24	1.52	12.2	710	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-073	Ste-Clotilde-de-Châteauguay	599209	5002013	44	30.48	16.50	13.98	15.3	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	E
CH-075	Lery	594442	5022439	36	22.10	5.40	16.70	4.9	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-076	St-Édouard	616663	5010699	53	41.15	25.90	15.25	20.9	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-077	St-Michel	614909	5014696	58	37.34	13.70	23.64	13.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-078	Hemmingford	615779	4992835	71	21.34	4.57	16.77	4.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-079	Havelock	602595	4991848	56	15.85	3.05	15.85	3.0	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	E

Tableau C-1: Caractéristiques techniques des puits ainsi que les contextes géologiques et hydrogéologiques (suite)

Station	Localisation	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof (m)	L_Tub (m)	Ouv (m)	Ep_Dm (m)	Strati.	Untié géologique	Type puits	Lithologie exploitée	C_Écou	P_L_É
CH-080	St-Chrysostome	600037	4997598	54	22.86	4.70	18.16	4.2	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	I
CH-081	Hemmingford	603007	4988867	74	14.33	3.81	10.52	3.3	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	E
CH-082	Hemmingford	610252	4995039	63	60.96	22.86	38.10	15.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-083	St-Isidore	603279	5017213	51	107.00	17.00	90.00	16.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-084	St-Rémi	604427	5009305	54	36.58	12.20	24.38	11.7	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-085	Ste-Barbe	559431	5002295	48	6.86	6.86	0.00	6.4	10	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	SC	E
CH-086	St-Anicet	554739	5001544	47	10.67	5.79	4.88	5.3	5710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-087	Howick	589420	4997354	62	12.19	10.19	2.00	9.7	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	I
CH-088	Howick	595366	5002890	52	10.67	8.67	2.00	8.2	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	I
CH-089	St-Étienne de Beauharnois	588032	5011218	40	12.19	12.19	0.00	11.7	10	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	SC	R
CH-090	St-Mathieu	613532	5020135	37	24.38	9.20	15.18	8.7	5710	Chazy	Roc	Calcaire	SC	I
CH-091	St-Rémi	607317	5013417	47	90.00	13.40	76.60	7.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-092	St-Rémi	605768	5010815	58	45.72	8.53	37.19	8.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-093	St-Rémi	609659	5012030	61	28.70	18.00	10.70	17.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-094	Hemmingford	606540	4989029	71	15.20	13.70	1.50	13.4	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-095	Ormstown	579382	5000644	43	10.67	9.14	1.52	1.2	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	L	I
CH-096	St-Chrysostome	597941	4994784	53	56.39	8.53	47.85	5.7	10	Potsdam	Roc	Grès	L	E
CH-097	Châteauguay	601640	5022161	41	45.72	15.30	30.42	14.8	10	Chazy	Roc	Calcaire	SC	R
CH-098	Ormstown	580344	4996304	47	38.10	9.60	28.50	9.1	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-099	Franklin	582110	4990690	86	60.00	6.50	53.50	6.0	6	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-100	St-Antoine-Abbé	593549	4989106	96	91.40	6.40	85.00	2.6	6	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-101	Franklin	585339	4987513	121	38.70	6.00	32.70	3.0	10	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-102	Howick	585952	4999758	36	36.58	26.10	10.48	25.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-103	Ormstown	576090	4996526	40	33.53	14.70	18.83	14.2	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-104	Athelstan	578504	4985684	139	30.48	6.90	23.58	6.4	610	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-105	St-Antoine-Abbé	588157	4991326	63	15.85	7.62	8.23	5.7	710	Potsdam	Roc	Grès	SC	E
CH-107	Ste-Martine	594617	5008160	33	33.22	27.43	5.79	24.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-108	St-Chrysostome	597229	4996875	41	53.34	21.50	31.84	20.6	710	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-109	St-Chrysostome	592731	4997137	46	51.82	8.00	43.82	7.5	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	I
CH-110	Huntingdon	562845	4995614	46	8.56	8.43	0.13	4.5	210	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-111	HinchinbrookE	565889	4992051	50	54.86	25.00	29.86	24.5	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-112	Godmanchester	562031	4990155	47	47.85	7.40	40.45	6.9	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-113	Elgin	562562	4987264	53	14.33	6.40	7.93	5.9	9	Beekmantown	Roc	Dolomie	L	E
CH-114	Port Laplante	592918	4985646	316	91.40	6.10	85.30	0.3	2	Potsdam	Roc	Grès	L	R
CH-115	Havelock	597166	4984860	212	123.44	30.14	93.30	0.6	10	Potsdam	Roc	Grès	SC	R
CH-116	St-Anicet	560250	4997708	44	64.01	11.71	52.30	3.3	25710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R



Tableau C-1: Caractéristiques techniques des puits ainsi que les contextes géologiques et hydrogéologiques (suite)

Station	Localisation	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof (m)	L_Tub (m)	Ouv (m)	Ep_Dm (m)	Strati.	Untié géologique	Type puits	Lithologie exploitée	C_Écou	P_L_É
CH-117	St-Michel	612663	5004734	59	91.40	13.70	77.70	10.8	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-118	Sherrington	616900	4998990	50	45.72	10.50	35.22	10.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-119	Ste-Clotilde-de-Châteauguay	607127	5002404	51	76.20	6.50	69.70	6.0	127	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-120	Dewittville	569474	4995037	45	36.58	14.02	22.56	12.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-121	Havelock	598255	4988713	86	16.50	2.70	13.80	2.7	10	Havelock	Roc	Grès	SC	I
CH-122	Havelock	586464	4984960	230	0.00	0.00	0.00	0.0	10	Potsdam	SS	Till	SC	R
CH-123	Havelock	590251	4985530	280	25.90	6.40	19.50	5.8	610	Potsdam	Roc	Grès	L	R
CH-124	Athelstan	567422	4986850	60	9.14	9.14	0.00	8.6	10	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	SC	I
CH-125	St-Michel	611800	5009122	62	45.72	30.48	15.24	14.5	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-126	St-Anicet	553708	4997866	49	54.90	23.20	31.70	21.3	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-127	St-Louis-de-Gonzague	580165	5005677	42	16.46	6.10	10.36	5.6	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-128	Howick	590377	5004330	37	61.00	33.00	28.00	27.0	7	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-129	St-Isidore	602347	5013784	42	67.06	26.82	40.24	15.1	7	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-131	St-Chrysostome	594318	4992738	50	16.50	9.10	7.40	8.5	7	Potsdam	Roc	Grès	C	E
CH-132	St-Antoine-Abbé	584900	4991310	88	22.86	1.70	21.16	1.2	6	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-133	Très St-Sacrement	584965	5002562	35	16.92	15.24	1.68	14.1	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E
CH-134	St-Antoine-Abbé	587412	4989448	93	24.10	6.00	16.60	5.5	610	Potsdam	Roc	Grès	L	I
CH-135	Hemmingford	611873	4988734	77	76.20	67.97	8.23	68.0	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-136	Ste-Clotilde-de-Châteauguay	603800	5001420	60	56.39	13.41	42.98	12.1	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	E
CH-137	Ste-Martine	593350	5013600	35	25.91	25.91	0.00	25.4	7	Beekmantown	Mixte	Argile/Dolomie	C	E
CH-138	St-Stanislas-de-Kostka	568300	5003250	46	30.48	7.70	22.78	7.2	5710	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-139	St-Étienne de Beauharnois	584980	5011100	37	22.86	11.40	11.46	10.9	710	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	I
CH-140	Sherrington	612661	5004756	59	11.90	11.40	0.50	11.4	10	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	SC	R
CH-141	Athelstan	558670	4983841	60	7.00	7.00	0.00	7.0	610	Beekmantown	SS	Till	SC	I
CH-142	St-Anicet	553715	4997859	49	20.70	20.70	0.00	20.7	710	Beekmantown	SSA	Till	C	I
CH-143	Franklin	590578	4992201	54	11.30	11.00	0.30	11.0	710	Potsdam	Mixte	Till/Grès	C	E
CH-144	Sherrington	609451	4999970	47	13.70	13.70	0.00	13.7	2710	Potsdam	SSA	Argile/Till	C	E
CH-145	St-Isidore	603815	5010437	44	80.80	12.20	68.60	12.2	27	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-146	Mercier	599413	5015741	44	40.10	34.00	6.10	33.4	9	Beekmantown	Roc	Dolomie	L	R
CH-147	St-Constant	611701	5023982	26	13.41	6.60	7.32	6.1	7	Utica	Roc	Shale	C	I
CH-148	Kanawakhe	608413	5027415	29	18.90	5.79	13.11	5.5	10	Chazy	Roc	Calcaire	SC	E
CH-149	Kanawakhe	600738	5027921	27	32.00	4.57	27.43	4.3	10	Chazy	Roc	Calcaire	SC	E
CH-150	Godmanchester	550622	4983305	61	10.06	10.06	0.00	9.6	710	Beekmantown	Mixte	Till/Dolomie	C	R
CH-151	Athelstan	566860	4983119	114	60.96	54.86	6.10	36.4	610	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	I
CH-152	Hemmingford	609640	4984858	104	53.34	2.43	50.91	1.2	10	Beekmantown	Roc	Dolomie	SC	R
CH-200	Mercier	596205	5017258	38	18.30	11.00	7.30	10.1	7910	Beekmantown	Roc	Dolomie	C	E

# ANNEXE D

## Résumés des méthodes analytiques

D-1: Paramètres inorganiques

D-2: Paramètres bactériologiques

D-3: Isotopes stables  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$

D-4: Isotopes stables  $\delta^{13}\text{C}$  et radioactif Tritium ( $^3\text{H}$ )

D-5: Carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ )

## D-1

### **Méthodes analytiques pour les paramètres inorganiques**

Les analyses ont été effectuées par le Laboratoire de la qualité du milieu et le Laboratoire des pollutions industrielles du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) du Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs (MDDEP).

Cette annexe présente, avec l'autorisation du CEAEQ, le domaine d'application, le principe et la théorie de chacune des méthodes analytiques listées ci-dessous. Les descriptions complètes des méthodes analytiques sont accessibles sur le site internet du CEAEQ; <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/> sous la rubrique Analyses de laboratoire: Méthodes d'analyses chimiques inorganiques

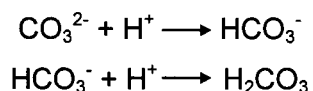
1. Alcalinité totale et Chlorures (Cl) par titrage: MA 303-Titr Auto 1.0
2. Azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>) par colorimétrie: MA-303-N 1.0
3. Carbone inorganique dissous (CID) et Carbone organique dissous (COD) par détection infrarouge: MA-300-C 1.0
4. Couleur vraie par colorimétrie: MA. 103-Col. 1.0
5. Cyanures totaux par colorimétrie: MA-300-CN 1.1
6. Fluorures (F) par colorimétrie: MA-303-F 1.0
7. Nitrites-Nitrates (NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>) par colorimétrie: MA-303-NO3 1.0
8. Phosphore inorganique total (P-ino) par colorimétrie: MA. 300-P.ino 1.0
9. Sulfates (SO<sub>4</sub>) par colorimétrie: MA-303-SO<sub>4</sub> 1.0
10. Sulfures totaux par colorimétrie: MA. 300-S 1.1

#### **1 Alcalinité totale et Chlorures (Cl) par titrage: MA 303-Titr Auto 1.0**

Cette méthode s'applique à la détermination de l'alcalinité et des chlorures dans l'eau potable, les eaux souterraines et les eaux de surface. La configuration. La configuration du titrateur automatique permet le titrage d'échantillons jusqu'à une alcalinité d'environ 370 mg/L CaCO<sub>3</sub> ou une concentration en chlorures d'environ 190 mg/L de Cl<sup>-</sup>. La plage de titrage peut être étendue en effectuant les dilutions appropriées. La limite inférieure est de 0,4 mg/L pour les chlorures et de 0,2 mg/L CaCO<sub>3</sub> pour l'alcalinité.

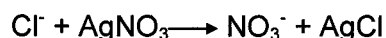
Le titrateur analyse de façon séquentielle l'alcalinité et les chlorures. L'échantillon est transféré dans un vase d'analyse pour le titrage de l'alcalinité et ensuite celui des chlorures.

Le titrage de l'alcalinité est basé sur la diminution du pH qui existe entre les réactifs et les produits de réaction. L'alcalinité d'un échantillon est déterminée par un titrage avec une solution d'acide nitrique.



Au fur et à mesure du titrage, le pH diminue légèrement. Lorsque l'échantillon contient des carbonates, un premier point d'équivalence peut être observé aux environs de pH 8,3. Ce point correspond à la transformation des ions carbonates et bicarbonates. Cependant, l'alcalinité est mesurée au deuxième point d'équivalence, celui correspondant à la transformation du bicarbonate en acide carbonique. Ce point d'équivalence se trouve aux environs de pH 4,3.

Lorsque l'alcalinité de l'échantillon est complètement neutralisée, la détermination des chlorures peut être réalisée. L'acidité de l'échantillon, à la suite de l'ajout d'acide nitrique, permet l'élimination de certaines impuretés. Le titrage potentiométrique s'effectue selon la réaction suivante:



Au point d'équivalence, l'excès de la solution de nitrate d'argent produit une remontée du potentiel jusqu'à environ 300 mV.

## **2 Azote ammoniacal (NH<sub>4</sub>) par colorimétrie: MA-303-N 1.0**

Cette méthode est utilisée pour la détermination de l'azote ammoniacal dans l'eau potable, les eaux usées et souterraines, les eaux de surface et les eaux de précipitation. La plage d'étalonnage se situe entre 0 et 2,00 mg/l N-NH<sub>3</sub>. Le domaine d'application peut être étendu en effectuant les dilutions appropriées.

L'azote ammoniacal est déterminé par colorimétrie. Une solution de tartrate de potassium et de citrate de sodium est ajoutée à l'échantillon afin d'éviter la précipitation

subséquentes d'hydroxydes de calcium et de magnésium. Par la suite, l'azote ammoniacal réagit en présence de salicylate, de nitroprussiate de sodium et de chlore actif pour former un complexe vert dont l'absorbance à 660 nm est proportionnelle à la concentration d'azote ammoniacal. Le système utilisé pour le dosage est présenté à la Figure 1.

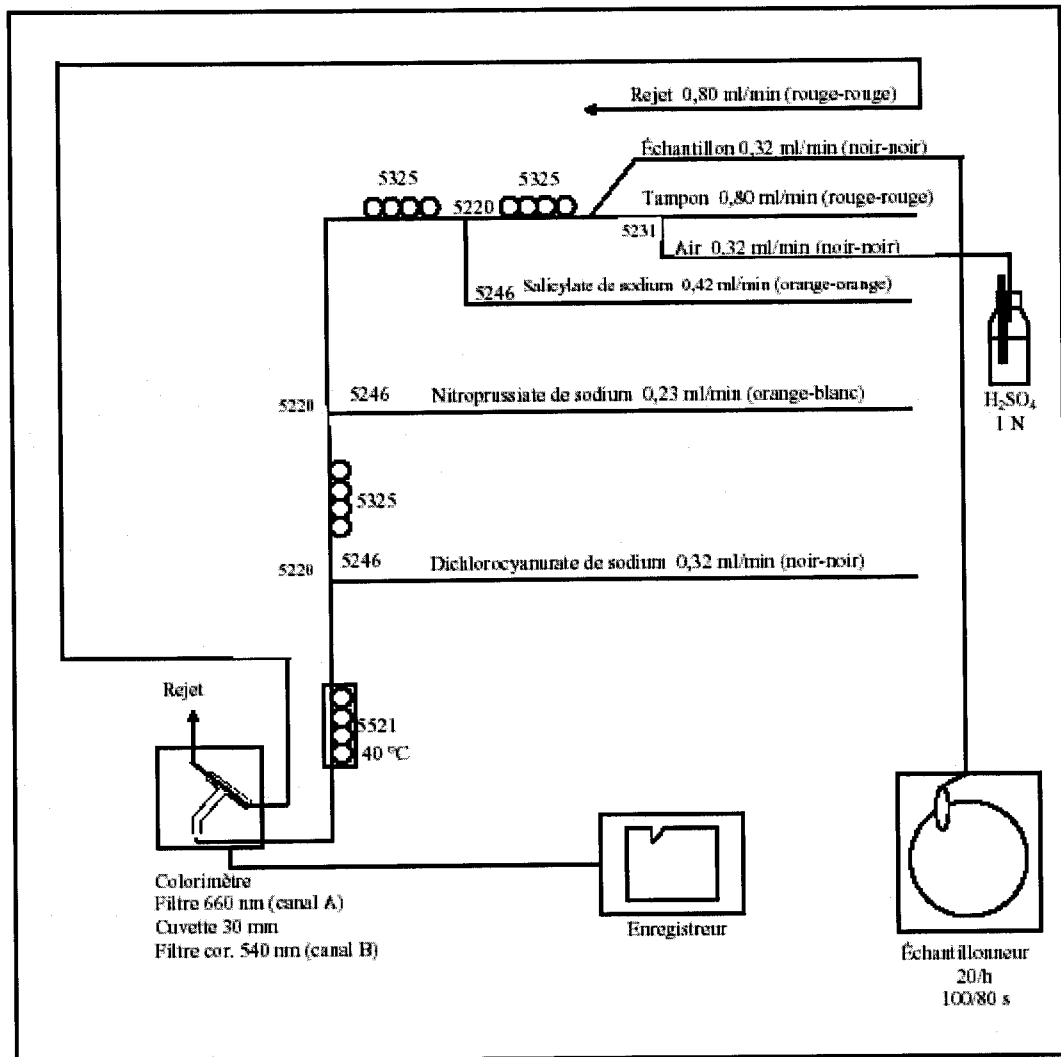


Figure 1: Schéma du système de dosage automatisé de l'azote ammoniacal

### **3 Carbone inorganique dissous (CID) et Carbone organique dissous (COD) par détection infrarouge: MA-300-C 1.0**

Cette méthode s'applique à la détermination du carbone organique dissous et du carbone inorganique dissous dans les eaux souterraines, les eaux de surface et les eaux usées de même qu'à la détermination du carbone organique total dans l'eau potable. Le domaine d'application se situe entre 0,20 et 20 mg/l C.

Pour l'analyse du carbone organique total (COT), tout comme le carbone organique dissous (COD), l'échantillon contenant des composés carbonylés est introduit dans un tube chauffé à 680 °C qui contient un catalyseur agissant comme oxydant. Les composés de combustion et de dégradation sont sous forme de CO<sub>2</sub>, qui est analysé par détection infrarouge et quantifié par comparaison à une courbe d'étalonnage. Le carbone organique dissous (COD) et le carbone organique total (COT) réfèrent au carbone organique non volatile, qui est mesuré en acidifiant l'échantillon au préalable à l'aide de l'acide chlorhydrique 1 N et en y faisant barboter de l'air de qualité ultra-pure. Pour la détermination du carbone inorganique dissous (CID), l'échantillon et une solution acide (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) sont mis en contact dans un tube réacteur à l'intérieur duquel barbote un gaz vecteur. Seuls les composés inorganiques sont décomposés en CO<sub>2</sub>, qui est détecté par l'analyseur infrarouge. Le carbone qui est sous forme de carbonate et bicarbonate est mesuré par cette méthode (CID).

### **4 Couleur vraie par colorimétrie: MA. 103-Col. 1.0**

Cette méthode s'applique à la détermination de la couleur dans les eaux souterraines, les eaux de surface, les eaux usées, les eaux de précipitation et l'eau potable. La plage d'étalonnage se situe entre 0 et 100 unités de couleur vraie (U.C.V.). Le domaine d'application peut être étendu en effectuant les dilutions appropriées.

Il existe deux mesures de la couleur, soit la couleur vraie et la couleur apparente. La couleur vraie est la mesure de la couleur d'une eau non turbide ne contenant aucune matière en suspension. La couleur apparente est la mesure de la couleur d'une eau qui contient de la matière en suspension. Elle est mesurée sur l'échantillon original qui n'a subi aucune filtration ou centrifugation. Généralement, dans l'eau potable et les eaux de surface, la mesure de la couleur est une mesure de couleur vraie. L'échantillon est centrifugé et la mesure de la couleur est effectuée d'après l'échelle platino-cobalt en

comparant la couleur de l'échantillon à celle d'une série de solutions étalons. Le dosage de la couleur s'effectue à l'aide d'un colorimètre.

### 5 Cyanures totaux par colorimétrie: MA-300-CN 1.1

Cette méthode s'applique à la détermination des cyanures dans les échantillons aqueux et dans les solides. Le domaine d'étalonnage se situe entre 0,010 mg/l et 0,20 mg CN/L.

La détermination des cyanures totaux s'effectue en deux étapes. La première étape consiste à distiller l'échantillon pour éliminer les interférences et dissocier la plupart des complexes cyanurés. Dans la seconde étape, les cyanures extraits sont libérés sous forme d'acide cyanhydrique et réagissent avec une solution de chloramine-T en milieu tamponné pour former du chlorure de cyanogène. Le chlorure de cyanogène ainsi formé réagit avec de la pyridine et de l'acide barbiturique pour former un complexe rouge dont l'absorbance à 570 nm est proportionnelle à la concentration des cyanures. Le dosage est fait en utilisant un analyseur de cyanures contenant un système de distillation (Figure 2). S'il y a présence de solides dans l'échantillon à doser, laisser décanter ou filtrer sur 0,8 µm. Utiliser uniquement la portion liquide pour le dosage.

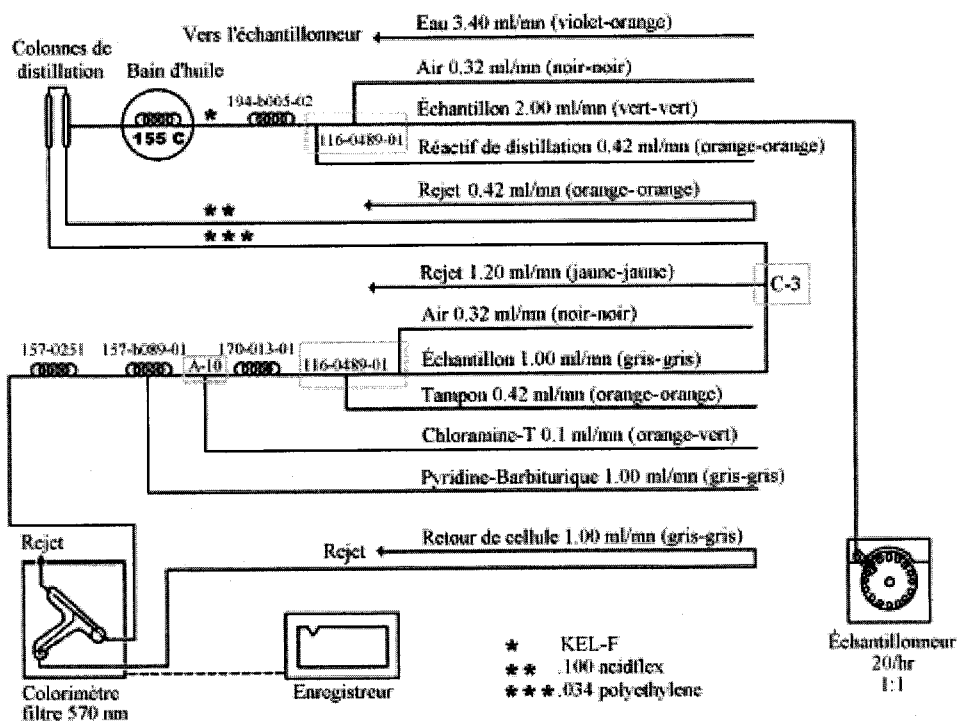


Figure 2: Schéma du montage automatisé pour le dosage des cyanures

## 6 Fluorures (F) par colorimétrie: MA-303-F 1.0

Cette méthode est utilisée pour la détermination des fluorures dans les eaux souterraines, les eaux de surface, les eaux de précipitations et l'eau potable. La plage d'étalonnage se situe entre 0,04 mg/l et 2,00 mg/l F.

Les fluorures contenus dans l'échantillon sont séparés des autres constituants non volatils par distillation en milieu acide. Le distillat est mélangé avec une solution d'alizarine et de lanthane pour former un complexe bleu dont l'absorbance à 619 nm est proportionnelle à la concentration des fluorures. Le système du dosage est présenté à la Figure 3.

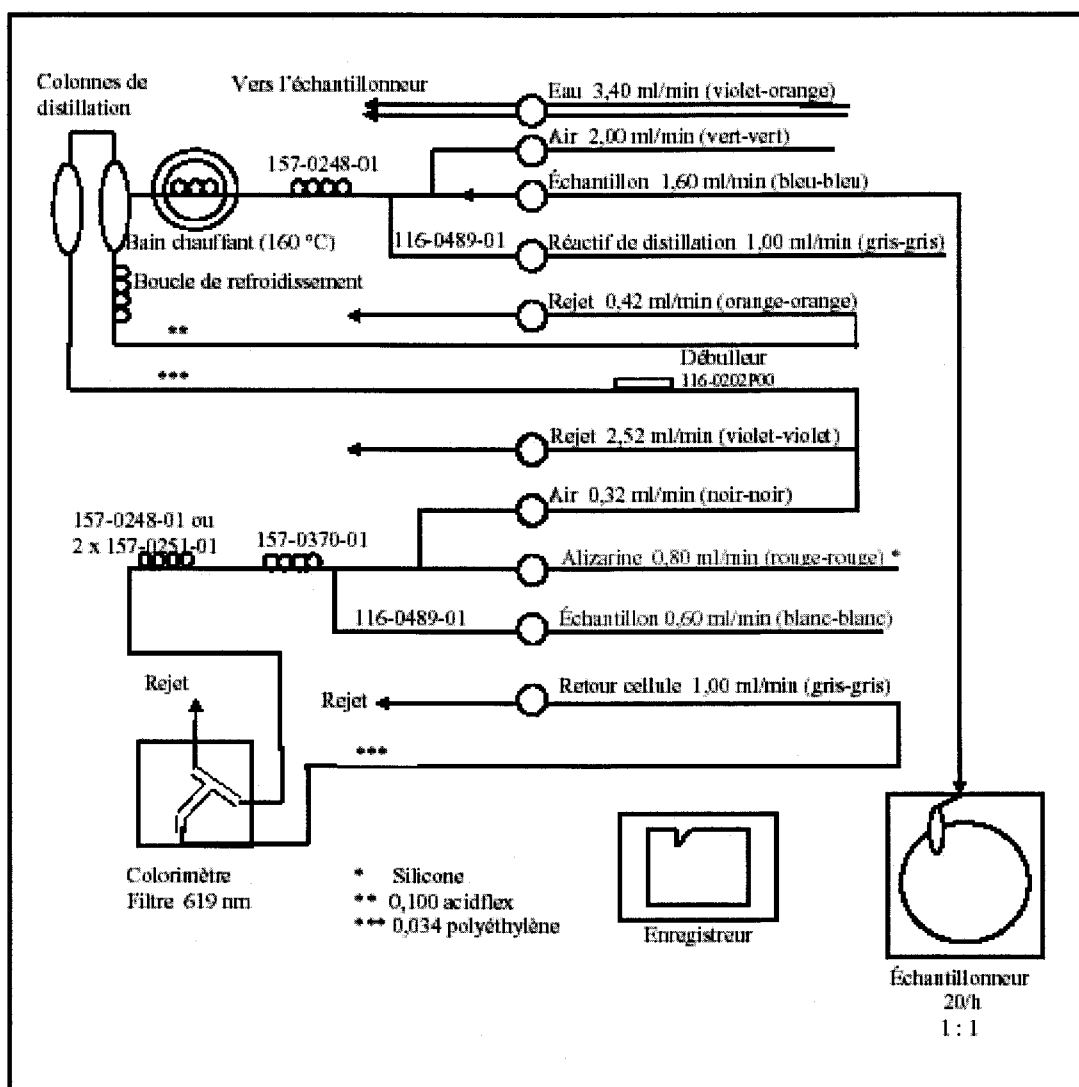


Figure 3: Schéma du système de dosage automatisé des fluorures



## 7 Nitrites-Nitrates (NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>) par colorimétrie: MA-303-NO3 1.0

Cette méthode s'applique à la détermination des ions nitrate et nitrite (NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub>) et du nitrite (NO<sub>2</sub>) dans l'eau potable, les eaux usées, les eaux souterraines et les eaux de surface. La plage d'étalonnage des ions nitrate et nitrite se situe entre 0,02 et 2,00 mg/l N-NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub> et celle du nitrite, entre 0,02 et 0,50 mg/l N-NO<sub>2</sub>. Le domaine d'application peut être étendu en effectuant les dilutions appropriées. Il existe des méthodes plus sensibles pour doser l'ion nitrite.

Pour la détermination des ions nitrate et nitrite, le nitrate est d'abord réduit en nitrite en milieu alcalin par l'intermédiaire du sulfate d'hydrazine. En présence de sulfate de cuivre qui agit comme catalyseur. Le nitrite peut être dosé sans le nitrate en éliminant l'étape de réduction. Le nitrite réagit avec le sulfanilamide pour former un composé diazoïque qui se combine en milieu acide avec le dihydrochlorure de N-(1-naphthyl)-éthylènediamine pour former un composé rosé à violet dont l'absorbance à 520 nm est proportionnelle à la concentration des ions nitrite et nitrate. Pour le dosage des ions nitrate et nitrite, assembler le système à réaction présenté à la Figure 4.

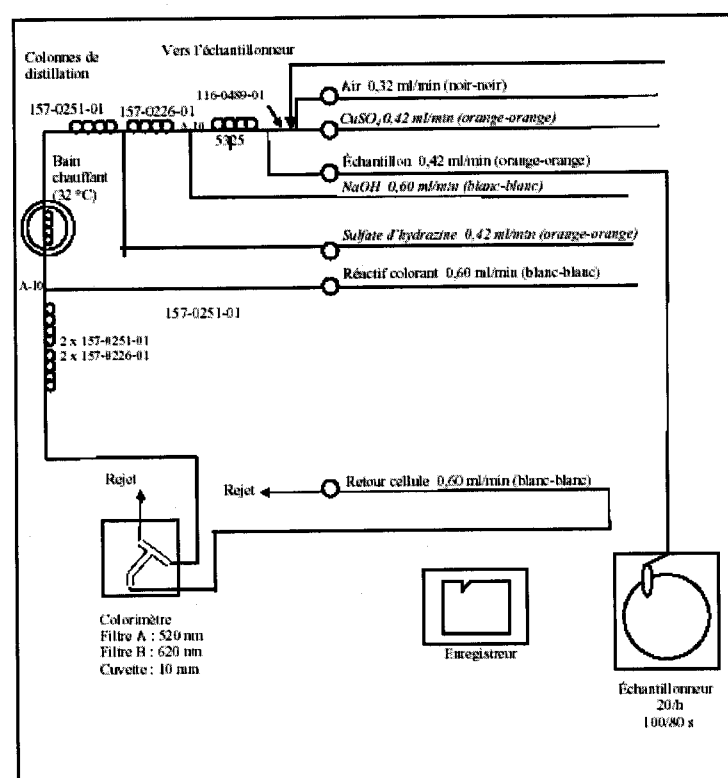


Figure 4: Schéma du système de dosage automatisé des ions nitrate et nitrite

## 8 Phosphore inorganique total (P-ino) par colorimétrie: MA. 300-P.ino 1.0

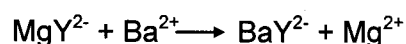
Cette méthode s'applique à la détermination du phosphore inorganique total dans les liquides aqueux et dans les solides. Le domaine d'étalonnage se situe entre 0,5 et 5,0 mg/L P pour les solutions étalons.

La détermination du phosphore inorganique s'effectue en deux étapes. La première consiste en une hydrolyse acide des phosphates présents dans l'échantillon. Dans la seconde étape, l'ion orthophosphate réagit avec l'ion molybdate et l'ion antimoine pour former un complexe phosphomolybdate. Ce dernier est réduit avec l'acide ascorbique en milieu acide pour provoquer l'apparition du bleu de molybdène, dont l'absorbance à 660 nm est proportionnelle à la concentration de l'ion orthophosphate présent dans l'échantillon. Le dosage est fait en utilisant un analyseur de phosphates.

## 9 Sulfates (SO<sub>4</sub>) par colorimétrie: MA-303-SO<sub>4</sub> 1.0

Cette méthode s'applique à la détermination des sulfates dans les eaux souterraines, les eaux de surface, les eaux usées et l'eau potable. La plage d'étalonnage se situe entre 0,5 et 50 mg/l SO<sub>4</sub>. Le domaine d'application peut être étendu en effectuant les dilutions appropriées. Toutefois, lorsqu'on est en présence d'échantillons à faible teneur en sulfates, une configuration alternative de l'instrumentation permet d'analyser les sulfates sur une étendue comprise entre 0,5 et 20 mg/l SO<sub>4</sub>.

L'échantillon et une solution de sulfate de sodium (2 mg/l) sont pompés simultanément à travers une résine cationique (Na<sup>+</sup>). L'utilisation de la résine a pour but d'enlever le magnésium contenu initialement dans l'échantillon ainsi que les autres cations bivalents et trivalents susceptibles de réagir avec la calmagite. Par la suite, les sulfates présents dans l'échantillon réagissent avec les ions baryum pour précipiter sous la forme de sulfate de baryum. L'ajout initial de sulfate de sodium permet d'établir la ligne de base en créant une légère absorbance. Les ions baryum en excès déplaceront l'équilibre du complexe magnésium-EDTA, pour permettre la formation d'un complexe plus stable, baryum-EDTA, selon l'équation suivante :



où

MgY<sup>2-</sup> représente le complexe magnésium - E.D.T.A.

BaY<sup>2-</sup> représente le complexe baryum - E.D.T.A.

Le magnésium ainsi libéré réagit avec la calmagite pour former un complexe dont l'absorbance à 612 nm est inversement proportionnelle à la concentration des sulfates. Le système de dosage est présenté à la Figure 5.

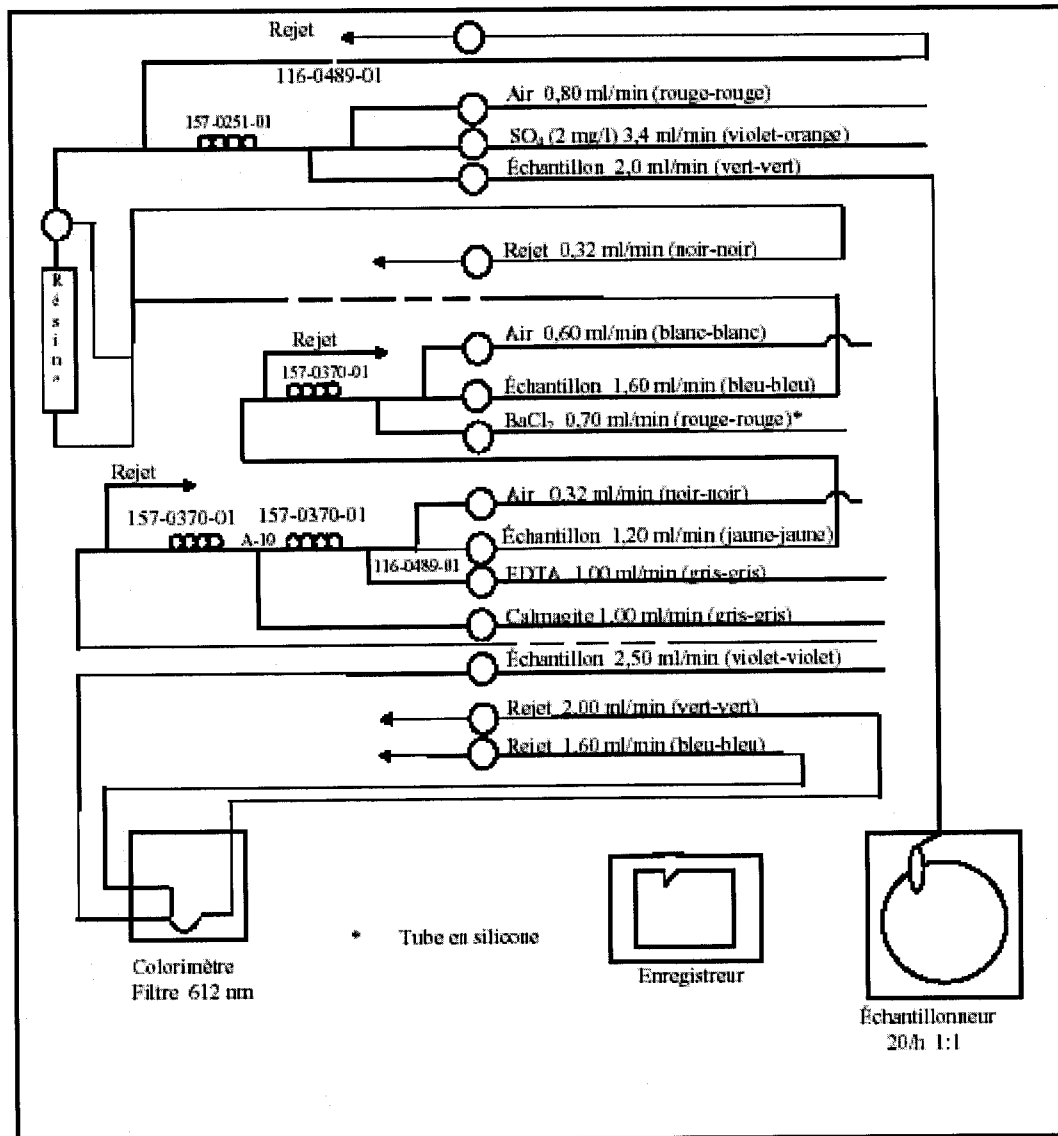


Figure 5: Schéma du système de dosage automatisé des sulfates, pour la plage comprise entre 0,5 et 50 mg/l SO<sub>4</sub>

## **10 Sulfures totaux par colorimétrie: MA. 300-S 1.1**

Cette méthode s'applique à la détermination des sulfures totaux dans toutes les matrices et du potentiel de génération du sulfure d'hydrogène dans les solides et les liquides tels que définis dans le règlement sur les matières dangereuses (Q-2, R. 15.2). Le domaine d'étalonnage se situe entre 0,10 mg/L et 1,0 mg/L S<sup>-2</sup> pour les solutions étalons.

La méthode consiste à faire réagir les sulfures avec le chlorure ferrique et l'oxalate du N, N-Diméthyl-p-phénylènediamine pour former du bleu de méthylène. Un tampon basique est ajouté pour éliminer la couleur due à l'ion ferrique. Pour les échantillons qui contiennent beaucoup de matières en suspension ou qui sont fortement colorés avant l'ajout de N, N-Diméthyl-p-phénylènediamine, une distillation préalable est faite en milieu acide. L'absorbance à 664 nm du complexe bleu ainsi formé est proportionnelle à la concentration des sulfures présents dans le barboteur. Le dosage se fait à l'aide d'un spectrophotomètre.

### **D-2**

#### **Méthode analytique pour les paramètres microbiologiques**

Les analyses ont été effectuées par le Laboratoire de la qualité du milieu du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) du Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs (MDDEP).

Cette annexe présente, avec l'autorisation du CEAEQ, le domaine d'application, le principe et la théorie de la méthode analytique ci-dessous. La description complète de la méthode analytique est accessible sur le site internet du CEAEQ; <http://www.ceaeg.gouv.qc.ca/> sous la rubrique Analyses de laboratoire: Méthodes d'analyses biologiques, microbiologiques et toxicologiques

1. Recherche et dénombrement simultanés des coliformes totaux et d'*Escherichia coli* dans l'eau potable avec le milieu de culture MI : méthode par filtration sur membrane: MA-700-CCCTMI 1.0

## **1 Recherche et dénombrement simultanés des coliformes totaux et d'*Escherichia coli* dans l'eau potable avec le milieu de culture MI : méthode par filtration sur membrane: MA-700-CCCTMI 1.0**

Cette méthode permet de détecter et de dénombrer les coliformes totaux ainsi que l'espèce *Escherichia coli* (*E. coli*) dans les échantillons d'eau relativement propre telle que l'eau potable. Elle peut être utilisée pour le contrôle de la qualité de l'eau potable selon les normes du RQEP. Cette méthode ne permet pas le dénombrement des coliformes fécaux ni l'identification des souches pathogènes d'*E. coli*.

La technique de la membrane filtrante consiste à filtrer un volume plus ou moins grand d'eau à travers une membrane stérile contenant des pores de 0,45 µm. Les coliformes totaux et *E. coli* sont retenus sur la membrane. Celle-ci est alors déposée sur le milieu de culture sélectif et différentiel MI qui est incubé à une température de 35 °C pendant 24 h pour permettre la croissance des colonies.

Le milieu de culture MI contient du MUGal (4-méthylumbelliferyl-β-D-galactopyranoside) et de l'IBDG (indoxyl-β-D-glucuronide). Lorsque des coliformes totaux sont présents dans l'échantillon, le MUGal est utilisé par l'enzyme β-D-galactosidase, un enzyme spécifique au groupe des coliformes totaux. Les colonies bactériennes qui utilisent le MUGal deviennent fluorescentes sous un éclairage ultraviolet (365 nm) et constituent des coliformes totaux. Lorsque *E. coli* est présent dans l'échantillon, l'IBDG est utilisé par l'enzyme β-D-glucuronidase, une enzyme spécifique à *E. coli*. Les colonies qui utilisent l'IBDG deviennent bleues (éclairage normal) et appartiennent à l'espèce *E. coli*.

Le peptone de protéose no 3 et l'extrait de levure sont des ingrédients habituels des milieux de culture. Ils servent à soutenir la croissance des bactéries. Le D-lactose est utilisé comme source de carbone et d'énergie et sert également à induire la production de l'enzyme β-D-galactosidase par les coliformes totaux. Les sels (NaCl, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> et KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) servent de nutriments généraux ainsi qu'à maintenir un pH neutre afin de prévenir les effets néfastes de la production d'acide à la suite de l'utilisation du lactose et des autres nutriments.

Le lauryl sulfate de sodium et le désoxycolate de sodium servent à inhiber la croissance des coques à Gram positif et des bactéries sporulées. L'antibiotique cefsulodine est utilisé pour inhiber les bactéries à Gram positif et quelques bactéries à Gram négatif telles que *Aeromonas sp.*

Il est à noter que cette méthode sert à détecter l'*E. coli* « générique » et qu'elle ne permet pas de détecter et d'identifier les souches pathogènes d'*E. coli* telles que la bactérie *E. coli* O157:H7, qui est  $\beta$ -D-glucuronidase négative.

### D-3

#### **Méthodes analytiques Isotopes stables d2H et d18O**

Les analyses ont été effectuées par le laboratoire de la CGC-Québec, le Delta-Lab. Cette annexe présente, avec l'autorisation du Delta-Lab, une brève description des méthodes analytiques listées ci-dessous.

1. Gasbench II: Automated H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O equilibration for  $\delta$ D determination of aqueous samples
2. Gasbench II: <sup>18</sup>O-Equilibration on water, fruit juice, and wine

#### **1 Gasbench II: Automated H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O equilibration for $\delta$ D determination of aqueous samples**

Un volume de 200 uL à 500 uL d'eau est inséré dans une fiole avec une catalyse en platine. Le surplus d'air est remplacé par un mélange gazeux composé de 2% de H<sub>2</sub> et d'hélium. Un délai de 40 minutes est observé pour l'atteinte de l'équilibre isotopique entre les atomes d'hydrogène de l'eau et l'hydrogène gazeux (H<sub>2</sub>). Le mélange eau-gaz est ensuite injecté dans un chromatographe à gaz où l'eau et l'hélium du mélange sont retirés. L'hydrogène gazeux résiduel est entraîné par un gaz porteur jusqu'à un spectromètre de masse DELTA<sup>plus</sup>XL MAT 253 ThermoFinnigan où le ratio isotopique  $\delta^2$ H par rapport au standard de référence VSMOW est mesuré.

#### **2 Gasbench II: <sup>18</sup>O-Equilibration on water, fruit juice, and wine**

Suivre la même procédure que pour l'analyse isotopique du <sup>2</sup>H. Aucun catalyseur n'est utilisé, le surplus d'air est remplacé par un mélange de 0.3% de CO<sub>2</sub> et d'hélium, le temps d'équilibre isotopique est d'environ 24 hrs, c'est le ratio isotopique des atomes d'oxygène (<sup>18</sup>O) du CO<sub>2</sub> qui sont analysés au spectromètre de masse.

### 3 Référence

Horita, J. and Kendall, C., 2004. Stable isotope analysis of water and aqueous solutions by conventional dual-inlet mass spectrometry. *In P.A de Groot editor, Handbook of stable isotope analytical techniques, volume I, Elsevier, Amsterdam, chapter 1, p. 1-37.*

## D-4

### Méthodes analytiques Isotopes stable $\delta^{13}\text{C}$ et radioactif Tritium ( $^3\text{H}$ )

Les analyses ont été effectuées par le Environmental Isotope Laboratory (EIL) de l'Université de Waterloo.

Cette annexe présente, avec l'autorisation du EIL, une brève description des méthodes analytiques listées ci-dessous. Les descriptions complètes des méthodes analytiques sont accessibles via le site internet du Environmental Isotope Laboratory; <http://www.science.uwaterloo.ca/research/eilab/About/> sous la rubrique Methodology: Techniques by sample type

1.  $\delta^{13}\text{C}$ : Dissolved Inorganic Carbon (DIC) [TP 05]
2. Tritium ( $^3\text{H}$ ): Direct and Enriched [TP 01]

#### 1 $\delta^{13}\text{C}$ : Dissolved Inorganic Carbon (DIC) [TP 05]

Pour l'analyse isotopique du  $^{13}\text{C}$  par spectromètre de masse, le carbone inorganique dissous (CID, DIC en anglais) contenu dans l'eau souterraine est transformé en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) par un traitement à l'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) sous vide. Le  $\text{CO}_2$  est purifié par une distillation à froid. Il est ensuite transféré au spectromètre de masse et analysé sur le MM 903 ou le PRISM pour le  $\delta^{13}\text{C}$  en respect au PDB.

#### 2 Tritium ( $^3\text{H}$ ): Direct and Enriched [TP 01]

La technique de comptage par scintillation liquide est utilisée pour la détection et la quantification du tritium. Les échantillons d'eaux souterraines sont enrichis en tritium par

électrolyse est ensuite le tritium est quantifié par comptage (cpm: comptage par minute). La mesure de tritium est ensuite convertie en concentration absolue (TU: unité de tritium) selon:

$$1 \text{ TU} = 1 - {}^3\text{H}/10^{18} - {}^1\text{H} = 7.19 \text{ dpm/l} = 3.26 \text{ pCi/l} = 0.11815 \text{ Bq/l}$$

## D-5

### **Méthode analytique Carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ )**

Les analyses ont été effectuées par le Isotrace Laboratory de l'Université de Toronto.

Cette annexe présente, avec l'autorisation du Isotrace Laboratory, une brève description de la méthode analytique listée ci-dessous. La description complète de la méthode analytique est accessible via le site internet du Isotrace Laboratory; <http://www.physics.utoronto.ca/~isotrace/>.

#### **1 Carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) par la méthode AMS (Acceleration Mass Spectrometry)**

Pour l'analyse du  $^{14}\text{C}$  par AMS le carbone inorganique dissous (CID, DIC en anglais) contenu dans l'eau souterraine est transformé en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) par un traitement à l'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) sous vide. Le  $\text{CO}_2$  est purifié par une distillation à froid. Cette étape est réalisée au Environmental Isotope Laboratory qui transfère une portion du volume de  $\text{CO}_2$  au Isotrace Laboratory de l'Université de Toronto.

Le  $\text{CO}_2$  est introduit dans une chambre sous-vide où les atomes sont libérés individuellement de l'échantillon (habituellement par chaleur ou par bombardement avec d'autres atomes). Ainsi, les atomes reçoivent une charge électrique et sont convertis en ions (ion source, Figure 6). Le faisceau d'ions accélérés circule à travers une fente (slit A) et est dirigé vers un champ magnétique (analysing filter) qui modifie la course des ions selon leur masse. Les ions sont ensuite dirigés à travers une seconde fente (slit B) qui laisse passer jusqu'au détecteur les ions d'une masse précise. Le détecteur mesure le courant électrique transporté par les ions. À partir de cette mesure, la quantité d'atomes présents dans l'échantillon original peut être calculée.



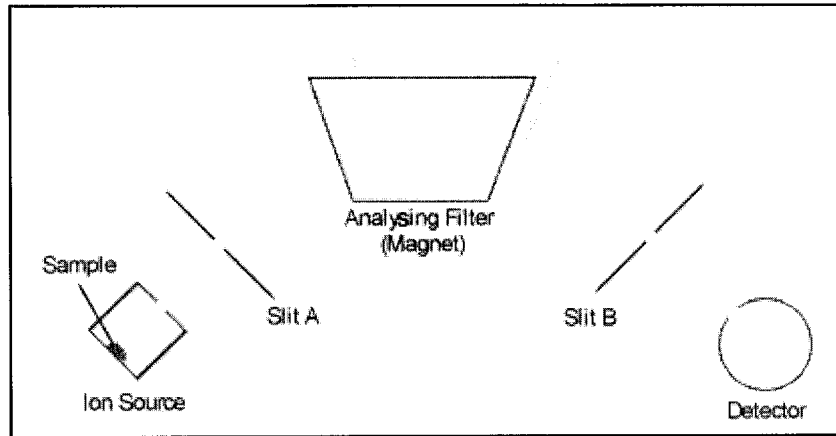


Figure 6: Schéma d'un spectromètre de mass  
(Acceleration Mass Spectrometry)

## **ANNEXE E**

**Fichiers d'entrée de données et de sortie  
pour la spéciation de l'échantillon 04CHDB060**

La spéciation de la composition chimique de chacun des échantillons se fait à l'aide du logiciel PHREEQC 2.8 (Parkhurst et Appelo, 1999) intégré dans les composantes du logiciel Aquachem 4.0 (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003). Différentes versions du logiciel PHREEQC sont distribuées gratuitement sur le site internet de la US Geological Survey (USGS) à l'adresse [http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc/](http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/).

### Fichier d'entrée de données chimiques

```
DATABASE C:\Program Files\USGS\Phreeqc Interactive 2.8\phreeqc.dat
      TITLE Spéciation de l'échantillon 04CHDB060
SOLUTION 76 04CHDB060
temp      8.1
pH        8.2
pe        0.22254237
redox     pe
units     mg/l
density   1
O(0)     0.96
Alkalinity 1100
Al        1.5 ug/l
B         1800 ug/l
Ba        1300 ug/l
Br        1300 ug/l
Ca        5.8
Cd        0.019 ug/l
Cl        1200
Cu        0.45 ug/l
F         0.18
Fe        360 ug/l
K         20
Li        8.3 ug/l
Mg        58
Mn        2 ug/l
Na        1200
N(-3)    4.5
N(5)     0.01
Pb        0.01 ug/l
P         530 ug/l
Si        5.3 as Si
S(-2)    0.015
S(6)     350
Sr        1000 ug/l
Zn        23 ug/l
-water   1 # kg
end
```

Dans les données d'entrée, O(0) correspond à l'oxygène dissous, N(-3) correspond au  $\text{NH}_4$ , N(5) au  $\text{NO}_2\text{-NO}_3$ , S(-2) au sulfures et S(6) aux  $\text{SO}_4$ . L'entrée units mg/l indique les unités par défaut.

## Fichier de sortie

Input file: \\w5-stf-sta9\DBlanchette\Dan\_blanchette\Cractérisation\_hydrogéochimique\_thèse\Chapitre\_3\AnnexeE\_input.pqi  
Output file: \\w5-stf-sta9\DBlanchette\Dan\_blanchette\Cractérisation\_hydrogéochimique\_thèse\Chapitre\_3\AnnexeE\_input.pqi  
Database file: C:\Program Files\USGS\Phreeqc Interactive 2.8\phreeqc.dat

-----  
Reading data base.  
-----

SOLUTION\_MASTER\_SPECIES  
SOLUTION\_SPECIES  
PHASES  
EXCHANGE\_MASTER\_SPECIES  
EXCHANGE\_SPECIES  
SURFACE\_MASTER\_SPECIES  
SURFACE\_SPECIES  
RATES  
END

-----  
Reading input data for simulation 1.  
-----

DATABASE C:\Program Files\USGS\Phreeqc Interactive 2.8\phreeqc.dat  
TITLE Spéciation de l'échantillon 04CHDB060  
SOLUTION 76 04CHDB060  
temp 8.1  
pH 8.2  
pe 0.22254237  
redox pe  
units mg/l  
density 1  
O(0) 0.96  
Alkalinity 1100  
Al 1.5 ug/l  
B 1800 ug/l  
Ba 1300 ug/l  
Br 1300 ug/l  
Ca 5.8  
Cd 0.019 ug/l  
Cl 1200  
Cu 0.45 ug/l  
F 0.18  
Fe 360 ug/l  
K 20  
Li 8.3 ug/l  
Mg 58  
Mn 2 ug/l  
Na 1200  
N(-3) 4.5  
N(5) 0.01  
Pb 0.01 ug/l  
P 530 ug/l  
Si 5.3 as Si  
S(-2) 0.015  
S(6) 350  
Sr 1000 ug/l  
Zn 23 ug/l

water 1 # kg  
end

-----  
TITLE  
-----

Spéciation de l'échantillon 04CHDB060

-----  
Beginning of initial solution calculations.  
-----

Initial solution 76. 04CHDB060

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
Al	5.581e-008	5.581e-008
Alkalinity	2.207e-002	2.207e-002
B	1.672e-004	1.672e-004
Ba	9.503e-006	9.503e-006
Br	1.633e-005	1.633e-005
Ca	1.453e-004	1.453e-004
Cd	1.697e-010	1.697e-010
Cl	3.398e-002	3.398e-002
Cu	7.110e-009	7.110e-009
F	9.512e-006	9.512e-006
Fe	6.472e-006	6.472e-006
K	5.135e-004	5.135e-004
Li	1.201e-006	1.201e-006
Mg	2.395e-003	2.395e-003
Mn	3.655e-008	3.655e-008
N(-3)	3.225e-004	3.225e-004
N(5)	7.168e-007	7.168e-007
Na	5.240e-002	5.240e-002
O(0)	6.024e-005	6.024e-005
P	1.718e-005	1.718e-005
Pb	4.846e-011	4.846e-011
S(-2)	4.697e-007	4.697e-007
S(6)	3.658e-003	3.658e-003
Si	1.895e-004	1.895e-004
Sr	1.146e-005	1.146e-005
Zn	3.532e-007	3.532e-007

-----Description of solution-----

pH = 8.200  
pe = 0.223  
Activity of water = 0.998  
Ionic strength = 6.480e-002  
Mass of water (kg) = 1.000e+000  
Total carbon (mol/kg) = 2.207e-002  
Total CO2 (mol/kg) = 2.207e-002  
Temperature (deg C) = 8.100  
Electrical balance (eq) = -5.031e-003  
Percent error, 100\*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = -4.24  
Iterations = 11  
Total H = 1.110364e+002  
Total O = 5.558812e+001

-----Redox couples-----

Redox couple	pe	Eh (volts)
N(-3)/N(5)	5.3355	0.2977
O(-2)/O(0)	13.6759	0.7632
S(-2)/S(6)	-4.2377	-0.2365

-----Distribution of species-----

Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma
OH-	4.888e-007	3.901e-007	-6.311	-6.409	-0.098
H+	7.453e-009	6.310e-009	-8.128	-8.200	-0.072
H2O	5.551e+001	9.980e-001	1.744	-0.001	0.000
Al	5.581e-008				
Al(OH)4-	5.560e-008	4.509e-008	-7.255	-7.346	-0.091
Al(OH)3	1.718e-010	1.743e-010	-9.765	-9.759	0.006
Al(OH)2+	3.733e-011	3.027e-011	-10.428	-10.519	-0.091
AlOH+2	2.897e-013	1.252e-013	-12.538	-12.902	-0.364
AlF2+	6.448e-014	5.228e-014	-13.191	-13.282	-0.091
AlF+2	3.704e-014	1.602e-014	-13.431	-13.795	-0.364
AlF3	4.553e-015	4.622e-015	-14.342	-14.335	0.006
Al+3	1.116e-015	2.494e-016	-14.952	-15.603	-0.651
AlSO4+	1.056e-015	8.565e-016	-14.976	-15.067	-0.091
Al(SO4)2-	4.210e-017	3.414e-017	-16.376	-16.467	-0.091
AlF4-	1.616e-017	1.310e-017	-16.792	-16.883	-0.091
AlF5-2	3.563e-021	1.540e-021	-20.448	-20.812	-0.364
AlHSO4+2	9.938e-025	4.297e-025	-24.003	-24.367	-0.364
AlF6-3	1.037e-025	1.572e-026	-24.984	-25.803	-0.819
B	1.672e-004				
H3BO3	1.545e-004	1.568e-004	-3.811	-3.805	0.006
H2BO3-	1.272e-005	1.031e-005	-4.896	-4.987	-0.091
BF(OH)3-	4.563e-010	3.700e-010	-9.341	-9.432	-0.091
BF2(OH)2-	2.263e-015	1.835e-015	-14.645	-14.736	-0.091
BF3OH-	1.557e-022	1.262e-022	-21.808	-21.899	-0.091
BF4-	2.935e-029	2.380e-029	-28.532	-28.623	-0.091
Ba	9.503e-006				
Ba+2	6.975e-006	3.065e-006	-5.156	-5.514	-0.357
BaSO4	2.073e-006	2.104e-006	-5.683	-5.677	0.006
BaHCO3+	3.629e-007	2.942e-007	-6.440	-6.531	-0.091
BaCO3	9.228e-008	9.366e-008	-7.035	-7.028	0.006
BaOH+	2.026e-011	1.643e-011	-10.693	-10.784	-0.091
Br	1.633e-005				
Br-	1.633e-005	1.294e-005	-4.787	-4.888	-0.101
C(4)	2.207e-002				
HCO3-	2.084e-002	1.705e-002	-1.681	-1.768	-0.087
NaHCO3	3.966e-004	4.026e-004	-3.402	-3.395	0.006
CO2	3.225e-004	3.273e-004	-3.491	-3.485	0.006
MgHCO3+	2.123e-004	1.722e-004	-3.673	-3.764	-0.091
CO3-2	1.855e-004	8.306e-005	-3.732	-4.081	-0.349
MgCO3	5.429e-005	5.511e-005	-4.265	-4.259	0.006
NaCO3-	3.245e-005	2.631e-005	-4.489	-4.580	-0.091
CaHCO3+	9.697e-006	7.932e-006	-5.013	-5.101	-0.087
CaCO3	5.860e-006	5.948e-006	-5.232	-5.226	0.006
FeHCO3+	2.092e-006	1.697e-006	-5.679	-5.770	-0.091
FeCO3	1.954e-006	1.983e-006	-5.709	-5.703	0.006
SrHCO3+	7.784e-007	6.368e-007	-6.109	-6.196	-0.087
BaHCO3+	3.629e-007	2.942e-007	-6.440	-6.531	-0.091
Zn(CO3)2-2	2.671e-007	1.155e-007	-6.573	-6.937	-0.364
SrCO3	1.381e-007	1.402e-007	-6.860	-6.853	0.006
BaCO3	9.228e-008	9.366e-008	-7.035	-7.028	0.006
ZnCO3	6.407e-008	6.504e-008	-7.193	-7.187	0.006
MnCO3	2.188e-008	2.221e-008	-7.660	-7.653	0.006

	ZnHCO3+	1.039e-008	8.423e-009	-7.984	-8.075	-0.091
	MnHCO3+	6.308e-009	5.115e-009	-8.200	-8.291	-0.091
	PbCO3	3.215e-011	3.263e-011	-10.493	-10.486	0.006
	CdHCO3+	1.678e-011	1.361e-011	-10.775	-10.866	-0.091
	Pb(CO3)2-2	1.575e-011	6.809e-012	-10.803	-11.167	-0.364
	CdCO3	1.640e-012	1.665e-012	-11.785	-11.779	0.006
	Cd(CO3)2-2	1.012e-012	4.374e-013	-11.995	-12.359	-0.364
	PbHCO3+	3.776e-013	3.062e-013	-12.423	-12.514	-0.091
Ca		1.453e-004				
	Ca+2	1.175e-004	5.292e-005	-3.930	-4.276	-0.346
	CaSO4	1.206e-005	1.224e-005	-4.919	-4.912	0.006
	CaHCO3+	9.697e-006	7.932e-006	-5.013	-5.101	-0.087
	CaCO3	5.860e-006	5.948e-006	-5.232	-5.226	0.006
	CaHPO4	1.065e-007	1.081e-007	-6.973	-6.966	0.006
	CaPO4-	3.566e-008	2.892e-008	-7.448	-7.539	-0.091
	CaF+	2.677e-009	2.170e-009	-8.572	-8.663	-0.091
	CaOH+	1.713e-009	1.389e-009	-8.766	-8.857	-0.091
	CaH2PO4+	6.920e-010	5.611e-010	-9.160	-9.251	-0.091
	CaHSO4+	4.688e-013	3.801e-013	-12.329	-12.420	-0.091
Cd		1.697e-010				
	CdCl+	7.610e-011	6.171e-011	-10.119	-10.210	-0.091
	Cd+2	5.837e-011	2.523e-011	-10.234	-10.598	-0.364
	CdHCO3+	1.678e-011	1.361e-011	-10.775	-10.866	-0.091
	CdSO4	8.803e-012	8.936e-012	-11.055	-11.049	0.006
	CdCl2	6.450e-012	6.547e-012	-11.190	-11.184	0.006
	CdCO3	1.640e-012	1.665e-012	-11.785	-11.779	0.006
	Cd(CO3)2-2	1.012e-012	4.374e-013	-11.995	-12.359	-0.364
	Cd(SO4)2-2	3.464e-013	1.498e-013	-12.460	-12.825	-0.364
	CdOH+	1.084e-013	8.794e-014	-12.965	-13.056	-0.091
	CdCl3-	1.057e-013	8.574e-014	-12.976	-13.067	-0.091
	Cd(OH)2	2.779e-015	2.820e-015	-14.556	-14.550	0.006
	Cd(OH)3-	6.173e-020	5.006e-020	-19.210	-19.301	-0.091
	Cd(OH)4-2	1.632e-025	7.057e-026	-24.787	-25.151	-0.364
Cl		3.398e-002				
	Cl-	3.398e-002	2.718e-002	-1.469	-1.566	-0.097
	FeCl+	4.605e-008	3.734e-008	-7.337	-7.428	-0.091
	MnCl+	4.597e-010	3.728e-010	-9.338	-9.429	-0.091
	ZnCl+	1.607e-010	1.303e-010	-9.794	-9.885	-0.091
	CdCl+	7.610e-011	6.171e-011	-10.119	-10.210	-0.091
	CdCl2	6.450e-012	6.547e-012	-11.190	-11.184	0.006
	MnCl2	4.358e-012	4.423e-012	-11.361	-11.354	0.006
	ZnCl2	3.400e-012	3.451e-012	-11.468	-11.462	0.006
	ZnCl3-	1.166e-013	9.454e-014	-12.933	-13.024	-0.091
	CdCl3-	1.057e-013	8.574e-014	-12.976	-13.067	-0.091
	MnCl3-	4.084e-014	3.312e-014	-13.389	-13.480	-0.091
	PbCl+	1.935e-014	1.569e-014	-13.713	-13.804	-0.091
	ZnCl4-2	2.585e-015	1.118e-015	-14.588	-14.952	-0.364
	PbCl2	9.307e-016	9.447e-016	-15.031	-15.025	0.006
	PbCl3-	2.252e-017	1.827e-017	-16.647	-16.738	-0.091
	PbCl4-2	4.788e-019	2.070e-019	-18.320	-18.684	-0.364
	FeCl+2	6.396e-020	2.765e-020	-19.194	-19.558	-0.364
	FeCl2+	7.308e-021	5.926e-021	-20.136	-20.227	-0.091
	FeCl3	1.587e-023	1.611e-023	-22.799	-22.793	0.006
Cu (1)		2.805e-009				
	Cu+	2.805e-009	2.204e-009	-8.552	-8.657	-0.105
Cu (2)		4.305e-009				
	Cu(OH)2	4.269e-009	4.333e-009	-8.370	-8.363	0.006
	Cu+2	1.802e-011	8.288e-012	-10.744	-11.082	-0.337
	CuOH+	1.631e-011	1.311e-011	-10.788	-10.882	-0.095
	CuSO4	2.018e-012	2.048e-012	-11.695	-11.689	0.006
	Cu(OH)3-	5.093e-014	4.130e-014	-13.293	-13.384	-0.091
	Cu(OH)4-2	3.015e-018	1.303e-018	-17.521	-17.885	-0.364
F		9.512e-006				

	F-	8.959e-006	7.151e-006	-5.048	-5.146	-0.098
	MgF+	3.796e-007	3.078e-007	-6.421	-6.512	-0.091
	NaF	1.702e-007	1.728e-007	-6.769	-6.763	0.006
	CaF+	2.677e-009	2.170e-009	-8.572	-8.663	-0.091
	BF(OH)3-	4.563e-010	3.700e-010	-9.341	-9.432	-0.091
	FeF+	8.776e-011	7.116e-011	-10.057	-10.148	-0.091
	HF	4.973e-011	5.048e-011	-10.303	-10.297	0.006
	MnF+	2.054e-013	1.665e-013	-12.688	-12.779	-0.091
	AlF2+	6.448e-014	5.228e-014	-13.191	-13.282	-0.091
	AlF+2	3.704e-014	1.602e-014	-13.431	-13.795	-0.364
	AlF3	4.553e-015	4.622e-015	-14.342	-14.335	0.006
	BF2(OH)2-	2.263e-015	1.835e-015	-14.645	-14.736	-0.091
	HF2-	1.443e-015	1.170e-015	-14.841	-14.932	-0.091
	AlF4-	1.616e-017	1.310e-017	-16.792	-16.883	-0.091
	FeF+2	1.185e-018	5.123e-019	-17.926	-18.290	-0.364
	FeF2+	1.454e-019	1.179e-019	-18.838	-18.929	-0.091
	AlF5-2	3.563e-021	1.540e-021	-20.448	-20.812	-0.364
	FeF3	1.238e-021	1.257e-021	-20.907	-20.901	0.006
	BF3OH-	1.557e-022	1.262e-022	-21.808	-21.899	-0.091
	AlF6-3	1.037e-025	1.572e-026	-24.984	-25.803	-0.819
	BF4-	2.935e-029	2.380e-029	-28.532	-28.623	-0.091
	SiF6-2	7.368e-037	3.185e-037	-36.133	-36.497	-0.364
Fe (2)		6.465e-006				
	Fe+2	2.164e-006	9.952e-007	-5.665	-6.002	-0.337
	FeHCO3+	2.092e-006	1.697e-006	-5.679	-5.770	-0.091
	FeCO3	1.954e-006	1.983e-006	-5.709	-5.703	0.006
	FeSO4	1.721e-007	1.747e-007	-6.764	-6.758	0.006
	FeCl+	4.605e-008	3.734e-008	-7.337	-7.428	-0.091
	FeHPO4	2.032e-008	2.063e-008	-7.692	-7.686	0.006
	FeOH+	1.610e-008	1.305e-008	-7.793	-7.884	-0.091
	FeH2PO4+	3.598e-010	2.918e-010	-9.444	-9.535	-0.091
	Fe(HS)2	1.055e-010	1.071e-010	-9.977	-9.970	0.006
	FeF+	8.776e-011	7.116e-011	-10.057	-10.148	-0.091
	FeHSO4+	8.815e-015	7.148e-015	-14.055	-14.146	-0.091
	Fe(HS)3-	4.995e-015	4.051e-015	-14.301	-14.392	-0.091
Fe (3)		6.308e-009				
	Fe(OH)3	5.162e-009	5.239e-009	-8.287	-8.281	0.006
	Fe(OH)2+	6.923e-010	5.614e-010	-9.160	-9.251	-0.091
	Fe(OH)4-	4.537e-010	3.679e-010	-9.343	-9.434	-0.091
	FeOH+2	4.890e-014	2.114e-014	-13.311	-13.675	-0.364
	FeF+2	1.185e-018	5.123e-019	-17.926	-18.290	-0.364
	FeSO4+	7.407e-019	6.006e-019	-18.130	-18.221	-0.091
	Fe+3	2.661e-019	5.944e-020	-18.575	-19.226	-0.651
	FeF2+	1.454e-019	1.179e-019	-18.838	-18.929	-0.091
	FeCl+2	6.396e-020	2.765e-020	-19.194	-19.558	-0.364
	FeHPO4+	5.728e-020	4.645e-020	-19.242	-19.333	-0.091
	FeH2PO4+2	2.165e-020	9.360e-021	-19.665	-20.029	-0.364
	Fe(SO4)2-	2.070e-020	1.678e-020	-19.684	-19.775	-0.091
	FeCl2+	7.308e-021	5.926e-021	-20.136	-20.227	-0.091
	FeF3	1.238e-021	1.257e-021	-20.907	-20.901	0.006
	FeCl3	1.587e-023	1.611e-023	-22.799	-22.793	0.006
	Fe2(OH)2+4	7.220e-025	2.523e-026	-24.141	-25.598	-1.457
	FeHSO4+2	2.480e-026	1.072e-026	-25.605	-25.970	-0.364
	Fe3(OH)4+5	2.918e-030	1.546e-032	-29.535	-31.811	-2.276
H (0)		2.382e-020				
	H2	1.191e-020	1.209e-020	-19.924	-19.918	0.006
K		5.135e-004				
	K+	5.100e-004	4.080e-004	-3.292	-3.389	-0.097
	KSO4-	3.543e-006	2.873e-006	-5.451	-5.542	-0.091
	KHPO4-	5.108e-009	4.142e-009	-8.292	-8.383	-0.091
	KOH	2.204e-010	2.237e-010	-9.657	-9.650	0.006
Li		1.201e-006				
	Li+	1.194e-006	9.829e-007	-5.923	-6.007	-0.084



	LiSO4-	7.249e-009	5.878e-009	-8.140	-8.231	-0.091
	LiOH	3.509e-012	3.562e-012	-11.455	-11.448	0.006
Mg		2.395e-003				
	Mg+2	1.945e-003	9.013e-004	-2.711	-3.045	-0.334
	MgHCO3+	2.123e-004	1.722e-004	-3.673	-3.764	-0.091
	MgSO4	1.798e-004	1.825e-004	-3.745	-3.739	0.006
	MgCO3	5.429e-005	5.511e-005	-4.265	-4.259	0.006
	MgHPO4	2.452e-006	2.489e-006	-5.610	-5.604	0.006
	MgPO4-	8.193e-007	6.644e-007	-6.087	-6.178	-0.091
	MgF+	3.796e-007	3.078e-007	-6.421	-6.512	-0.091
	MgOH+	1.266e-007	1.027e-007	-6.898	-6.989	-0.091
	MgH2PO4+	1.501e-008	1.217e-008	-7.824	-7.915	-0.091
Mn (2)		3.655e-008				
	MnCO3	2.188e-008	2.221e-008	-7.660	-7.653	0.006
	Mn+2	7.320e-009	3.366e-009	-8.136	-8.473	-0.337
	MnHCO3+	6.308e-009	5.115e-009	-8.200	-8.291	-0.091
	MnSO4	5.740e-010	5.826e-010	-9.241	-9.235	0.006
	MnCl+	4.597e-010	3.728e-010	-9.338	-9.429	-0.091
	MnCl2	4.358e-012	4.423e-012	-11.361	-11.354	0.006
	MnOH+	3.918e-012	3.177e-012	-11.407	-11.498	-0.091
	MnF+	2.054e-013	1.665e-013	-12.688	-12.779	-0.091
	MnCl3-	4.084e-014	3.312e-014	-13.389	-13.480	-0.091
	Mn (NO3) 2	4.431e-021	4.498e-021	-20.353	-20.347	0.006
Mn (3)		8.369e-035				
	Mn+3	8.369e-035	1.269e-035	-34.077	-34.897	-0.819
N (-3)		3.225e-004				
	NH4+	3.111e-004	2.445e-004	-3.507	-3.612	-0.105
	NH3	6.120e-006	6.212e-006	-5.213	-5.207	0.006
	NH4SO4-	5.321e-006	4.315e-006	-5.274	-5.365	-0.091
N (5)		7.168e-007				
	NO3-	7.168e-007	5.678e-007	-6.145	-6.246	-0.101
	PbNO3+	2.342e-019	1.899e-019	-18.630	-18.722	-0.091
	Mn (NO3) 2	4.431e-021	4.498e-021	-20.353	-20.347	0.006
Na		5.240e-002				
	Na+	5.166e-002	4.199e-002	-1.287	-1.377	-0.090
	NaHCO3	3.966e-004	4.026e-004	-3.402	-3.395	0.006
	NaSO4-	3.174e-004	2.573e-004	-3.498	-3.589	-0.091
	NaCO3-	3.245e-005	2.631e-005	-4.489	-4.580	-0.091
	NaHPO4-	5.257e-007	4.263e-007	-6.279	-6.370	-0.091
	NaF	1.702e-007	1.728e-007	-6.769	-6.763	0.006
	NaOH	4.323e-008	4.388e-008	-7.364	-7.358	0.006
O (0)		6.024e-005				
	O2	3.012e-005	3.057e-005	-4.521	-4.515	0.006
P		1.718e-005				
	HPO4-2	1.247e-005	5.207e-006	-4.904	-5.283	-0.379
	MgHPO4	2.452e-006	2.489e-006	-5.610	-5.604	0.006
	MgPO4-	8.193e-007	6.644e-007	-6.087	-6.178	-0.091
	H2PO4-	7.230e-007	5.850e-007	-6.141	-6.233	-0.092
	NaHPO4-	5.257e-007	4.263e-007	-6.279	-6.370	-0.091
	CaHPO4	1.065e-007	1.081e-007	-6.973	-6.966	0.006
	CaPO4-	3.566e-008	2.892e-008	-7.448	-7.539	-0.091
	FeHPO4	2.032e-008	2.063e-008	-7.692	-7.686	0.006
	MgH2PO4+	1.501e-008	1.217e-008	-7.824	-7.915	-0.091
	KHPO4-	5.108e-009	4.142e-009	-8.292	-8.383	-0.091
	PO4-3	1.857e-009	2.601e-010	-8.731	-9.585	-0.854
	CaH2PO4+	6.920e-010	5.611e-010	-9.160	-9.251	-0.091
	FeH2PO4+	3.598e-010	2.918e-010	-9.444	-9.535	-0.091
	FeHPO4+	5.728e-020	4.645e-020	-19.242	-19.333	-0.091
	FeH2PO4+2	2.165e-020	9.360e-021	-19.665	-20.029	-0.364
Pb		4.846e-011				
	PbCO3	3.215e-011	3.263e-011	-10.493	-10.486	0.006
	Pb (CO3) 2-2	1.575e-011	6.809e-012	-10.803	-11.167	-0.364
	PbHCO3+	3.776e-013	3.062e-013	-12.423	-12.514	-0.091

	PbOH+	8.599e-014	6.973e-014	-13.066	-13.157	-0.091
	Pb+2	5.229e-014	2.261e-014	-13.282	-13.646	-0.364
	PbCl+	1.935e-014	1.569e-014	-13.713	-13.804	-0.091
	PbSO4	1.716e-014	1.742e-014	-13.766	-13.759	0.006
	Pb(OH)2	4.227e-015	4.291e-015	-14.374	-14.367	0.006
	PbCl2	9.307e-016	9.447e-016	-15.031	-15.025	0.006
	Pb(SO4)2-2	2.896e-016	1.252e-016	-15.538	-15.902	-0.364
	PbCl3-	2.252e-017	1.827e-017	-16.647	-16.738	-0.091
	Pb(OH)3-	9.610e-018	7.793e-018	-17.017	-17.108	-0.091
	PbCl4-2	4.788e-019	2.070e-019	-18.320	-18.684	-0.364
	PbNO3+	2.342e-019	1.899e-019	-18.630	-18.722	-0.091
	Pb(OH)4-2	6.532e-021	2.824e-021	-20.185	-20.549	-0.364
	Pb2OH+3	2.328e-025	3.529e-026	-24.633	-25.452	-0.819
S(-2)		4.697e-007				
	HS-	4.353e-007	3.474e-007	-6.361	-6.459	-0.098
	H2S	3.417e-008	3.469e-008	-7.466	-7.460	0.006
	Fe(HS)2	1.055e-010	1.071e-010	-9.977	-9.970	0.006
	S-2	4.437e-012	1.950e-012	-11.353	-11.710	-0.357
	Fe(HS)3-	4.995e-015	4.051e-015	-14.301	-14.392	-0.091
S(6)		3.658e-003				
	SO4-2	3.137e-003	1.370e-003	-2.504	-2.863	-0.360
	NaSO4-	3.174e-004	2.573e-004	-3.498	-3.589	-0.091
	MgSO4	1.798e-004	1.825e-004	-3.745	-3.739	0.006
	CaSO4	1.206e-005	1.224e-005	-4.919	-4.912	0.006
	NH4SO4-	5.321e-006	4.315e-006	-5.274	-5.365	-0.091
	KSO4-	3.543e-006	2.873e-006	-5.451	-5.542	-0.091
	BaSO4	2.073e-006	2.104e-006	-5.683	-5.677	0.006
	SrSO4	9.280e-007	9.419e-007	-6.032	-6.026	0.006
	FeSO4	1.721e-007	1.747e-007	-6.764	-6.758	0.006
	LiSO4-	7.249e-009	5.878e-009	-8.140	-8.231	-0.091
	ZnSO4	1.082e-009	1.098e-009	-8.966	-8.959	0.006
	HSO4-	7.367e-010	5.974e-010	-9.133	-9.224	-0.091
	MnSO4	5.740e-010	5.826e-010	-9.241	-9.235	0.006
	Zn(SO4)2-2	3.246e-011	1.403e-011	-10.489	-10.853	-0.364
	CdSO4	8.803e-012	8.936e-012	-11.055	-11.049	0.006
	CuSO4	2.018e-012	2.048e-012	-11.695	-11.689	0.006
	CaHSO4+	4.688e-013	3.801e-013	-12.329	-12.420	-0.091
	Cd(SO4)2-2	3.464e-013	1.498e-013	-12.460	-12.825	-0.364
	PbSO4	1.716e-014	1.742e-014	-13.766	-13.759	0.006
	FeHSO4+	8.815e-015	7.148e-015	-14.055	-14.146	-0.091
	AlSO4+	1.056e-015	8.565e-016	-14.976	-15.067	-0.091
	Pb(SO4)2-2	2.896e-016	1.252e-016	-15.538	-15.902	-0.364
	Al(SO4)2-	4.210e-017	3.414e-017	-16.376	-16.467	-0.091
	FeSO4+	7.407e-019	6.006e-019	-18.130	-18.221	-0.091
	Fe(SO4)2-	2.070e-020	1.678e-020	-19.684	-19.775	-0.091
	AlHSO4+2	9.938e-025	4.297e-025	-24.003	-24.367	-0.364
	FeHSO4+2	2.480e-026	1.072e-026	-25.605	-25.970	-0.364
Si		1.895e-004				
	H4SiO4	1.866e-004	1.894e-004	-3.729	-3.723	0.006
	H3SiO4-	2.826e-006	2.292e-006	-5.549	-5.640	-0.091
	H2SiO4-2	1.691e-011	7.309e-012	-10.772	-11.136	-0.364
	SiF6-2	7.368e-037	3.185e-037	-36.133	-36.497	-0.364
Sr		1.146e-005				
	Sr+2	9.614e-006	4.354e-006	-5.017	-5.361	-0.344
	SrSO4	9.280e-007	9.419e-007	-6.032	-6.026	0.006
	SrHCO3+	7.784e-007	6.368e-007	-6.109	-6.196	-0.087
	SrCO3	1.381e-007	1.402e-007	-6.860	-6.853	0.006
	SrOH+	4.339e-011	3.532e-011	-10.363	-10.452	-0.089
Zn		3.532e-007				
	Zn(CO3)2-2	2.671e-007	1.155e-007	-6.573	-6.937	-0.364
	ZnCO3	6.407e-008	6.504e-008	-7.193	-7.187	0.006
	ZnHCO3+	1.039e-008	8.423e-009	-7.984	-8.075	-0.091
	Zn+2	8.931e-009	3.924e-009	-8.049	-8.406	-0.357

Zn(OH)2	1.218e-009	1.236e-009	-8.914	-8.908	0.006
ZnSO4	1.082e-009	1.098e-009	-8.966	-8.959	0.006
ZnOH+	2.156e-010	1.749e-010	-9.666	-9.757	-0.091
ZnCl+	1.607e-010	1.303e-010	-9.794	-9.885	-0.091
Zn(SO4)2-2	3.246e-011	1.403e-011	-10.489	-10.853	-0.364
ZnCl2	3.400e-012	3.451e-012	-11.468	-11.462	0.006
Zn(OH)3-	7.625e-013	6.183e-013	-12.118	-12.209	-0.091
ZnCl3-	1.166e-013	9.454e-014	-12.933	-13.024	-0.091
ZnCl4-2	2.585e-015	1.118e-015	-14.588	-14.952	-0.364
Zn(OH)4-2	3.585e-017	1.550e-017	-16.445	-16.810	-0.364

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Al(OH)3(a)	-2.97	8.99	11.97	Al(OH)3
Albite	-0.74	4.66	5.40	NaAlSi3O8
Alunite	-7.54	-6.73	0.81	KAl3(SO4)2(OH)6
Anglesite	-8.62	-16.51	-7.88	PbSO4
Anhydrite	-2.80	-7.14	-4.34	CaSO4
Anorthite	-6.18	22.67	28.85	CaAl2Si2O8
Aragonite	-0.11	-8.36	-8.25	CaCO3
Barite	1.91	-8.38	-10.29	BaSO4
Ca-Montmorillonite	-0.28	9.30	9.58	Ca0.165Al2.33Si3.67O10(OH)2
Calcite	0.05	-8.36	-8.40	CaCO3
Cd(OH)2	-7.85	5.80	13.65	Cd(OH)2
CdSiO3	-7.71	2.08	9.79	CdSiO3
CdSO4	-14.01	-13.46	0.55	CdSO4
Celestite	-1.59	-8.22	-6.64	SrSO4
Cerrusite	-4.38	-17.73	-13.34	PbCO3
Chalcedony	0.04	-3.72	-3.76	SiO2
Chlorite(14A)	-1.46	73.60	75.05	Mg5Al2Si3O10(OH)8
Chrysotile	-1.80	32.62	34.42	Mg3Si2O5(OH)4
CO2(g)	-2.24	-20.48	-18.24	CO2
Dolomite	1.19	-15.48	-16.67	CaMg(CO3)2
Fe(OH)3(a)	0.48	18.82	18.34	Fe(OH)3
FeS(ppt)	-0.35	-4.26	-3.92	FeS
Fluorite	-3.74	-14.57	-10.83	CaF2
Gibbsite	-0.12	8.99	9.11	Al(OH)3
Goethite	5.73	18.82	13.08	FeOOH
Gypsum	-2.55	-7.14	-4.60	CaSO4:2H2O
H2(g)	-16.85	-16.85	0.00	H2
H2O(g)	-1.97	-0.00	1.97	H2O
H2S(g)	-6.66	-14.66	-8.00	H2S
Halite	-4.48	-2.94	1.54	NaCl
Hausmannite	-24.84	40.62	65.46	Mn3O4
Hematite	13.40	37.64	24.24	Fe2O3
Hydroxyapatite	-2.60	-41.94	-39.33	Ca5(PO4)3OH
Illite	0.13	13.89	13.77	K0.6Mg0.25Al2.3Si3.5O10(OH)2
Jarosite-K	-9.77	22.74	32.51	KFe3(SO4)2(OH)6
K-feldspar	0.03	2.64	2.61	KAlSi3O8
K-mica	5.32	20.63	15.32	KAl3Si3O10(OH)2
Kaolinite	1.56	10.55	8.99	Al2Si2O5(OH)4
Mackinawite	0.39	-4.26	-4.65	FeS
Manganite	-8.99	16.35	25.34	MnOOH
Melanterite	-6.43	-8.87	-2.44	FeSO4:7H2O
NH3(g)	-7.34	4.59	11.92	NH3
O2(g)	-1.64	-4.51	-2.88	O2
Otavite	-2.58	-14.68	-12.10	CdCO3
Pb(OH)2	-6.01	2.75	8.77	Pb(OH)2
Pyrite	16.90	-2.08	-18.98	FeS2
Pyrochroite	-7.27	7.93	15.20	Mn(OH)2
Pyrolusite	-19.48	24.77	44.25	MnO2

Quartz	0.52	-3.72	-4.24	SiO2
Rhodochrosite	-1.49	-12.55	-11.07	MnCO3
Sepiolite	-0.69	15.54	16.23	Mg2Si3O7.5OH:3H2O
Sepiolite(d)	-3.12	15.54	18.66	Mg2Si3O7.5OH:3H2O
Siderite	0.70	-10.08	-10.78	FeCO3
SiO2(a)	-0.86	-3.72	-2.86	SiO2
Smithsonite	-2.68	-12.49	-9.81	ZnCO3
Sphalerite	5.32	-6.67	-11.98	ZnS
Strontianite	-0.15	-9.44	-9.30	SrCO3
Sulfur	4.08	2.19	-1.90	S
Talc	1.74	25.18	23.44	Mg3Si4O10(OH)2
Vivianite	-1.18	-37.18	-36.00	Fe3(PO4)2:8H2O
Willemite	-4.53	12.26	16.80	Zn2SiO4
Witherite	-0.95	-9.59	-8.65	BaCO3
Zn(OH)2(e)	-3.51	7.99	11.50	Zn(OH)2

-----  
 End of simulation.  
 -----

-----  
 Reading input data for simulation 2.  
 -----

-----  
 End of run.  
 -----

# ANNEXE F

## Base de données géochimiques

- Tableau F1: Paramètres *in situ* et classification
- Tableau F2: Paramètres inorganiques et physiques – données brutes
- Tableau F3: Isotopes stables et radioactifs – critères bactériologiques
- Tableau F4: Paramètres modélisés et calculés
- Tableau F5: Indices de saturations pour différentes phases minérales

## **Signification des champs de la base de données géochimiques**

### Tableau F1

Station: Identification du site d'échantillonnage

Ech\_ID: Identification des échantillons d'eau souterraine

T: Température de l'eau souterraine en degrés celcius

pH: pH de l'eau souterraine (sans unité)

CE: Conductivité électrique spécifique à 25 °C

Oxy. Diss.: Oxygène dissous

Redox: Potentiel d'oxydoréduction mesuré sur le terrain

Eh: Potentiel de l'échantillon relatif à l'électrode d'hydrogène

EN: Électroneutralité (%: différence relative entre les concentrations en meq/L des cations et anions)

TE: Type d'eau

G: Groupe d'eau souterraine, G1 à G5

Cluster: Cluster d'eau souterraine, C1 à C6

### Tableau F2

Ech\_ID: Identification des échantillons d'eau souterraine

Ag-t: Argent total dissous

Al-t: Aluminium total dissous

Ba-t: Baryum total dissous

Br-t: Brome total dissous

Cd-t: Cadmium total dissous

Cl: Chlorures totaux dissous

Cou: Couleur vraie

Cu-t: Cuivre total dissous

Fe-t: Fer total dissous

I-t: Iode total dissous

Li-t: Lithium total dissous

Mn-t: Manganèse total dissous

N-t: Azote total dissous

NO<sub>2</sub>-NO<sub>3</sub>: Nitrites et Nitrates diss.

Pb-t: Plomb total dissous

Se-t: Sélénium total dissous

SO<sub>4</sub>: Sulfates totaux dissous

U-t: Uranium total Dissous

CN-t: Cyanures totaux dissous

S-t: Sulfures totaux dissous

Alc: Alcalinité totale

As-t: Arsenic total dissous

B-t: Bore total dissous

Ca-t: Calcium total dissous

CID: Carbone inorganique dissous

COD: Carbone organique dissous

Cr-t: Chrome total dissous

F: Fluorures totaux dissous

Hg-t: Mercure total dissous

K-t: Potassium total dissous

Mg-t: Magnésium total dissous

Na-t: Sodium total dissous

NH<sub>4</sub>: Azote ammoniacal dissous

Ni-t: Nickel total dissous

P-t: Phosphore total dissous

Si-t: Silicium total dissous

Sr-t: Strontium total dissous

Zn-t: Zinc total dissous

Pt-ino.: Phosphore total inorganique dissous

### Tableau F3

Ech\_ID: Identification des échantillons d'eau souterraine

$\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ : Isotopes stables de l'eau

Tritium: Isotopes radioactifs de l'eau

$\delta^{13}\text{C}$ : Isotope stable du carbone inorganique dissous

$^{14}\text{C}$ : Isotopes radioactifs du carbone inorganique dissous

E coli: Bactérie *Escherichia coli*

Coli tot: Coliformes totaux

Col Atyp: Colonies atypiques

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ : Espèces ioniques modélisées avec PHREEQC 2.8

$\text{H}_2\text{CO}_3$ , Si,  $\text{H}_2\text{S}$ : Espèces non-ioniques modélisées avec PHREEQC 2.8

MDT: Matière dissoute totale calculée avec Aquachem 4.0

Dureté: Dureté totale calculée avec Aquachem 4.0

### Signification des unités: Tableau F1 à F4

°C Degrés Celcius

uS/cm: micro-siemens par centimètre

mg/L: milligramme par litre

ug/L: micro-gramme par litre

mV: millivolt

mg  $\text{CaCO}_3$ /L: milligramme de carbonate de calcium par litre

UCV: unité de couleur vraie

mg N/L: milligramme d'azote par litre

mg P/L: milligramme de phosphore par litre

o/oo: per mil

T.U.: unité de tritium

pCm: pourcentage de carbone moderne

UFC/100 mL: unités formant des colonies par 100 millilitres

### Signification des codes pour les résultats

RNF: Résultat non disponible - Difficultés techniques

RND: Résultat non disponible – contactez le laboratoire

DEL: Échantillon rejeté – reçu trop tard

DIFF: Difficultés techniques

ABS: Pas d'échantillon, bouteille absente

VR: Trop de colonies, non quantifiable

na: non applicable

Tableau F1: Paramètres *in-situ* et classification

Station	Ech_ID	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	Oxy. Diss. (mg/L)	Redox (mV)	Eh (mV)	EN	TE	G	Cluster
CH-002	04CHDB002	9.1	7.67	617	1.54	-80	136	2.5	Ca-HCO3	G1	C5
CH-003	04CHDB003	10.0	7.65	683	2.12	-91	125	-2.8	Ca-HCO3	G1	C5
CH-004	04CHDB004	9.3	7.08	1489	1.10	-81	135	0.4	Ca-HCO3	G1	C1
CH-005	04CHDB005	8.8	7.84	875	0.06	-165	52	1.1	Mg-HCO3	G1	C2
CH-006	04CHDB006	10.3	7.52	405	0.86	-134	82	1.3	Ca-HCO3	G1	C6
CH-007	04CHDB007	9.4	7.06	471	0.19	-91	125	1.6	Ca-HCO3	G1	C6
CH-008	04CHDB008	9.8	7.06	851	0.11	-100	116	1.1	Ca-HCO3	G1	C5
CH-010	04CHDB010	8.5	7.45	1616	0.21	-163	54	-1.1	Ca-SO4	G4	C1
CH-011	04CHDB011	9.7	6.40	185	8.25	180	396	0.2	Ca-Cl	G5	C6
CH-012	04CHDB012	9.4	7.64	510	0.88	-156	60	2.0	Ca-HCO3	G1	C6
CH-013	04CHDB013	8.1	7.29	792	8.71	114	331	2.7	Ca-HCO3	G1	C3
CH-014	04CHDB014	10.0	7.42	592	0.16	-117	99	2.1	Ca-HCO3	G1	C5
CH-015	04CHDB015	9.3	8.31	771	0.19	-215	1	0.1	Na-HCO3	G2	C2
CH-016	04CHDB016	10.2	6.83	1382	0.29	-177	39	0.0	Ca-SO4	G4	C4
CH-019	04CHDB019	8.7	7.95	1981	0.16	-236	-19	-0.4	Na-Cl	G3	C1
CH-020	04CHDB020	11.0	7.22	798	0.09	-232	-17	2.4	Ca-HCO3	G1	C5
CH-022	04CHDB022	8.9	7.54	762	0.17	-438	-221	2.4	Ca-HCO3	G1	C5
CH-023	04CHDB023	10.3	8.16	708	0.10	-266	-50	3.9	Na-HCO3	G2	C1
CH-024	04CHDB024	8.6	7.28	565	2.18	-11	206	1.8	Ca-HCO3	G1	C6
CH-026	04CHDB026	8.4	7.34	788	0.18	-217	0	4.7	Mx cations-HCO3	G2	C1
CH-027	04CHDB027	10.4	7.24	1042	0.42	-97	119	3.2	Ca-HCO3	G1	C5
CH-028	04CHDB028	9.6	7.62	719	0.12	-176	40	3.1	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-029	04CHDB029	9.6	7.73	468	3.77	55	271	1.7	Ca-HCO3	G1	C6
CH-030	04CHDB030	10.3	7.74	491	0.17	-237	-21	0.8	Ca-HCO3	G1	C5
CH-031	04CHDB031	10.1	8.09	307	0.19	-177	39	0.6	Ca-HCO3	G1	C6
CH-032	04CHDB032	9.4	7.30	637	DIF	-65	151	3.0	Ca-HCO3	G1	C3
CH-033	04CHDB033	8.3	7.43	598	0.37	-45	172	2.8	Ca-HCO3	G1	C5
CH-034	04CHDB034	8.2	7.74	573	0.26	-136	81	1.9	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-035	04CHDB035	9.2	7.55	775	0.20	-131	85	0.0	Ca-SO4	G4	C1
CH-036	04CHDB036	9.2	6.96	1464	0.34	-66	150	1.8	Ca-SO4	G4	C4
CH-038	04CHDB038	9.8	7.70	1182	0.14	-227	-11	3.6	Ca-SO4	G4	C1
CH-039	04CHDB039	9.6	7.33	799	0.18	-123	93	0.0	Ca-HCO3	G1	C5
CH-040	04CHDB040	9.4	7.21	533	4.74	84	300	0.0	Ca-HCO3	G1	C6
CH-041	04CHDB041	8.8	7.79	407	0.18	DIF	DIF	1.9	Ca-HCO3	G1	C6
CH-042	04CHDB042	9.6	7.54	1096	0.18	-220	-4	4.9	Ca-HCO3	G1	C4
CH-043	04CHDB043	9.3	7.64	740	0.10	-303	-87	3.4	Mg-HCO3	G1	C1
CH-044	04CHDB044	10.9	7.62	814	0.13	-246	-31	3.8	Ca-HCO3	G1	C3
CH-046	04CHDB046	8.4	7.97	493	3.01	-248	-31	0.6	Ca-HCO3	G1	C5
CH-047	04CHDB047	9.7	7.57	1380	0.20	DIF	DIF	-0.2	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-048	04CHDB048	8.6	6.98	1058	0.13	DIF	DIF	2.0	Ca-HCO3	G1	C5
CH-049	04CHDB049	10.6	8.26	311	0.29	-246	-31	1.7	Ca-HCO3	G1	C6
CH-050	04CHDB050	9.1	6.70	239	9.35	DIF	DIF	1.9	Ca-HCO3	G1	C6
CH-051	04CHDB051	9.8	7.89	2124	0.13	-299	-83	2.6	Na-Cl	G3	C1
CH-052	04CHDB052	9.1	6.97	246	4.86	DIF	DIF	-2.4	Ca-HCO3	G1	C6
CH-053	04CHDB053	8.7	8.19	865	0.50	-182	35	1.0	Na-HCO3	G2	C1
CH-054	04CHDB054	9.0	7.80	1381	0.36	225	442	1.5	Na-HCO3	G2	C1
CH-055	04CHDB055	8.3	7.71	523	0.53	-135	82	3.6	Alk earth-HCO3	G1	C6
CH-056	04CHDB056	9.7	8.09	824	0.12	-206	10	2.5	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-057	04CHDB057	10.1	7.88	662	0.18	-150	66	1.2	Mx cations-HCO3	G2	C1
CH-058	04CHDB058	10.2	8.49	438	0.14	-172	44	4.0	Na-HCO3	G2	C5
CH-059	04CHDB059	10.0	7.64	887	0.09	-82	134	2.3	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-060	04CHDB060	8.1	8.20	5090	0.96	-204	13	3.9	Na-Cl	G3	C2
CH-061	04CHDB061	10.1	7.22	640	0.30	-89	127	4.4	Ca-HCO3	G1	C5
CH-062	04CHDB062	8.9	7.15	1389	1.94	-4	213	3.0	Ca-SO4	G4	C1
CH-063	04CHDB063	9.5	7.48	966	0.32	-78	138	1.7	Ca-HCO3	G1	C4
CH-064	04CHDB064	12.2	7.96	572	0.13	-116	98	2.7	Mg-HCO3	G1	C5
CH-065	04CHDB065	10.6	7.37	706	0.93	7	222	4.8	Ca-HCO3	G1	C3
CH-066	04CHDB066	10.1	7.88	1117	0.15	-76	140	2.3	Mx cations-HCO3	G2	C3
CH-067	04CHDB067	9.8	7.11	1077	1.96	115	331	4.1	Ca-HCO3	G1	C3
CH-069	04CHDB069	9.7	7.83	457	0.24	-158	58	4.2	Ca-HCO3	G1	C6
CH-070	04CHDB070	9.5	7.31	628	0.62	-27	189	4.9	Ca-HCO3	G1	C5
CH-071	04CHDB071	10.0	7.50	547	0.14	-175	41	7.1	Alk earth-HCO3	G1	C5
CH-072	04CHDB072	10.1	7.27	1018	0.37	-118	98	4.8	Ca-HCO3	G1	C5
CH-073	04CHDB073	9.9	7.71	484	0.32	-136	80	5.2	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-077	04CHDB077	9.9	7.39	973	0.18	-76	140	-4.1	Ca-HCO3	G1	C1
CH-078	04CHDB078	9.8	7.11	792	3.15	156	372	5.6	Ca-HCO3	G1	C3
CH-079	04CHDB079	10.5	7.46	780	0.29	-119	96	3.0	Ca-HCO3	G1	C5
CH-080	04CHDB080	10.2	7.10	617	2.77	107	323	3.6	Ca-HCO3	G1	C3
CH-081	04CHDB081	10.2	7.76	568	0.24	-163	53	4.5	Ca-HCO3	G1	C5
CH-082	04CHDB082	9.9	7.40	663	0.14	-111	105	3.6	Ca-HCO3	G1	C5



Tableau F1: Paramètres *in-situ* et classification (suite)

Station	Ech_ID	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	Oxy. Diss. (mg/L)	Redox (mV)	Eh (mV)	EN	TE	G	Cluster
CH-083	04CHDB083	9.6	7.57	1007	0.81	-51	165	3.3	Na-HCO3	G2	C1
CH-084	04CHDB084	9.5	7.35	1056	0.29	-105	111	1.1	Ca-HCO3	G1	C4
CH-085	04CHDB085	9.4	7.12	1142	0.32	78	294	-1.2	Ca-HCO3	G1	C3
CH-086	04CHDB086	9.2	7.63	819	0.21	-140	76	1.6	Ca-HCO3	G1	C5
CH-087	04CHDB087	8.5	7.66	667	0.16	-200	17	4.3	Ca-HCO3	G1	C5
CH-088	04CHDB088	9.5	7.95	414	4.96	100	316	0.8	Ca-HCO3	G1	C6
CH-089	04CHDB089	10.1	7.34	911	0.24	-148	68	-1.2	Ca-HCO3	G1	C5
CH-090	04CHDB090	11.1	7.58	739	0.67	-131	84	2.7	Mx cations-HCO3	G2	C1
CH-091	04CHDB091	8.8	7.26	1318	0.60	16	233	13.1	Mx cations-HCO3	G2	C1
CH-092	04CHDB092	9.6	7.13	919	2.11	49	265	0.0	Ca-HCO3	G1	C3
CH-093	04CHDB093	9.2	7.79	796	0.12	-168	48	3.6	Mx cations-HCO3	G2	C1
CH-095	04CHDB095	9.0	7.09	1228	0.16	-40	177	-8.8	Ca-Mx anions	G5	C5
CH-096	04CHDB096	9.0	7.60	1078	2.42	-104	113	2.3	Na-Cl	G3	C1
CH-098	04CHDB098	9.2	7.19	890	0.11	-129	87	1.9	Ca-HCO3	G1	C5
CH-099	04CHDB099	8.8	7.47	424	0.25	-119	98	2.9	Ca-HCO3	G1	C6
CH-100	04CHDB100	9.3	6.10	139	7.31	127	343	3.2	Ca-Cl	G5	C6
CH-101	04CHDB101	9.0	7.50	345	0.55	-35	182	2.2	Ca-HCO3	G1	C6
CH-102	04CHDB102	9.3	7.61	1944	0.12	-133	83	1.4	Na-SO4	G4	C1
CH-103	04CHDB103	10.1	7.40	654	0.11	-95	121	4.1	Ca-HCO3	G1	C5
CH-104	04CHDB104	8.5	7.40	460	6.95	69	286	5.0	Ca-HCO3	G1	C6
CH-105	04CHDB105	9.5	7.48	600	0.19	-125	91	4.5	Ca-HCO3	G1	C1
CH-107	04CHDB107	9.5	8.28	3049	0.13	-220	-4	1.9	Na-Cl	G3	C2
CH-108	04CHDB108	8.9	7.71	1065	0.12	-140	77	-0.1	Na-Cl	G3	C1
CH-109	04CHDB109	9.2	7.31	1062	0.12	-117	99	0.8	Ca-HCO3	G1	C1
CH-110	04CHDB110	9.4	7.10	661	0.10	-100	116	3.3	Ca-HCO3	G1	C5
CH-111	04CHDB111	9.6	7.64	345	0.20	-201	15	0.5	Na-HCO3	G2	C6
CH-112	04CHDB112	10.2	7.29	569	0.13	-121	95	4.7	Ca-HCO3	G1	C6
CH-113	04CHDB113	9.3	7.09	1009	0.17	-106	110	1.4	Ca-HCO3	G1	C5
CH-114	04CHDB114	9.4	5.67	61	4.46	71	287	2.6	Ca-SO4	G4	C6
CH-115	04CHDB115	9.1	7.07	607	0.33	DIF	DIF	7.2	Ca-SO4	G4	C1
CH-116	04CHDB116	9.6	8.23	693	0.18	DIF	DIF	1.5	Na-HCO3	G2	C2
CH-117	04CHDB117	9.0	7.65	639	0.34	-117	100	1.8	Ca-HCO3	G1	C5
CH-118	04CHDB118	8.4	7.54	726	0.16	-121	96	1.9	Mx cations-HCO3	G2	C5
CH-119	04CHDB119	8.1	7.53	1145	0.67	-155	62	0.7	Mx cations-Cl	G3	C1
CH-120	04CHDB120	9.5	7.41	778	0.12	DIF	DIF	0.5	Ca-HCO3	G1	C5
CH-121	04CHDB121	10.6	7.00	346	DIF	17	232	7.8	Ca-HCO3	G1	C6
CH-122	04CHDB122	17.9	7.61	250	3.54	-80	130	1.7	Ca-HCO3	G1	C6
CH-123	04CHDB123	11.8	6.04	96	3.05	-66	149	-5.9	Ca-HCO3	G1	C6
CH-124	04CHDB124	9.6	7.29	678	DIF	-79	137	2.9	Ca-HCO3	G1	C5
CH-125	04CHDB125	8.8	7.62	780	0.28	-120	97	1.3	Ca-SO4	G4	C1
CH-126	04CHDB126	10.0	8.00	2089	0.48	-358	-142	2.7	Na-Cl	G3	C1
CH-127	04CHDB127	8.7	7.22	892	0.94	-145	72	0.6	Ca-HCO3	G1	C5
CH-128	04CHDB128	8.6	7.66	974	1.40	-175	42	0.4	Na-HCO3	G2	C1
CH-129	04CHDB129	9.1	7.75	1160	1.79	-185	31	6.3	Na-Cl	G3	C1
CH-131	04CHDB131	9.5	7.00	1117	1.01	-121	95	2.2	Ca-HCO3	G1	C1
CH-132	04CHDB132	10.8	6.78	554	0.96	-149	66	-2.5	Ca-HCO3	G1	C6
CH-133	04CHDB133	9.4	7.22	731	0.87	-152	64	0.7	Ca-HCO3	G1	C5
CH-134	04CHDB134	11.8	7.24	897	0.53	-9	206	0.5	Ca-HCO3	G1	C5
CH-135	04CHDB135	8.6	7.39	505	0.99	-94	123	0.7	Mg-HCO3	G1	C5
CH-136	04CHDB136	10.4	7.05	2032	0.50	-115	101	3.6	Mx cations-Cl	G3	C4
CH-137	04CHDB137	9.4	7.72	979	2.10	-150	66	0.5	Na-HCO3	G2	C2
CH-140	04CHDB140	9.3	7.21	1737	0.80	-72	144	0.3	Ca-HCO3	G1	C4
CH-141	04CHDB141	9.6	7.42	443	0.32	-134	82	4.6	Ca-HCO3	G1	C6
CH-142	04CHDB142	9.2	7.39	818	0.21	-145	71	1.8	Ca-HCO3	G1	C5
CH-143	04CHDB143	12.1	7.56	611	0.50	-155	59	0.3	Ca-HCO3	G1	C1
CH-144	04CHDB144	8.3	7.89	498	0.25	-196	21	5.0	Mx cations-HCO3	G2	C2
CH-145	04CHDB145	8.5	7.12	729	2.62	-17	200	1.0	Ca-HCO3	G1	C5
CH-146	04CHDB146	8.6	7.17	796	0.32	-147	70	0.0	Ca-HCO3	G1	C1
CH-147	04CHDB147	9.9	7.75	1614	0.29	-150	66	-1.1	Na-Mx anions	G3	C1
CH-148	04CHDB148	11.0	7.00	1089	0.17	73	288	2.2	Na-HCO3	G2	C6
CH-149	04CHDB149	11.2	6.93	1627	DIF	-52	163	0.2	Na-HCO3	G2	C4
CH-150	04CHDB150	10.1	7.22	670	0.37	-86	130	0.9	Ca-HCO3	G1	C3
CH-151	04CHDB151	9.0	7.60	270	1.06	127	344	-0.4	Ca-HCO3	G1	C6
CH-152	04CHDB152	9.8	7.02	846	DIF	DIF	DIF	-0.5	Ca-HCO3	G1	C3
CH-200	04CHML200	9.0	7.62	751	0.24	150	367	3.2	Mg-HCO3	G1	C5
<b>Rejetés</b>											
CH-017	04CHDB017	9.7	7.52	970	0.18	-165	51	-17.3	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-037	04CHDB037	9.1	7.19	739	0.73	122	338	44.7	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-068	04CHDB068	9.0	7.54	1082	0.22	-223	-7	-15.3	Rejeté	Rejeté	Rejeté

Tableau F1: Paramètres *in-situ* et classification (suite)

Station	Ech_ID	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	Oxy. Diss. (mg/L)	Redox (mV)	Eh (mV)	EN	TE	G	Cluster
<b>Rejetés</b>											
CH-075	04CHDB075	8.7	7.42	660	DIF	DIF	DIF	26.9	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-076	04CHDB076	9.9	7.93	828	0.13	-183	33	-17.5	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-094	04CHDB094	10.4	7.78	452	0.11	-151	65	49.1	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-097	04CHDB097	10.5	7.42	1061	0.16	-136	79	-37.5	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-138	04CHDB138	10.5	7.10	1831	3.33	-37	178	-18.2	Rejeté	Rejeté	Rejeté
CH-139	04CHDB139	10.3	7.31	882	0.51	DIF	DIF	22.8	Rejeté	Rejeté	Rejeté
<b>Multiniveaux</b>											
CH-019	04CH3R-45	10.1	7.73	1739	0.82	-186	30		Na-SO4	G4	nd
CH-019	04CH3R-55	10.4	7.55	1448	0.83	-123	93		Na-SO4	G4	nd
CH-019	04CH3R-70	9.4	7.72	1776	0.51	-136	80		Na-SO4	G4	nd
CH-007	04CH4R-11	11.8	7.18	508	0.51	-90	125		Ca-HCO3	G1	nd
CH-007	04CH4R-15.9	10.0	7.26	381	0.94	-77	139		Ca-HCO3	G1	nd
CH-007	04CH4R-25.4	9.4	7.12	404	0.52	-89	127		Ca-HCO3	G1	nd
CH-010	04CH5R-33.5	9.1	7.67	1290	1.38	-132	84		Ca-SO4	G4	nd
CH-010	04CH5R-46.3	9.2	7.73	1288	0.53	-128	88		Ca-SO4	G4	nd
CH-100	04CH6R-52.5	12.8	5.72	144	1.10	207	421		Ca-Cl	G5	nd
CH-100	04CH6R-65.2	14.3	5.65	146	0.83	193	406		Ca-Cl	G5	nd
CH-033	04CH10R-25	8.7	7.34	604	1.54	4	221		Ca-HCO3	G1	nd
CH-033	04CH10R-46.6	10.0	7.49	614	0.73	-121	95		Ca-HCO3	G1	nd
CH-034	04CH11R-33	8.5	7.74	554	0.58	DIF	DIF		Mx cations-HCO3	G2	nd
CH-034	04CH11R-52	9.0	7.73	604	0.52	DIF	DIF		Mx cations-HCO3	G2	nd
CH-002	04CH12R-22	9.3	7.48	697	0.57	DIF	DIF		Ca-HCO3	G1	nd
CH-002	04CH12R-50.9	9.1	7.67	578	3.60	-210	6		Ca-HCO3	G1	nd
CH-117	04CH13R-20.5	9.9	7.65	552	1.25	-107	109		Ca-HCO3	G1	nd
CH-117	04CH13R-31.8	9.1	7.63	630	1.23	-91	125		Ca-HCO3	G1	nd
CH-117	04CH13R-55.8	8.8	7.72	584	0.71	-76	141		Mx cations-HCO3	G2	nd
CH-041	04CH14R-29.5	9.3	7.95	370	0.83	-132	84		Alk earth-HCO3	G1	nd
CH-041	04CH14R-35	9.9	7.78	369	0.76	-133	83		Alk earth-HCO3	G1	nd
CH-041	04CH14R-85.5	9.9	7.87	390	0.74	-139	77		Mx cations-HCO3	G2	nd
<b>Duplicatas</b>											
CH-034	04CH11R-6	9.0	7.73	604	0.52	DIF	DIF		nd	nd	nd
CH-041	04CH14R-6	9.3	7.95	370	0.83	-132	84		nd	nd	nd
CH-008	04CHDB009	9.8	7.06	851	0.11	-100	116		nd	nd	nd
CH-020	04CHDB021	11.0	7.22	798	0.09	-232	-17		nd	nd	nd
CH-023	04CHDB025	10.3	8.16	708	0.10	-266	-50		nd	nd	nd
CH-041	04CHDB045	8.8	7.79	407	0.18	DIF	DIF		nd	nd	nd
CH-073	04CHDB074	9.9	7.71	484	0.32	-136	80		nd	nd	nd
CH-105	04CHDB106	9.5	7.48	600	0.19	-125	91		nd	nd	nd
CH-128	04CHDB130	8.6	7.66	974	1.40	-175	42		nd	nd	nd
<b>Blancs de terrain et de transport</b>											
CH-002	04CHDBBL	na	na	na	na	na	na		na	na	na
CH-080	04CHDBBL003	na	na	na	na	na	na		na	na	na
CH-008	04CHDBBL2	na	na	na	na	na	na		na	na	na
na	04CHDBBT001	na	na	na	na	na	na		na	na	na
na	04CHDBTR3	na	na	na	na	na	na		na	na	na
na	04CHDBTRFINAL	na	na	na	na	na	na		na	na	na
CH-034	04CHMN002	na	na	na	na	na	na		na	na	na
CH-041	BOYCH14R-29.5	na	na	na	na	na	na		na	na	na





Tableau F2: Paramètres inorganiques et physiques - données brutes (suite)

Ech_ID	Ag-t (ug/L)	Alc (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Al-t (ug/L)	As-t (ug/L)	Ba-t (ug/L)	B-t (ug/L)	Br-t (ug/L)	Ca-t (mg/L)	Cd-t (ug/L)	CiD (mg/L)	Cl (mg/L)	COD (mg/L)	COU UCV
<b>Rejetés</b>													
04CHDB075	<0.001	310	0.4	0.28	91	22	6.6	83	0.010	66	7.5	1.7	2
04CHDB076	0.011	160	0.2	0.17	12	140	31	53	0.009	32	25	0.9	1
04CHDB094	<0.001	290	0.7	4.1	44	6.5	4.5	52	0.016	64	160	2.1	4
04CHDB097	0.008	180	0.2	0.67	72	120	14	75	0.010	40	8.8	0.5	<1
04CHDB138	0.007	300	0.8	0.89	19	230	110	150	0.008	80	23	1.3	<1
04CHDB139	0.001	370	<0.1	0.14	180	41	6.2	98	0.010	96	23	1.6	2
<b>Multiniveaux</b>													
04CH3R-45	0.001	190	1.6	0.34	8.9	260	290	49	0.032	47	200	1.2	1
04CH3R-55	<0.001	170	1.0	0.30	7.5	260	190	73	0.026	41	120	1.1	1
04CH3R-70	<0.001	210	1.0	0.56	12	270	310	76	0.029	DEL	240	DEL	DEL
04CH4R-11	0.004	220	1.9	0.21	860	54	8.8	82	<0.004	56	35	7.5	38
04CH4R-15.9	0.011	170	5.0	0.14	680	31	4.4	65	0.005	44	3.8	3.7	18
04CH4R-25.4	0.003	200	1.3	0.26	420	36	6.9	58	0.004	50	6.3	6.7	40
04CH5R-33.5	0.007	160	4.2	0.47	8.9	420	96	150	0.023	35	70	0.6	<1
04CH5R-46.3	0.008	150	9.1	0.45	9.6	430	95	160	0.022	33	70	0.4	<1
04CH6R-52.5	<0.001	13	11	0.27	210	11	3.9	13.4	0.043	10.0	21	1.2	<1
04CH6R-65.2	<0.001	13	13	0.29	230	7.6	4.5	14.0	0.057	7.9	21	1.9	1
04CH10R-25	<0.001	210	0.8	0.23	150	190	16	70	0.023	53	27	2.5	2
04CH10R-46.6	<0.001	230	1.8	0.67	230	220	18	68	0.008	56	26	2.1	1
04CH11R-33	0.001	240	0.3	0.15	100	46	31	42	<0.004	59	29	1.3	2
04CH11R-52	0.001	230	0.3	0.16	140	50	44	42	0.008	57	46	1.0	1
04CH12R-22	0.002	270	0.3	0.19	110	35	12	82	0.007	67	27	0.8	<1
04CH12R-50.9	0.001	270	0.4	0.10	210	39	10	62	<0.004	67	17	2.0	4
04CH13R-20.5	<0.001	240	1.1	0.53	90	35	12	60	0.010	58	23	1.2	1
04CH13R-31.8	0.001	250	0.6	0.43	98	33	17	68	0.021	60	35	1.0	1
04CH13R-55.8	0.001	240	0.2	0.27	73	35	15	51	0.013	58	25	0.9	<1
04CH14R-29.5	<0.001	180	0.6	1.56	67	67	15	33	0.020	43	3.8	1.1	2
04CH14R-35	<0.001	180	0.8	1.99	80	60	16	34	0.018	42	3.8	1.0	1
04CH14R-85.5	<0.001	170	0.4	1.27	58	81	21	32	0.015	41	8.2	0.8	2
<b>Duplicatas</b>													
04CH11R-6	0.001	230	0.3	0.17	140	50	47	42	0.007	58	41	1.0	1
04CH14R-6	0.001	180	0.6	1.70	68	67	16	33	0.018	43	5.0	1.0	1
04CHDB009	<0.001	320	0.6	0.14	180	37	5.8	110	0.028	79	23	1.5	RNF
04CHDB021	0.001	250	0.3	0.16	59	9.5	9.1	130	0.009	61	29	0.4	<1
04CHDB025	<0.001	180	0.9	0.06	18	510	11	24	0.008	46	4.0	<0.2	2
04CHDB045	<0.001	200	0.5	6.7	130	43	7.1	41	0.011	46	<0.1	46	RNF
04CHDB074	<0.001	220	0.4	0.66	95	39	13	44	0.022	47	15	0.6	1
04CHDB106	0.001	150	0.3	0.42	27	56	14	86	0.011	39	27	0.9	2
04CHDB130	0.001	280	0.3	0.84	160	230	110	49	0.010	69	83	1.4	2
<b>Blancs de terrain et de transport</b>													
04CHDBBL	<0.001	na	0.2	<0.10	<0.02	<0.3	<0.5	<0.02	<0.004	na	na	na	na
04CHDBBL003	<0.001	na	0.2	0.07	<0.02	<0.3	<0.5	<0.02	<0.004	na	na	na	na
04CHDBBL2	<0.001	na	<0.1	<0.03	<0.02	<0.3	<0.5	<0.02	<0.004	na	na	na	na
04CHDBBT001	<0.001	na	2.3	<0.03	<0.02	<0.3	1.4	<0.02	<0.004	na	na	na	na
04CHDBTR3	<0.001	na	6.4	<0.03	<0.02	<0.3	1.2	<0.02	<0.004	na	na	na	na
04CHDBTRFINAL	<0.001	na	<0.1	<0.03	<0.02	0.4	0.5	<0.02	<0.004	na	na	na	na
04CHMN002	0.001	na	0.3	<0.03	<0.02	<0.3	<0.5	<0.02	<0.004	na	na	na	na
BOYCH14R-29.5	<0.001	na	<0.1	0.05	<0.02	0.4	0.5	<0.02	<0.004	na	na	na	na





Tableau F2: Paramètres inorganiques et physiques - données brutes (suite)

Ech_ID	Cr-t (ug/L)	Cu-t (ug/L)	F (mg/L)	Fe-t (ug/L)	Hg-t (ug/L)	I-t (ug/L)	K-t (mg/L)	Li-t (ug/L)	Mg-t (mg/L)	Mn-t (ug/L)	Na-t (mg/L)	N-t (mg N/L)	NH <sub>4</sub> (mg N/L)
<b>Rejetés</b>													
04CHDB075	0.33	2.7	0.06	2.2	0.03	<0.5	3.6	1.1	34	1.7	7.8	1.34	<0.02
04CHDB076	0.50	1.0	0.78	260	0.02	3.7	2.7	7.1	26	4.8	80	0.24	0.24
04CHDB094	<0.04	<0.05	0.22	370	0.02	1.1	0.72	2.8	22	48	6.5	0.15	0.07
04CHDB097	<0.04	0.30	0.14	760	0.04	10	3.4	11	56	16	44	0.23	0.03
04CHDB138	3.5	0.90	0.40	150	<0.01	3.5	10.7	11	53	17	150	0.56	0.20
04CHDB139	0.45	0.34	0.42	1700	0.04	4.1	3.3	8.6	51	85	23	0.16	0.12
<b>Multiniveaux</b>													
04CH3R-45	3.7	0.59	0.48	410	0.03	110	7.9	13	17.8	28	310	0.18	0.17
04CH3R-55	2.2	0.66	0.42	490	0.01	40	9.4	16	23	35	210	0.14	0.14
04CH3R-70	4.4	0.61	0.42	550	0.01	110	9.7	17	24	37	260	0.20	0.18
04CH4R-11	0.17	<0.05	0.10	1300	<0.01	2.0	6.1	2.7	12.0	220	4.0	0.25	0.10
04CH4R-15.9	0.27	<0.05	0.10	990	<0.01	0.6	4.1	2.5	10.8	150	5.1	0.11	0.03
04CH4R-25.4	0.11	0.13	0.08	610	<0.01	<0.5	4.1	2.6	10.9	90	6.4	0.28	0.12
04CH5R-33.5	<0.04	0.80	0.38	720	0.02	1.1	18.0	12	14.4	58	110	0.12	0.12
04CH5R-46.3	<0.04	0.80	0.38	700	0.04	1.0	18.7	12	15.5	65	110	0.12	0.12
04CH6R-52.5	0.19	3.4	0.12	28	<0.01	<0.5	2.1	1.3	2.6	24	6.1	0.14	0.02
04CH6R-65.2	0.49	4.2	0.10	50	<0.01	<0.5	2.2	1.4	2.7	27	6.0	0.27	0.03
04CH10R-25	0.57	0.72	0.10	82	<0.01	2.0	1.3	1.4	30	90	15.1	0.24	0.02
04CH10R-46.6	0.61	0.30	0.18	220	<0.01	2.0	2.0	6.2	30	72	20	0.14	0.04
04CH11R-33	0.54	0.16	0.20	410	0.01	1.2	4.1	7.3	25	68	43	0.16	0.08
04CH11R-52	0.78	0.15	0.18	220	<0.01	1.2	4.5	7.3	26	64	49	0.08	0.04
04CH12R-22	0.59	0.29	0.18	200	<0.01	2.9	3.2	6.1	41	14	7.9	0.12	0.10
04CH12R-50.9	0.39	0.16	0.18	110	<0.01	1.9	3.1	6.1	33	20	15.8	0.17	0.14
04CH13R-20.5	0.44	0.26	0.24	430	<0.01	1.3	2.3	5.7	25	23	27	0.20	0.19
04CH13R-31.8	0.66	0.61	0.22	450	0.01	2.1	2.5	5.7	28	29	29	0.22	0.22
04CH13R-55.8	0.44	0.21	0.22	310	0.02	1.8	2.3	6.0	23	20	42	0.18	0.18
04CH14R-29.5	0.07	0.20	0.24	180	<0.01	0.6	3.4	8.7	18.9	19	18.7	0.22	0.22
04CH14R-35	0.07	0.17	0.24	270	0.02	0.7	3.4	8.4	19.2	17	17.3	0.22	0.20
04CH14R-85.5	0.13	0.14	0.30	160	<0.01	0.7	3.4	8.1	18.3	18	25	0.23	0.23
<b>Duplicatas</b>													
04CH11R-6	0.81	0.15	0.18	220	0.01	1.2	4.5	7.4	26	63	49	0.18	0.09
04CH14R-6	0.06	0.20	0.24	180	0.02	0.7	3.4	8.7	18.9	19	18.9	0.22	0.22
04CHDB009	<0.04	0.77	0.22	1800	<0.01	4.3	3.9	7.4	45	190	14.0	0.16	0.14
04CHDB021	<0.04	1.5	0.16	470	<0.01	1.5	1.7	3.0	23	50	7.4	0.06	<0.02
04CHDB025	<0.04	0.42	1.1	240	<0.01	4.4	4.4	34	20	12	99	0.29	0.29
04CHDB045	<0.04	0.14	0.20	330	<0.01	<0.5	3.4	8.3	21	31	10.2	0.18	0.18
04CHDB074	0.36	1.0	0.18	410	0.02	0.8	3.6	7.2	23	200	26	0.23	0.23
04CHDB106	<0.04	0.07	0.24	740	<0.01	1.6	3.2	3.7	13.1	69	8.0	0.05	0.03
04CHDB130	1.7	0.38	0.34	560	<0.01	15	5.7	8.6	28	78	110	0.43	0.39
<b>Blancs de terrain et de transport</b>													
04CHDBBL	<0.04	<0.05	na	<1.0	0.01	<0.5	<0.02	<0.06	<0.02	<0.004	<0.02	na	na
04CHDBBL003	<0.04	<0.05	na	1.0	0.03	<0.5	<0.02	<0.06	<0.02	<0.004	<0.02	na	na
04CHDBBL2	<0.04	<0.05	na	<1.0	<0.01	<0.5	<0.02	<0.06	<0.02	0.006	<0.02	na	na
04CHDBBT001	<0.04	0.06	na	<1.0	0.02	0.6	<0.02	<0.06	<0.02	0.009	<0.02	na	na
04CHDBTR3	0.64	0.07	na	4.0	0.02	<0.5	0.02	<0.06	<0.02	0.018	0.02	na	na
04CHDBTRFINAL	<0.04	<0.05	na	<1.0	0.03	<0.5	<0.02	<0.06	<0.02	<0.004	0.03	na	na
04CHMN002	<0.04	<0.05	na	<1.0	0.02	<0.5	<0.02	<0.06	<0.02	<0.004	0.02	na	na
BOYCH14R-29.5	<0.04	<0.05	na	<1.0	0.02	<0.5	<0.02	<0.06	<0.02	0.010	<0.02	na	na







Tableau F2: Paramètres inorganiques et physiques - données brutes (suite)

Ech_ID	NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> (mg N/L)	Ni-t (ug/L)	Pb-t (ug/L)	P-t (ug/L)	Se-t (ug/L)	Si-t (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	Sr-t (ug/L)	U-t (ug/L)	Zn-t (ug/L)	CN-t (mg/L)	Pt-ino. (mg P/L)	S-t (mg/L)
<b>Rejetés</b>													
04CHDB075	0.69	2.1	0.04	2	<0.3	3.5	260	480	1.1	<0.7	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB076	<0.02	<0.02	0.03	7	0.6	4.5	110	16000	0.063	2.7	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB094	<0.02	0.38	<0.02	17	<0.3	6.3	120	170	0.29	1.8	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB097	<0.02	<0.02	0.07	2	<0.3	6.6	55	11000	0.10	6.7	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB138	0.02	1.1	0.06	<2	<0.3	4.9	330	8600	0.21	7.0	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB139	<0.02	0.88	0.04	28	<0.3	9.9	340	540	0.082	2.9	<0.003	<0.03	<0.03
<b>Multiniveaux</b>													
04CH3R-45	<0.02	0.29	0.03	7	<0.3	2.9	430	1800	0.079	58	<0.003	<0.03	<0.03
04CH3R-55	<0.02	0.42	0.02	<2	<0.3	2.9	450	2500	0.033	80	<0.003	<0.03	<0.03
04CH3R-70	<0.02	0.48	0.07	<2	<0.3	3.0	390	2800	0.11	91	<0.003	<0.03	<0.03
04CH4R-11	<0.02	<0.02	0.06	4	<0.3	6.1	6.5	290	0.028	48	<0.003	<0.03	<0.03
04CH4R-15.9	<0.02	<0.02	0.03	5	<0.3	5.9	31	510	0.064	25	<0.003	<0.03	<0.03
04CH4R-25.4	<0.02	<0.02	0.02	4	<0.3	5.5	16	580	0.11	31	<0.003	<0.03	<0.03
04CH5R-33.5	<0.02	<0.02	0.05	<2	<0.3	2.8	500	7500	2.8	5.0	<0.003	<0.03	<0.03
04CH5R-46.3	<0.02	<0.02	0.05	<2	<0.3	2.7	450	9000	3.2	8.7	<0.003	<0.03	<0.03
04CH6R-52.5	0.11	2.9	0.06	7	<0.3	3.7	29	190	0.029	220	<0.003	<0.03	<0.03
04CH6R-65.2	0.22	3.7	0.07	7	<0.3	3.6	21	180	0.020	270	<0.003	<0.03	<0.03
04CH10R-25	0.04	3.3	0.97	<2	<0.3	5.7	100	160	1.3	17	<0.003	<0.03	<0.03
04CH10R-46.6	<0.02	2.9	<0.02	2	<0.3	5.9	85	260	0.78	1.2	<0.003	<0.03	0.05
04CH11R-33	0.08	0.20	0.29	11	<0.3	4.5	21	750	0.29	11	<0.003	<0.03	<0.03
04CH11R-52	0.04	0.20	0.20	7	<0.3	4.4	30	780	0.20	8.9	<0.003	<0.03	<0.03
04CH12R-22	<0.02	0.31	<0.02	12	<0.3	6.6	80	1300	0.12	6.2	<0.003	<0.03	<0.003
04CH12R-50.9	0.03	0.22	<0.02	18	<0.3	5.8	38	1100	0.097	1.3	<0.003	<0.03	1.10
04CH13R-20.5	<0.02	0.52	<0.02	27	<0.3	6.6	50	890	0.25	16	<0.003	<0.03	<0.03
04CH13R-31.8	<0.02	0.95	<0.02	26	<0.3	6.7	50	1000	0.22	37	<0.003	<0.03	<0.03
04CH13R-55.8	<0.02	0.30	0.15	26	<0.3	6.2	50	780	0.15	32	<0.003	<0.03	<0.03
04CH14R-29.5	<0.02	0.17	<0.02	15	<0.3	5.2	50	870	0.077	30	<0.003	<0.03	<0.03
04CH14R-35	0.02	0.18	<0.02	17	<0.3	5.3	50	810	0.075	10	<0.003	<0.03	<0.03
04CH14R-85.5	<0.02	0.14	<0.02	14	<0.3	5.1	55	970	0.077	6.5	<0.003	<0.03	<0.03
<b>Duplicatas</b>													
04CH11R-6	0.09	0.18	0.18	7	<0.3	4.4	31	780	0.18	8.8	<0.003	<0.03	<0.03
04CH14R-6	<0.02	0.17	<0.02	15	<0.3	5.3	23	880	0.078	29	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB009	<0.02	<0.02	<0.02	32	<0.3	7.9	120	410	0.21	1.4	<0.006	<0.03	<0.04
04CHDB021	<0.02	<0.02	0.03	<2	<0.3	5.8	160	660	0.38	5.9	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB025	<0.02	0.17	0.03	9	<0.3	5.5	190	3200	0.13	4.3	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB045	<0.02	0.26	<0.02	20	<0.3	5.9	20	720	0.063	1.5	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB074	<0.02	<0.02	0.02	57	<0.3	4.7	50	590	0.11	1.5	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB106	0.02	<0.02	0.03	5	<0.3	4.9	120	1800	0.12	<0.7	<0.003	<0.03	<0.03
04CHDB130	<0.02	0.30	<0.02	66	<0.3	6.1	90	1200	0.19	0.8	<0.003	0.03	<0.03
<b>Blancs de terrain et de transport</b>													
04CHDBBL	na	<0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na
04CHDBBL003	na	<0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na
04CHDBBL2	na	<0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na
04CHDBBT001	na	<0.02	0.03	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	0.8	na	na	na
04CHDBTR3	na	0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na
04CHDBTRFINAL	na	<0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na
04CHMN002	na	<0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na
BOYCH14R-29.5	na	<0.02	<0.02	<2	<0.3	<0.03	na	<0.1	<0.0008	<0.7	na	na	na

Tableau F3: Isotopes stables et radioactifs - critères bactériologiques

Ech_ID	$\delta^{18}\text{O}$ (o/oo)	$\delta^2\text{H}$ (o/oo)	Tritium (T.U)	$\delta^{13}\text{C}$ (o/oo)	$^{14}\text{C}$ pCm	E coli (UFC/100mL)	Coli tot (UFC/100mL)	Col Atyp (UFC/100mL)
04CHDB002	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB003	na	na	na	na	na	0	0	>200
04CHDB004	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB005	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB006	na	na	na	na	na	0	0	2
04CHDB007	-11.4	-80.7	14.3	-11.32	70.74	0	0	0
04CHDB008	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB010	na	na	na	na	na	0	1	57
04CHDB011	na	na	na	na	na	0	3	0
04CHDB012	na	na	na	na	na	0	0	16
04CHDB013	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB014	na	na	na	na	na	0	5	3
04CHDB015	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB016	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB019	na	na	na	na	na	0	1	77
04CHDB020	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB022	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB023	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB024	-11.5	-80.0	16.3	-12.85	68.82	0	23	>200
04CHDB026	na	na	na	na	na	0	2	0
04CHDB027	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB028	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB029	na	na	na	na	na	10	39	>200
04CHDB030	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB031	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB032	-11.26	-74.1	17.8	-14.73	91.53	0	14	>200
04CHDB033	na	na	na	na	na	0	>80	49
04CHDB034	na	na	na	na	na	0	VR	>200
04CHDB035	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB036	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB038	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB039	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB040	na	na	na	na	na	8	71	1
04CHDB041	na	na	na	na	na	0	22	50
04CHDB042	na	na	na	na	na	0	0	1
04CHDB043	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB044	na	na	na	na	na	0	0	>200
04CHDB046	na	na	na	na	na	0	0	1
04CHDB047	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB048	na	na	na	na	na	0	50	32
04CHDB049	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB050	na	na	na	na	na	0	4	1
04CHDB051	na	na	na	na	na	0	12	1
04CHDB052	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB053	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB054	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB055	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB056	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB057	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB058	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB059	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB060	-10.004	-74.5	<0.8	-5.94	27.7	0	0	0
04CHDB061	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB062	na	na	na	na	na	0	4	1
04CHDB063	na	na	na	na	na	1	9	7
04CHDB064	na	na	na	na	na	0	0	2
04CHDB065	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB066	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB067	na	na	na	na	na	0	4	5
04CHDB069	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB070	-11.5	-85.8	17.0	-13.48	87.3	0	0	0
04CHDB071	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB072	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB073	na	na	na	na	na	0	2	0
04CHDB077	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB078	na	na	na	na	na	0	1	3
04CHDB079	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB080	na	na	na	na	na	0	>80	0
04CHDB081	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB082	na	na	na	na	na	0	0	0

Tableau F3: Isotopes stables et radioactifs - critères bactériologiques (suite)

Ech_ID	$\delta^{18}\text{O}$ (o/oo)	$\delta^2\text{H}$ (o/oo)	Tritium (T.U)	$\delta^{13}\text{C}$ (o/oo)	$\delta^{14}\text{C}$ pCm	E coli (UFC/100mL)	Coli tot (UFC/100mL)	Col Atyp (UFC/100mL)
04CHDB083	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB084	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB085	na	na	na	na	na	0	1	0
04CHDB086	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB087	na	na	na	na	na	0	0	1
04CHDB088	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB089	na	na	na	na	na	0	2	0
04CHDB090	na	na	na	na	na	0	6	0
04CHDB091	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB092	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB093	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB095	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB096	na	na	na	na	na	0	0	5
04CHDB098	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB099	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB100	-12.59	-94.4	15.1	-17.66	99.65	0	2	13
04CHDB101	-12.5	-87.8	4.7	-16.31	51.08	0	0	0
04CHDB102	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB103	na	na	na	na	na	0	11	5
04CHDB104	na	na	na	na	na	0	13	17
04CHDB105	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB107	-10.62	-73.1	<0.8	-9.7	29.83	0	0	0
04CHDB108	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB109	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB110	-11.7	-88.0	14.5	-13.79	90.27	0	0	0
04CHDB111	-11.7	-81.2	0.9	-12.73	31.95	0	0	3
04CHDB112	-12.1	-84.9	16.4	-13.91	94.17	0	0	>200
04CHDB113	na	na	na	na	na	0	0	>200
04CHDB114	na	na	na	na	na	0	>80	0
04CHDB115	na	na	na	na	na	0	2	0
04CHDB116	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB117	na	na	na	na	na	0	12	26
04CHDB118	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB119	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB120	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB121	na	na	na	na	na	0	3	0
04CHDB122	na	na	na	na	na	0	>80	0
04CHDB123	-12.29	-85.2	12.0	-21.7	98.98	0	0	1
04CHDB124	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB125	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB126	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB127	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB128	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB129	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB131	-11.3	-80.04	8.3	-13.4	94.62	0	0	0
04CHDB132	na	na	na	na	na	0	0	1
04CHDB133	-10.8	-71.0	14.3	-15.11	70.8	0	0	0
04CHDB134	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB135	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB136	-11.3	-74.3	10.2	-14.91	83.11	0	0	0
04CHDB137	-10.0	-71.3	6.1	-16.56	55.79	0	0	0
04CHDB140	-11.0	-80.1	12.9	-14.13	90.41	na	na	na
04CHDB141	na	na	na	na	na	na	na	na
04CHDB142	na	na	na	na	na	na	na	na
04CHDB143	na	na	na	na	na	na	na	na
04CHDB144	-11.29	-79.3	3.3	-12.18	50.38	na	na	na
04CHDB145	-11.6	-80.4	12.1	-14.42	76.12	na	na	na
04CHDB146	-11.9	-73.8	12.0	-11.07	58.35	na	na	na
04CHDB147	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB148	na	na	na	na	na	0	6	0
04CHDB149	na	na	na	na	na	0	1	0
04CHDB150	-11.7	-89.6	13.3	-14.48	99.86	0	0	14
04CHDB151	na	na	na	na	na	0	0	0
04CHDB152	-12.2	-90.2	9.2	-14.96	83.05	0	0	0
04CHML200	na	na	na	na	na	0	8	14
<b>Rejetés</b>								
04CHDB017	na	na	na	na	na	0	26	31
04CHDB037	na	na	na	na	na	2	5	9
04CHDB068	na	na	na	na	na	0	0	0









Tableau F4: Paramètres modélisés et calculés (suite)

Ech_ID	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mg/L)	F (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Si (mg/L)	Ba <sup>2+</sup> (ug/L)	Br (ug/L)	Fe <sup>2+</sup> (ug/L)	H <sub>2</sub> S(aq) (ug/L)	Mn <sup>2+</sup> (ug/L)	Sr <sup>2+</sup> (ug/L)	MDT (mg/L)	Dureté (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
04CHDB109	122.4	24.6	34.8	7.7	78	0.237	280.1	173.8	24.1	0.192	0.044	5.2	30.1	76.0	713.95	6.28	19.90	2732	769	407
04CHDB110	74.1	31.4	6.7	1.6	6.7	0.191	356.5	52.7	54.3	0.076	0.266	6.4	244.6	3.7	1503.79	8.22	80.12	289	526	314
04CHDB111	17.1	6.8	47.9	1.5	0.05	0.327	192.7	19.5	8.7	0.257	0.133	6.0	111.8	3.2	97.23	3.84	12.84	288	159	71
04CHDB112	60.0	27.1	7.5	1.1	10	0.257	310.0	36.5	30.2	0.249	0.089	4.3	73.8	3.2	181.99	6.43	6.66	94	440	262
04CHDB113	92.8	42.4	30.9	19.6	70	0.245	450.0	47.3	69.2	0.094	0.222	4.0	427.1	12.0	311.94	8.28	55.70	382	777	407
04CHDB114	4.7	1.5	1.2	2.0	1.6	0.000	10.6	9.8	46.7	0.053	3.674	3.7	297.8	3.5	9.05	15.45	4.98	28	31	18
04CHDB115	84.8	8.2	7.7	3.3	12	0.065	131.7	176.6	21.7	0.333	0.044	4.3	19.7	30.0	11.56	8.58	15.63	1658	419	246
04CHDB116	33.6	26.2	64.8	6.6	40	2.403	337.9	13.8	3.8	0.384	0.044	4.5	1599.5	41.0	16.19	1.17	1.89	1235	421	192
04CHDB117	56.9	24.2	30.9	2.4	30	0.525	285.1	46.3	12.4	0.192	0.044	6.5	76.0	16.0	328.82	3.76	15.19	845	452	242
04CHDB118	58.4	29.6	38.9	3.6	37	0.458	320.9	54.3	18.2	0.134	0.044	5.3	122.1	29.0	277.73	4.59	17.83	719	510	268
04CHDB119	68.8	39.5	81.8	3.9	180	0.391	272.1	47.4	15.7	0.132	0.044	5.1	78.9	170.0	216.99	4.66	179.48	824	711	334
04CHDB120	78.5	35.9	16.2	3.0	20	0.407	366.8	56.2	27.2	0.133	0.044	6.7	76.6	6.1	817.66	5.44	36.32	214	599	344
04CHDB121	40.8	8.9	7.4	0.8	12	0.063	156.6	35.4	30.1	0.039	0.044	3.1	33.2	5.8	58.78	9.09	21.66	84	240	139
04CHDB122	29.9	9.3	2.5	0.6	0.6	0.256	131.7	12.4	5.4	0.078	1.107	5.5	104.5	2.3	1.89	3.21	0.34	126	183	113
04CHDB123	7.9	3.1	1.4	1.7	2.2	0.001	35.1	6.7	62.0	0.052	0.044	5.4	340.3	2.5	3591.13	14.71	71.26	42	54	32
04CHDB124	71.4	32.4	11.0	2.1	21	0.277	332.9	52.9	32.6	0.095	0.753	6.5	84.8	7.6	103.08	6.49	43.21	186	539	312
04CHDB125	95.0	34.8	19.9	3.3	45	0.405	222.9	191.5	10.2	0.475	0.044	6.2	92.4	9.4	144.46	177.87	22.90	7239	682	381
04CHDB126	32.9	21.7	367.7	17.2	390	1.340	274.6	211.9	5.0	3.096	0.089	3.8	22.0	460.0	0.02	4027.45	14.50	2019	1080	172
04CHDB127	98.7	37.7	14.3	6.6	25	0.263	366.8	110.6	42.5	0.095	0.044	6.5	87.9	6.5	871.27	7.19	34.89	1084	705	402
04CHDB128	44.7	25.6	109.5	5.6	81	0.643	333.0	77.4	14.1	0.308	0.044	6.0	125.9	110.0	361.41	3.70	45.53	1012	539	217
04CHDB129	38.3	26.9	139.3	3.7	190	0.528	213.8	138.9	7.2	0.385	0.044	5.0	20.8	150.0	272.61	3.07	12.11	3686	645	206
04CHDB131	115.6	37.3	35.8	9.1	75	0.177	389.9	132.6	72.9	0.265	0.044	7.0	25.8	40.0	1604.21	9.03	52.74	3667	852	442
04CHDB132	61.4	6.9	34.0	1.3	63	0.049	191.2	5.6	60.0	0.039	0.044	5.0	184.8	13.0	3459.39	10.86	354.17	77	366	182
04CHDB133	65.6	38.7	19.4	4.2	12	0.262	368.2	56.8	42.4	0.161	0.044	8.3	164.9	9.5	545.21	7.13	18.75	548	557	323
04CHDB134	76.8	21.8	60.9	4.8	130	0.200	250.0	34.5	26.1	0.096	0.044	5.5	118.8	11.0	109.53	6.58	48.95	913	592	281
04CHDB135	42.3	28.2	16.8	2.0	6.5	0.258	262.8	38.2	21.2	0.172	0.133	5.6	14.3	5.3	17.32	5.82	95.45	737	376	222
04CHDB136	146.5	62.1	129.4	2.8	370	0.242	432.6	97.3	68.9	0.110	0.089	7.6	118.8	44.0	1749.18	8.32	170.19	423	1294	622
04CHDB137	28.9	41.5	129.5	8.8	25	1.414	616.0	2.5	22.3	0.378	0.044	7.8	516.1	35.0	115.25	21.45	2.28	941	559	243
04CHDB140	200.2	56.5	60.6	2.5	170	0.421	535.2	188.7	60.4	0.093	0.089	8.2	68.6	21.0	1221.82	7.02	169.76	570	1324	733
04CHDB141	50.4	21.8	4.3	1.8	0.6	0.294	274.8	22.0	20.3	0.058	0.089	5.5	55.7	2.8	10.71	5.44	113.18	143	353	215
04CHDB142	69.1	39.5	34.9	6.8	38	0.414	391.2	59.1	30.5	0.283	0.354	6.5	502.9	12.0	241.97	5.65	9.12	1390	622	335
04CHDB143	87.7	9.8	14.2	6.6	8.3	0.372	225.4	107.1	11.3	0.274	0.089	5.9	20.5	6.9	286.65	4.00	42.06	6759	456	259
04CHDB144	30.5	26.6	36.9	4.1	5	1.091	356.1	0.3	9.2	0.211	0.089	5.8	282.6	13.0	225.57	2.48	4.11	770	344	186
04CHDB145	79.9	33.9	10.6	2.6	17	0.183	333.0	72.7	49.3	0.152	0.177	5.4	109.8	12.0	17.96	8.19	88.20	581	577	339
04CHDB146	115.2	21.3	11.0	2.3	10	0.195	308.0	135.1	40.3	0.154	0.044	0.0	34.5	7.5	1947.72	7.66	21.70	1339	648	376
04CHDB147	53.0	46.6	188.5	8.8	160	0.785	294.2	257.1	9.6	1.316	0.089	5.4	10.9	170.0	241.74	2.94	6.85	4681	861	324
04CHDB148	1.3	0.4	248.6	1.7	65	0.209	460.8	96.6	84.7	0.318	2.658	7.4	1.1	8.7	0.56	8.89	0.17	19	419	5
04CHDB149	137.4	29.1	159.3	3.5	190	0.254	601.8	58.3	125.6	0.228	0.089	7.0	114.4	35.0	1028.03	55.74	202.81	1471	1133	463
04CHDB150	64.6	34.5	12.1	9.3	13	0.256	356.9	35.8	40.7	0.057	0.266	5.8	60.5	6.8	231.50	7.04	11.76	273	524	303
04CHDB151	36.5	8.6	2.8	1.4	0.05	0.199	132.0	23.2	6.6	0.138	0.886	4.2	43.5	2.0	0.03	4.20	0.47	328	205	127
04CHDB152	75.6	31.9	33.9	15.7	40	0.163	357.2	28.4	64.5	0.114	38.534	4.2	63.5	8.1	0.89	8.90	1.23	398	596	320
04CHML200	43.2	43.0	42.8	7.1	13	0.732	414.7	54.0	19.2	0.358	0.044	6.7	113.2	15.0	1.69	3.93	15.57	1666	519	285

Tableau F4: Paramètres modélisés et calculés (suite)

Ech_ID	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Si (mg/L)	Ba <sup>2+</sup> (ug/L)	Br <sup>-</sup> (ug/L)	Fe <sup>2+</sup> (ug/L)	H <sub>2</sub> S(aq) (ug/L)	Mn <sup>2+</sup> (ug/L)	Sr <sup>2+</sup> (ug/L)	MDT (mg/L)	Dureté (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
<b>Rejetés</b>																				
04CHDB017	53.5	42.6	68.6	3.9	7.4	0.225	153.7	195.5	8.7	0.885	0.044	6.8	21.1	15.0	723.11	4.52	11.61	18285	561	309
04CHDB037	62.1	31.8	4.4	2.4	6.6	0.293	418.4	410.3	50.9	0.077	1.019	4.8	52.8	3.3	0.32	7.36	0.18	101	616	286
04CHDB068	109.1	47.3	37.8	7.5	42	0.467	305.0	99.8	16.7	0.318	0.089	4.6	40.2	110.0	69.15	4.45	12.02	4302	695	467
04CHDB075	69.5	28.7	7.7	3.6	7.5	0.418	369.3	217.9	27.0	0.058	3.057	3.5	61.4	6.6	1.25	5.46	1.00	406	489	292
04CHDB076	48.1	23.7	79.7	2.7	25	0.689	188.6	92.9	4.2	0.751	0.044	4.5	9.8	31.0	185.38	2.14	2.89	14666	449	218
04CHDB094	46.2	19.6	6.5	0.7	160	0.917	345.2	105.0	10.7	0.213	0.044	6.3	34.9	4.5	229.03	2.81	24.66	153	478	196
04CHDB097	71.0	53.0	43.9	3.4	8.8	0.248	211.8	42.5	15.0	0.130	0.044	6.6	65.0	14.0	583.99	5.22	11.65	10452	454	395
04CHDB138	126.6	44.9	148.8	10.6	23	0.216	353.1	253.4	50.6	0.375	0.089	4.9	13.0	110.0	100.25	7.91	11.17	7322	1020	501
04CHDB139	80.0	41.8	22.8	3.3	23	0.418	438.2	276.5	39.3	0.396	0.044	9.9	116.1	6.2	957.39	6.09	48.73	445	661	372
<b>Multiniveaux</b>																				
04CH3R-45	39.2	14.4	306.7	7.8	200	0.587	226.2	383.3	7.7	0.468	0.044	2.9	5.3	290.0	276.43	3.02	17.02	1459	1015	157
04CH3R-55	57.9	18.4	207.7	9.3	120	0.345	202.4	390.3	10.3	0.407	0.044	2.9	4.4	190.0	339.43	4.15	22.84	2006	885	220
04CH3R-70	62.2	19.9	257.5	9.6	240	0.620	248.9	336.5	8.7	0.407	0.044	3.0	7.6	310.0	370.04	3.14	22.35	2321	1000	237
04CH4R-11	79.2	11.5	4.0	6.1	35	0.174	262.3	5.4	31.9	0.097	0.044	6.1	832.5	8.8	966.10	7.18	158.11	280	408	245
04CH4R-15.9	62.0	10.3	5.1	4.1	3.8	0.151	203.4	26.3	21.6	0.098	0.044	5.9	626.0	4.4	762.98	6.77	111.90	488	323	197
04CH4R-25.4	55.8	10.4	6.4	4.1	6.3	0.126	240.0	13.8	35.7	0.078	0.044	5.5	398.2	6.9	459.89	8.15	66.39	559	313	182
04CH5R-33.5	118.1	11.5	108.7	17.8	70	0.408	188.8	411.6	7.5	0.371	0.044	2.8	5.1	96.0	498.69	3.49	37.38	5989	862	342
04CH5R-46.3	128.8	12.7	108.9	18.5	70	0.437	176.1	364.0	6.1	0.370	0.044	2.7	5.8	95.0	493.57	3.12	42.32	7339	824	374
04CH6R-52.5	12.9	2.5	6.1	2.1	21	0.000	15.9	27.5	57.0	0.106	0.487	3.7	191.1	3.9	24.33	15.30	22.89	184	90	43
04CH6R-65.2	13.6	2.6	6.0	2.2	21	0.000	15.9	19.9	65.2	0.085	0.974	3.6	214.5	4.5	45.65	15.37	25.91	175	83	45
04CH10R-25	64.0	27.5	15.0	1.3	27	0.226	250.3	83.1	22.4	0.096	0.177	5.7	123.7	16.0	56.91	6.20	62.50	147	480	273
04CH10R-46.6	62.4	27.5	19.9	2.0	26	0.362	273.4	70.5	16.8	0.172	0.044	5.9	194.0	18.0	154.67	15.89	46.77	240	481	269
04CH11R-33	40.0	23.7	42.9	4.1	29	0.627	285.5	18.1	10.3	0.193	0.354	4.5	93.8	31.0	143.97	3.26	39.61	718	391	197
04CH11R-52	39.8	24.6	48.9	4.5	46	0.600	273.6	25.8	10.0	0.173	0.177	4.4	129.2	44.0	76.58	3.27	38.02	743	418	200
04CH12R-22	75.6	37.7	7.9	3.2	27	0.412	319.5	64.2	20.3	0.170	0.044	6.6	94.4	12.0	113.17	4.92	8.80	1206	561	344
04CH12R-50.9	58.3	30.9	15.8	3.1	17	0.617	318.4	31.4	13.2	0.172	0.133	5.8	191.3	10.0	59.83	259.70	11.59	1040	475	273
04CH13R-20.5	56.0	23.3	26.9	2.3	23	0.537	285.1	42.1	12.2	0.231	0.044	6.6	80.1	12.0	293.23	3.66	13.88	836	432	236
04CH13R-31.8	63.6	26.1	28.9	2.5	35	0.527	296.5	41.5	13.5	0.211	0.044	6.7	87.6	17.0	305.97	3.87	17.60	942	497	267
04CH13R-55.8	47.6	21.4	41.9	2.3	25	0.609	285.5	42.9	10.7	0.213	0.044	6.2	64.8	15.0	205.67	3.34	11.71	733	401	207
04CH14R-29.5	30.7	17.6	18.6	3.4	3.8	0.758	213.9	44.2	4.7	0.233	0.044	5.2	58.9	15.0	122.07	2.14	10.59	818	260	149
04CH14R-35	31.7	17.9	17.2	3.4	3.8	0.524	214.7	44.0	6.9	0.233	0.089	5.3	70.4	16.0	191.20	2.92	10.43	761	264	153
04CH14R-85.5	29.8	17.0	24.9	3.4	8.2	0.609	202.5	48.7	5.3	0.292	0.044	5.1	50.5	21.0	112.53	2.46	10.73	909	261	145

Tableau F5: Indice de saturation (SI)

Ech_ID	Anhydrite	Anorthite	Aragonite	Barite	Calcite	Ca-Montmorillonite	Celestite	CO2(g)	Dolomite	Fe(OH)3(a)	FeS(pppt)	Fluorite	GibbSite
04CHDB002	-2.29	-5.31	0.09	0.75	0.25	0.42	-2.04	-2.26	0.32	0.66	-0.11	-2.12	0.17
04CHDB003	-2.16	-5.12	0.10	0.38	0.25	0.67	-2.11	-2.29	0.34	0.93	-0.65	-1.95	0.09
04CHDB004	-1.44	-5.86	-0.13	0.54	0.02	0.91	-0.97	-1.58	-0.21	0.42	-0.40	-1.07	0.17
04CHDB005	-4.88	-5.97	0.17	-1.01	0.32	-0.05	-4.43	-2.18	1.04	-0.03	-0.68	-2.02	-0.34
04CHDB006	-2.32	-5.68	-0.25	0.24	-0.10	0.18	-2.34	-2.30	-0.64	0.25	-0.37	-2.29	0.08
04CHDB007	-2.53	-3.85	-0.52	0.99	-0.37	3.31	-2.79	-1.75	-1.42	0.02	-0.59	-2.26	1.38
04CHDB008	-1.64	-5.92	-0.22	0.92	-0.07	0.86	-2.11	-1.57	-0.41	-0.01	-0.48	-2.12	0.18
04CHDB010	-0.93	-2.28	-0.02	0.02	0.14	3.74	-0.32	-2.27	-0.70	-0.30	-0.43	-1.16	2.04
04CHDB011	-3.29	-6.59	-2.72	0.04	-2.56	1.37	-3.49	-1.98	-5.63	0.75	-3.73	-3.46	1.49
04CHDB012	-2.24	-5.47	-0.21	0.64	-0.05	0.18	-1.74	-2.45	-0.37	0.19	-0.38	-2.51	0.24
04CHDB013	-2.43	-6.54	-0.20	-0.48	-0.05	-0.57	-3.51	-1.84	-0.32	0.25	-4.30	-3.01	0.23
04CHDB014	-2.42	-6.62	-0.21	0.23	-0.06	-0.73	-2.82	-2.09	-0.34	0.25	-0.61	-2.58	-0.29
04CHDB015	nd	-6.44	0.22	nd	0.37	-1.49	nd	-2.74	0.96	0.44	-0.38	-2.30	-0.73
04CHDB016	nd	-5.60	-0.19	nd	-0.04	1.26	nd	-1.30	-0.36	-1.73	-0.70	-2.39	0.57
04CHDB019	-1.66	-5.18	0.05	0.16	0.21	0.10	-1.07	-2.62	0.18	-0.38	-0.17	-2.39	0.24
04CHDB020	-1.50	-7.01	-0.09	0.46	0.07	-1.15	-1.83	-1.84	-0.47	-2.24	-0.85	-2.13	-0.47
04CHDB022	-1.99	-5.73	0.05	1.16	0.20	0.26	-2.10	-2.14	0.13	-4.78	-0.39	-2.11	-0.05
04CHDB023	-2.05	-5.45	-0.01	0.11	0.14	-0.40	-0.96	-2.90	0.34	-0.42	-0.10	-1.26	-0.22
04CHDB024	-1.95	-5.39	-0.17	0.31	-0.01	0.92	-2.30	-1.91	-0.67	0.40	-2.02	-2.69	0.52
04CHDB026	-1.95	-5.49	-0.25	0.73	-0.09	0.95	-1.92	-1.92	-0.46	-1.18	1.20	-1.68	0.46
04CHDB027	-1.70	-5.86	0.01	0.70	0.17	0.32	-2.53	-1.69	0.15	0.28	-0.64	-2.46	0.14
04CHDB028	-2.48	-6.19	0.08	0.48	0.23	-0.27	-2.01	-2.04	0.49	-0.02	-0.23	-2.15	-0.29
04CHDB029	-2.13	-4.98	-0.12	0.45	0.04	0.59	-2.87	-2.57	-0.21	0.78	-3.53	-2.90	0.31
04CHDB030	-2.37	-5.97	-0.02	0.16	0.13	-0.57	-2.12	-2.43	0.10	-0.84	1.32	-1.92	-0.21
04CHDB031	-2.32	-6.05	0.02	0.25	0.17	-1.46	-2.33	-3.06	-0.14	0.68	-0.36	-2.57	-0.46
04CHDB032	-2.23	-6.31	-0.20	-0.08	-0.05	-0.41	-2.49	-1.86	-0.28	-0.33	-0.97	-2.17	0.25
04CHDB033	-1.90	-6.01	-0.26	0.81	-0.10	0.13	-2.53	-2.16	-0.48	0.48	-1.60	-2.84	0.09
04CHDB034	-2.70	-5.77	-0.07	0.18	0.09	-0.07	-2.48	-2.38	0.04	0.57	-0.50	-2.34	0.05
04CHDB035	nd	-5.99	0.09	nd	0.25	-0.60	nd	-2.40	-0.62	0.46	-0.38	-2.33	-0.19
04CHDB036	-0.92	-7.10	-0.09	0.22	0.06	-0.67	-0.84	-1.45	-0.30	-0.17	-1.20	-1.93	-0.24
04CHDB038	-1.17	-4.67	0.39	0.97	0.54	0.88	-1.10	-2.31	0.70	-1.46	1.08	-1.83	0.18
04CHDB039	nd	-4.93	-0.01	nd	0.14	1.43	nd	-1.87	0.06	0.01	-0.61	-2.39	0.51
04CHDB040	nd	-5.75	-0.33	nd	-0.17	0.58	nd	-1.83	-0.65	0.93	-3.00	-2.46	0.48
04CHDB041	-2.72	-6.32	-0.06	0.18	0.10	-0.80	-2.51	-2.51	0.01	3.08	-0.72	-2.48	-0.40
04CHDB042	-1.30	-4.71	0.33	0.62	0.48	1.19	-1.82	-2.10	0.47	-0.66	0.01	-2.60	0.26
04CHDB043	-1.72	-5.57	-0.04	0.83	0.12	0.36	-0.91	-2.31	0.18	-2.59	-0.67	-1.68	-0.07
04CHDB044	-1.78	-6.95	0.37	0.39	0.52	-1.75	-2.46	-2.13	0.66	-1.21	-0.25	-3.15	-0.84
04CHDB046	-2.26	-6.41	0.17	0.25	0.32	-1.36	-2.32	-2.69	0.41	-0.23	0.17	-2.53	-0.56
04CHDB047	-1.64	-5.92	0.30	0.98	0.46	-0.45	-2.33	-2.08	0.53	3.60	0.15	-2.71	-0.13
04CHDB048	-1.98	-6.29	-0.34	0.31	-0.18	0.53	-2.76	-1.48	-0.67	-0.42	-2.91	-3.17	0.31
04CHDB049	-2.81	-5.86	0.14	0.24	0.29	-1.29	-2.67	-3.16	0.40	-0.72	-0.93	-2.83	-0.66
04CHDB050	-2.89	-6.75	-1.73	-0.07	-1.57	0.66	-3.17	-1.85	-3.65	-0.84	-2.95	-3.31	0.81
04CHDB051	-1.65	-6.34	0.18	0.20	0.34	-1.31	-1.29	-2.61	0.43	-1.18	0.20	-1.88	-0.58
04CHDB052	-2.93	-7.08	-1.25	-0.72	-1.09	-0.14	-3.41	-2.01	-2.66	-1.63	-4.10	-3.82	0.14
04CHDB053	-2.49	-5.95	0.09	0.78	0.24	-0.91	-1.76	-2.88	0.48	1.10	-0.05	-1.97	-0.43
04CHDB054	-1.80	-5.24	0.33	0.80	0.48	0.36	-1.55	-2.30	0.68	2.75	-4.57	-1.69	-0.01
04CHDB055	-2.10	-6.63	-0.02	0.49	0.13	-0.98	-0.92	-2.36	0.11	-0.78	-1.82	-1.79	-0.47

Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech ID	Anhydrite	Anorthite	Aragonite	Barite	Calcite	Ca-Montmorillonite	Celestite	CO2(g)	Dolomite	Fe(OH)3(a)	FeS(ppt)	Fluorite	GibbSite
04CHDB056	-2.13	-5.26	0.54	1.00	0.69	-0.26	-2.05	-2.62	1.29	-0.24	0.40	-2.26	-0.33
04CHDB057	-1.87	-5.14	-0.01	0.24	0.14	0.25	-0.57	-2.65	0.13	0.85	-0.26	-0.96	0.07
04CHDB058	-2.68	-6.28	0.30	0.40	0.46	-2.24	-2.21	-3.26	0.92	2.33	0.42	-2.25	-0.80
04CHDB059	-2.00	-6.22	-0.03	0.48	0.13	-0.67	-1.93	-2.35	0.19	1.63	-0.21	-2.31	-0.33
04CHDB060	-2.80	-6.18	-0.11	1.91	0.05	-0.28	-1.59	-2.24	1.19	0.48	-0.35	-3.74	-0.12
04CHDB061	-1.76	-4.51	-0.27	0.80	-0.12	2.00	-2.01	-1.83	-0.45	0.06	-0.96	-2.53	0.96
04CHDB062	-0.54	-4.84	-0.34	0.57	-0.19	1.17	-0.47	-2.23	-2.25	0.80	-1.55	-2.34	0.86
04CHDB063	-1.60	-5.05	0.23	0.30	0.38	1.09	-2.43	-1.98	0.49	1.34	-0.29	-3.49	0.15
04CHDB064	-2.09	-6.14	0.28	0.45	0.43	-1.23	-1.90	-2.61	0.87	1.63	-0.24	-2.73	-0.76
04CHDB065	-2.16	-6.21	-0.09	0.25	0.06	-0.24	-2.61	-1.93	-0.06	0.85	-2.04	-3.05	-0.10
04CHDB066	-1.90	-6.56	0.51	0.71	0.66	-1.73	-2.07	-2.41	1.16	1.00	-1.38	-2.51	-0.75
04CHDB067	-1.84	-7.88	-0.18	0.33	-0.02	-1.78	-2.28	-1.58	-0.29	0.58	-3.73	-4.16	-0.62
04CHDB069	-2.23	-5.72	0.01	0.41	0.17	-0.40	-2.17	-2.62	0.08	0.86	-0.02	-2.77	-0.19
04CHDB070	-2.11	-4.77	-0.11	0.21	0.05	1.53	-2.91	-1.86	-0.19	0.30	-1.91	-3.58	0.79
04CHDB071	-2.31	-6.73	-0.24	0.31	-0.08	-0.85	-2.22	-2.14	-0.27	-0.30	-0.32	-2.72	-0.36
04CHDB072	-1.66	-5.87	-0.10	0.78	0.05	0.51	-1.70	-1.82	-0.15	0.60	-0.01	-2.36	0.01
04CHDB073	-2.31	-3.57	-0.07	0.38	0.08	2.32	-2.21	-2.38	0.01	0.76	-0.28	-2.60	1.10
04CHDB077	-1.70	-6.34	-0.02	0.67	0.14	-0.45	-0.37	-2.04	-0.10	0.47	-1.05	-2.01	-0.26
04CHDB078	-2.00	-7.22	-0.18	0.10	-0.03	-0.92	-2.88	-1.56	-0.28	0.52	-4.48	-3.58	-0.31
04CHDB079	-1.84	-6.09	0.06	0.63	0.22	-0.33	-2.33	-2.04	0.18	0.68	-0.22	-2.77	-0.18
04CHDB080	-2.11	-6.41	-0.31	-0.07	-0.15	-0.04	-2.94	-1.64	-0.65	0.26	-3.89	-4.19	0.16
04CHDB081	-2.10	-5.82	0.25	0.38	0.41	-0.47	-2.52	-2.37	0.51	0.52	-0.16	-3.27	-0.33
04CHDB082	-2.17	-6.24	-0.20	0.26	-0.05	-0.27	-2.31	-2.08	-0.29	0.05	-0.88	-3.05	-0.09
04CHDB083	-1.76	-7.38	-0.14	0.74	0.02	-1.76	-0.46	-2.18	-0.03	0.99	-1.25	-1.66	-0.72
04CHDB084	-1.50	-6.07	0.14	0.60	0.29	0.05	-1.90	-1.87	0.29	0.61	-0.35	-2.49	-0.21
04CHDB085	-1.98	-4.50	-0.13	0.72	0.03	2.05	-2.98	-1.60	-0.22	0.54	-3.15	-2.91	1.12
04CHDB086	-2.08	-6.32	0.15	0.63	0.31	-0.85	-2.61	-2.20	0.44	0.41	-0.42	-3.02	-0.28
04CHDB087	-1.96	-5.37	0.10	0.74	0.25	0.39	-2.44	-2.37	0.03	-0.43	-0.29	-2.57	0.04
04CHDB088	-2.11	-6.37	0.14	0.05	0.30	-1.29	-2.58	-2.79	0.03	1.20	-4.27	-3.03	-0.77
04CHDB089	-1.67	-5.88	0.08	0.62	0.23	0.19	-2.35	-1.88	0.06	-0.15	-0.37	-1.91	-0.05
04CHDB090	-1.81	-6.50	0.01	0.49	0.17	-0.86	-1.28	-2.16	-0.03	0.63	-0.29	-1.27	-0.51
04CHDB091	-1.44	-6.13	0.00	0.52	0.16	0.23	-0.57	-1.68	0.13	1.09	-1.77	-1.67	0.07
04CHDB092	-1.53	-6.50	-0.17	0.45	-0.01	-0.18	-1.92	-1.68	-0.34	0.19	-3.03	-2.69	-0.02
04CHDB093	-1.70	-5.93	-0.02	0.84	0.13	-0.43	-0.20	-2.50	0.24	0.32	-0.32	-1.44	-0.21
04CHDB095	-1.60	-6.77	-0.30	0.98	-0.15	-0.46	-2.35	-1.77	-0.65	0.22	-1.43	-1.32	-0.05
04CHDB096	-1.88	-7.23	-0.34	0.18	-0.18	-1.82	-1.46	-2.40	-0.59	0.92	-0.47	-1.79	-0.41
04CHDB098	-1.52	-6.09	-0.21	0.88	-0.06	0.30	-1.60	-1.81	-0.54	-0.18	-0.47	-2.29	0.12
04CHDB099	-2.01	-6.50	-0.47	0.42	-0.32	-0.62	-1.82	-2.37	-1.11	-0.13	-1.03	-2.30	-0.09
04CHDB100	-3.04	-9.10	-3.11	0.48	-2.95	-0.52	-2.89	-1.79	-6.47	0.56	-2.68	-3.23	0.23
04CHDB101	-2.03	nd	-0.64	0.62	-0.48	nd	-1.99	-2.58	-1.67	1.11	-1.27	-2.50	nd
04CHDB102	-0.99	nd	-0.02	-0.02	0.13	nd	-0.62	-2.55	-0.33	0.79	-0.14	-1.64	nd
04CHDB103	-1.98	-4.14	-0.14	0.76	0.01	2.24	-2.43	-2.02	-0.21	0.83	-0.38	-2.55	0.88
04CHDB104	-2.32	-4.66	-0.36	0.09	-0.20	1.80	-2.79	-2.16	-0.81	0.84	-3.12	-2.70	0.79
04CHDB105	-1.72	-5.03	-0.18	0.11	-0.03	0.88	-1.46	-2.30	-0.75	0.52	-0.30	-2.05	0.46
04CHDB107	-4.02	-6.64	0.23	1.00	0.38	-1.74	-3.06	-2.58	1.32	-0.58	0.81	-2.24	-0.65
04CHDB108	-2.19	-6.23	-0.27	-0.02	-0.12	-0.76	-1.79	-2.46	-0.44	0.40	-0.57	-1.80	0.03
04CHDB109	-1.34	-7.02	-0.08	0.44	0.08	-1.18	-1.03	-2.00	-0.43	0.21	-0.47	-2.01	-0.46

Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech_ID	Anhydrite	Anorthite	Aragonite	Barite	Calcite	Ca-Montmorillonite	Celestite	CO2(g)	Dolomite	Fe(OH)3(a)	FeS(ppt)	Fluorite	GibbSite
04CHDB110	-2.01	-5.39	-0.33	0.90	-0.17	1.42	-2.46	-1.65	-0.60	0.23	-0.42	-2.99	0.56
04CHDB111	-2.97	-6.20	-0.62	0.23	-0.46	-0.08	-2.78	-2.44	-1.22	-1.00	-0.80	-2.49	-0.07
04CHDB112	-2.23	-6.07	-0.26	0.22	-0.10	0.00	-3.08	-1.89	-0.43	-0.45	-1.04	-2.04	0.21
04CHDB113	-2.01	-4.71	-0.17	1.04	-0.02	1.90	-2.44	-1.54	-0.26	-0.62	-1.15	-2.74	1.08
04CHDB114	-3.69	-10.13	-4.33	0.50	-4.17	-0.49	-3.97	-1.71	-8.74	-3.27	-5.11	-4.31	0.40
04CHDB115	-1.42	-6.10	-0.73	0.34	-0.57	0.40	-1.17	-2.05	-2.06	0.05	-1.17	-2.58	-1.64
04CHDB116	-2.91	-5.51	0.45	1.15	0.61	-0.87	-2.39	-2.80	1.23	3.69	-0.96	-1.91	-0.32
04CHDB117	-2.16	-4.76	0.02	0.36	0.17	1.22	-2.03	-2.29	0.08	0.93	-0.32	-2.28	0.39
04CHDB118	-2.10	-6.62	-0.05	0.63	0.10	-0.77	-2.04	-2.14	0.01	0.44	-0.54	-2.58	-0.32
04CHDB119	-2.13	-6.25	-0.10	0.34	0.06	-0.36	-2.09	-2.21	-0.03	-0.30	-0.69	-2.55	-0.12
04CHDB120	-1.97	-6.35	0.01	0.40	0.17	-0.31	-2.58	-1.95	0.11	2.92	-0.25	-2.49	-0.26
04CHDB121	-2.35	-5.47	-0.96	-0.07	-0.81	1.18	-3.08	-1.89	-2.15	0.56	-1.92	-3.77	1.00
04CHDB122	-2.90	-4.00	-0.42	-0.14	-0.28	1.24	-3.33	-2.53	-0.81	-0.63	-2.51	-3.38	0.66
04CHDB123	-3.67	-7.75	-3.19	0.31	-3.04	1.27	-3.98	-1.56	-6.34	-1.86	-1.76	-4.16	0.86
04CHDB124	-2.02	-7.63	-0.18	0.43	-0.02	-1.56	-2.65	-1.87	-0.28	-0.01	-1.30	-2.81	-0.75
04CHDB125	-1.39	-5.36	0.06	1.00	0.21	0.39	-0.55	-2.38	0.09	0.40	0.90	-1.32	0.05
04CHDB126	-1.90	-5.55	0.03	0.30	0.19	-0.52	-1.15	-2.67	0.32	-6.51	-0.98	-0.24	0.00
04CHDB127	-1.61	-5.52	-0.11	0.74	0.05	1.03	-1.60	-1.76	-0.23	-0.45	-0.51	-2.70	0.35
04CHDB128	-2.08	-6.29	-0.04	0.77	0.11	-0.45	-1.77	-2.24	0.08	-0.01	-0.29	-2.00	-0.27
04CHDB129	-1.92	-5.95	-0.22	0.20	-0.07	-0.32	-0.98	-2.53	-0.18	-0.03	-0.32	-1.90	-0.09
04CHDB131	-1.49	-7.05	-0.24	0.24	-0.08	-0.42	-1.03	-1.52	-0.54	-0.44	-0.58	-1.77	-0.29
04CHDB132	-3.01	-3.34	-0.94	-0.18	-0.79	4.19	-3.96	-1.58	-2.39	-1.16	-0.53	-3.63	1.99
04CHDB133	-2.04	-5.48	-0.25	0.75	-0.10	1.29	-2.16	-1.75	-0.31	-0.74	-0.69	-2.40	0.31
04CHDB134	-2.19	-7.22	-0.29	0.33	-0.14	-1.38	-2.17	-1.93	-0.67	1.08	-1.34	-2.82	-0.52
04CHDB135	-2.35	-6.71	-0.40	-0.41	-0.24	-0.45	-2.15	-2.07	-0.57	-0.73	-1.92	-2.48	-0.18
04CHDB136	-1.60	-6.20	-0.08	0.67	0.08	0.34	-2.19	-1.53	-0.08	-0.17	-0.50	-2.50	-0.02
04CHDB137	-3.77	-6.28	0.10	-0.13	0.25	-0.32	-3.30	-2.03	0.78	0.11	0.11	-2.03	-0.38
04CHDB140	-1.18	-4.21	0.29	0.74	0.45	2.38	-1.77	-1.60	0.46	0.86	-0.43	-2.51	0.76
04CHDB141	-2.50	-4.58	-0.25	-0.07	-0.10	1.76	-3.09	-2.07	-0.44	-1.51	-2.08	-3.35	0.78
04CHDB142	-2.01	-4.74	-0.05	1.24	0.11	1.67	-1.75	-1.90	0.08	-0.48	-0.81	-1.89	0.62
04CHDB143	-1.62	-4.90	0.06	0.08	0.21	0.62	-0.78	-2.29	-0.37	0.00	-0.48	-1.84	0.24
04CHDB144	nd	-4.58	0.09	nd	0.24	1.23	nd	-2.44	0.52	0.15	-0.18	-2.43	0.45
04CHDB145	-1.85	-6.59	-0.33	0.70	-0.17	-0.03	-2.02	-1.70	-0.62	-0.25	-2.32	-2.35	0.04
04CHDB146	-1.44	-11.54	-0.16	0.44	-0.01	-9.47	-1.42	-1.79	-0.65	-0.28	-0.23	-2.20	-0.01
04CHDB147	-1.58	-4.39	0.03	0.11	0.19	1.33	-0.68	-2.39	0.44	0.49	-0.40	-0.75	0.57
04CHDB148	-3.51	-8.93	-2.05	-1.23	-1.89	-0.86	-3.41	-1.43	-4.16	-0.56	-4.00	-3.53	-0.36
04CHDB149	-1.82	-4.84	-0.05	0.45	0.11	2.03	-1.83	-1.26	-0.31	0.33	-0.12	-1.89	0.79
04CHDB150	-2.23	-7.20	-0.25	0.11	-0.10	-1.00	-2.65	-1.76	-0.34	0.02	-1.05	-3.31	-0.42
04CHDB151	-2.55	-6.60	-0.50	-0.08	-0.34	-0.94	-2.64	-2.57	-1.21	0.86	-4.43	-2.69	-0.22
04CHDB152	-2.28	-8.12	-0.40	0.02	-0.24	-1.89	-2.61	-1.57	-0.74	-1.21	-3.77	-2.64	-0.56
04CHML200	-2.24	-5.26	0.01	0.57	0.17	0.85	-1.70	-2.10	0.43	3.06	-2.66	-1.88	0.22
<b>Rejetés</b>													
04CHDB017	-1.62	-6.53	-0.43	0.36	-0.28	-0.58	-0.13	-2.44	-0.54	0.05	-0.17	-1.03	-0.38
04CHDB037	-1.28	-5.62	-0.30	1.04	-0.15	0.97	-2.11	-1.68	-0.47	0.54	-4.00	-3.12	0.55
04CHDB068	-1.62	-5.45	0.17	0.34	0.33	0.20	-1.07	-2.16	0.39	-1.91	-1.18	-1.62	0.18
04CHDB075	-1.46	-6.35	-0.06	0.89	0.10	-0.55	-1.73	-1.96	-0.08	0.10	-3.07	-3.28	0.07

Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech ID	Anhydrite	Anorthite	Aragonite	Barite	Calcite	Ca-Montmorillonite	Celestite	CO2(g)	Dolomite	Fe(OH)3(a)	FeS(ppt)	Fluorite	GibbSite
<b>Rejetés</b>													
04CHDB076	-1.95	-6.88	0.05	-0.26	0.21	-2.05	-0.50	-2.75	0.22	0.41	-0.24	-1.19	-0.78
04CHDB094	-1.93	-5.54	0.14	0.32	0.30	-0.03	-2.45	-2.34	0.36	0.59	-0.33	-2.32	-0.12
04CHDB097	-2.14	-6.43	-0.24	0.19	-0.09	-0.52	-1.02	-2.19	-0.17	0.17	-0.38	-2.57	-0.32
04CHDB138	-1.22	-5.47	-0.16	0.16	0.00	0.87	-0.50	-1.66	-0.32	0.07	-1.65	-1.48	0.51
04CHDB139	-1.34	-7.31	-0.03	1.19	0.12	-1.07	-1.64	-1.77	0.10	2.67	-0.35	-1.60	-0.83
<b>Multi-niveaux</b>													
04CH3R-45	-1.55	-5.65	-0.24	-0.05	-0.08	-0.34	-1.02	-2.49	-0.47	-0.13	-0.38	-1.80	0.29
04CH3R-55	-1.36	-5.89	-0.28	-0.11	-0.13	-0.48	-0.86	-2.35	-0.62	0.50	-0.50	-1.74	0.25
04CH3R-70	-1.41	-5.80	-0.02	0.06	0.14	-0.60	-0.88	-2.44	-0.11	0.80	-0.27	-1.71	0.13
04CH4R-11	-2.93	-4.54	-0.29	0.43	-0.13	1.89	-3.43	-1.84	-0.95	0.50	-0.45	-2.75	0.81
04CH4R-15.9	-2.32	-3.74	-0.44	1.06	-0.28	2.95	-2.47	-2.04	-1.22	0.84	-0.44	-2.80	1.26
04CH4R-25.4	-2.64	-5.05	-0.56	0.60	-0.40	1.78	-2.68	-1.83	-1.42	-0.01	-0.86	-3.03	0.82
04CH5R-33.5	-1.02	-4.32	0.10	0.00	0.25	0.94	-0.36	-2.51	-0.40	0.86	-0.19	-1.49	0.83
04CH5R-46.3	-1.04	-3.64	0.17	0.00	0.32	1.54	-0.32	-2.60	-0.25	1.10	-0.12	-1.45	1.10
04CH6R-52.5	-2.87	-10.89	-3.65	0.62	-3.49	-2.29	-2.76	-1.58	-7.53	-0.36	-4.56	-3.37	-0.37
04CH6R-65.2	-2.98	-10.70	-3.67	0.50	-3.51	-2.15	-2.93	-1.50	-7.55	-0.52	-4.39	-3.56	-0.26
04CH10R-25	-1.86	-5.34	-0.31	0.82	-0.15	1.08	-2.54	-2.04	-0.58	1.28	-1.49	-2.83	0.45
04CH10R-46.6	-1.95	-4.64	-0.11	0.92	0.04	1.47	-2.41	-2.15	-0.14	0.07	-0.33	-2.35	0.60
04CH11R-33	-2.70	-6.54	-0.04	0.07	0.11	-1.04	-2.49	-2.38	0.09	3.15	-0.56	-2.41	-0.34
04CH11R-52	-2.56	-6.58	-0.07	0.35	0.09	-1.14	-2.33	-2.39	0.07	2.86	-0.85	-2.51	-0.36
04CH12R-22	-1.92	-6.01	0.01	0.56	0.16	-0.03	-1.76	-2.08	0.13	2.26	-1.01	-2.29	-0.14
04CH12R-50.9	-2.32	-5.94	0.10	0.59	0.25	-0.28	-2.11	-2.27	0.33	-1.32	0.82	-2.37	-0.18
04CH13R-20.5	-2.20	-4.99	0.03	0.33	0.18	0.86	-2.07	-2.29	0.11	1.07	-0.36	-2.13	0.24
04CH13R-31.8	-2.17	-5.43	0.06	0.36	0.21	0.44	-2.04	-2.26	0.15	1.28	-0.38	-2.15	0.03
04CH13R-55.8	-2.26	-6.55	0.01	0.27	0.17	-0.94	-2.11	-2.36	0.09	1.63	-0.43	-2.26	-0.51
04CH14R-29.5	-2.39	-5.92	-0.04	0.28	0.12	-0.66	-2.01	-2.71	0.10	1.18	-0.36	-2.34	-0.28
04CH14R-35	-2.38	-5.66	-0.18	0.34	-0.03	-0.09	-2.05	-2.54	-0.18	0.85	-0.36	-2.34	-0.02
04CH14R-85.5	-2.37	-6.33	-0.15	0.24	0.01	-1.04	-1.93	-2.65	-0.10	0.79	-0.49	-2.17	-0.41

Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech ID	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Hydroxyapatite	K-feldspar	K-mica	Pyrite	Quartz	Sliderite	SiO2(a)	Strontianite	Sulfur
04CHDB002	5.95	-2.04	-8.09	13.83	-2.44	-0.98	4.89	21.88	0.51	-0.72	-0.87	-0.91	8.86
04CHDB003	6.26	-1.90	-8.17	14.45	-2.90	-0.88	4.83	19.88	0.62	-0.27	-0.75	-1.12	7.43
04CHDB004	5.72	-1.18	-6.47	13.37	-5.81	-0.73	5.12	19.70	0.69	0.33	-0.69	-0.92	6.99
04CHDB005	5.25	-4.62	-8.21	12.43	0.39	-0.03	4.83	17.61	0.71	-0.05	-0.67	-0.64	5.16
04CHDB006	5.59	-2.06	-9.02	13.11	-3.87	-1.31	4.39	18.52	0.51	-0.10	-0.86	-1.54	5.82
04CHDB007	5.33	-2.27	-8.52	12.59	-6.16	0.03	8.32	19.15	0.58	-0.04	-0.79	-2.04	6.63
04CHDB008	5.31	-1.39	-8.01	12.56	-3.73	-1.01	4.88	18.94	0.67	0.26	-0.71	-1.95	6.32
04CHDB010	4.97	-0.67	-6.44	11.88	-5.83	0.62	10.22	17.33	0.24	-0.05	-1.14	-0.67	4.61
04CHDB011	6.07	-3.03	-7.85	14.07	-13.78	-2.71	5.79	23.94	0.07	-3.48	-1.30	-4.19	14.56
04CHDB012	5.49	-1.98	-7.78	12.92	-5.10	-1.56	4.44	17.83	0.41	-0.06	-0.97	-0.97	5.10
04CHDB013	5.51	-2.17	-7.13	12.94	-7.90	-2.58	3.40	22.66	0.24	-3.61	-1.14	-2.54	13.80
04CHDB014	5.58	-2.16	-7.81	13.09	-3.78	-1.92	3.03	18.61	0.51	-0.08	-0.87	-1.88	6.13
04CHDB015	5.74	nd	-7.14	13.42	2.94	-0.79	3.28	16.60	0.53	0.24	-0.84	-0.62	3.86
04CHDB016	3.61	nd	-7.85	9.15	-3.89	-1.15	5.52	15.59	0.53	0.34	-0.84	-1.55	3.21
04CHDB019	4.90	-1.40	-5.48	11.72	-2.53	-0.70	5.31	15.71	0.37	0.25	-1.01	-0.62	2.74
04CHDB020	3.13	-1.24	-8.17	8.19	-6.91	-2.32	2.27	14.15	0.51	-0.17	-0.86	-1.69	1.95
04CHDB022	0.51	-1.73	-7.40	2.95	-2.29	-0.98	4.45	8.15	0.62	0.17	-0.76	-1.32	-4.58
04CHDB023	4.92	-1.80	-7.95	11.78	-3.26	-0.73	4.37	14.93	0.50	0.23	-0.87	-0.19	1.96
04CHDB024	5.67	-1.70	nd	13.28	-7.24	-1.56	4.99	20.67	0.46	-1.40	-0.92	-1.77	9.55
04CHDB026	4.09	-1.70	-7.19	10.10	-3.67	-0.28	6.16	18.40	0.51	0.44	-0.88	-1.48	4.05
04CHDB027	5.63	-1.45	-7.18	13.19	-5.98	-1.31	4.50	18.99	0.52	0.20	-0.85	-2.08	6.55
04CHDB028	5.29	-2.23	-8.51	12.51	-2.36	-1.00	3.95	17.27	0.62	0.50	-0.75	-0.71	4.39
04CHDB029	6.09	-1.87	-8.86	14.12	-6.00	-1.42	4.74	21.94	0.46	-3.25	-0.91	-2.12	12.36
04CHDB030	4.50	-2.12	-8.19	10.94	-3.70	-1.23	3.87	18.41	0.47	0.21	-0.89	-1.03	4.02
04CHDB031	6.02	-2.07	-9.41	13.97	-0.83	-1.87	2.74	17.63	0.36	-0.26	-1.01	-1.26	4.91
04CHDB032	4.98	-1.97	-8.17	11.88	-7.78	-1.70	4.32	20.78	0.27	-1.19	-1.11	-1.72	8.64
04CHDB033	5.75	-1.65	-8.07	13.42	-7.27	-1.66	4.04	20.16	0.51	-1.14	-0.87	-2.15	8.60
04CHDB034	5.83	-2.44	-7.41	13.59	-6.75	-1.05	4.56	18.57	0.47	-0.04	-0.92	-1.10	5.92
04CHDB035	5.76	nd	-9.12	13.45	-1.32	-1.59	3.55	18.58	0.46	-0.07	-0.92	-1.03	5.84
04CHDB036	5.13	-0.66	-8.23	12.18	-5.24	-2.03	3.00	19.11	0.52	-0.26	-0.86	-1.27	7.19
04CHDB038	3.86	-0.91	-7.40	9.65	-3.17	-0.41	5.48	18.97	0.61	-0.43	-0.76	-0.81	4.79
04CHDB039	5.32	nd	-7.78	12.57	-3.86	-0.95	5.60	18.30	0.59	0.10	-0.78	-1.88	5.81
04CHDB040	6.24	nd	-9.19	14.40	-4.82	-1.41	5.07	22.78	0.40	-2.33	-0.98	-2.41	12.66
04CHDB041	8.37	-2.46	-9.21	18.66	-2.60	-1.29	3.44	23.66	0.54	-0.34	-0.84	-1.10	11.24
04CHDB042	4.65	-1.04	-7.12	11.24	-2.33	-0.87	5.17	15.91	0.66	0.63	-0.72	-1.45	2.79
04CHDB043	2.71	-1.47	-7.93	7.36	-2.35	-0.85	4.54	12.56	0.65	-0.20	-0.73	-0.49	0.11
04CHDB044	4.15	-1.52	-8.05	10.24	-3.07	-1.68	2.18	14.81	0.54	0.41	-0.82	-1.59	2.00
04CHDB046	5.04	-2.00	-8.33	12.00	-1.06	-1.36	3.05	15.71	0.47	0.51	-0.91	-1.15	2.39
04CHDB047	8.91	-1.39	-6.26	19.76	-5.79	-1.42	3.85	24.21	0.46	0.81	-0.91	-1.64	10.96
04CHDB048	4.85	-1.73	-6.73	11.63	-8.93	-1.86	4.28	20.35	0.51	-2.01	-0.87	-2.38	10.11
04CHDB049	4.63	-2.56	-8.42	11.19	-0.09	-1.64	2.58	14.88	0.52	-0.77	-0.85	-0.99	2.75
04CHDB050	4.46	-2.64	-8.07	10.84	-12.47	-2.42	4.72	19.83	0.27	-2.52	-1.11	-3.27	9.67
04CHDB051	4.14	-1.39	-5.50	10.22	-1.21	-0.87	3.50	13.82	0.49	0.59	-0.88	-0.72	0.53
04CHDB052	3.66	-2.67	-8.98	9.26	-6.89	-2.41	3.40	19.14	0.45	-3.74	-0.93	-2.99	10.12
04CHDB053	6.38	-2.23	-6.32	14.68	-1.59	-0.96	3.70	17.95	0.51	0.32	-0.87	-0.44	4.86
04CHDB054	8.04	-1.54	-6.04	18.01	2.06	-0.53	4.96	26.76	0.60	-3.96	-0.78	-0.69	18.20
04CHDB055	4.49	-1.85	-10.52	10.90	-1.01	-1.39	3.18	17.25	0.55	-1.35	-0.84	-0.10	5.91

Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech_ID	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Hydroxyapatite	K-feldspar	K-mica	Pyrite	Quartz	Sliderite	SiO2(a)	Strontianite	Sulfur
04CHDB056	5.08	-1.88	-7.15	12.10	2.36	-0.42	4.45	18.63	0.61	-0.25	-0.77	-0.64	5.12
04CHDB057	6.19	-1.61	-7.91	14.31	-0.68	-0.79	4.88	18.40	0.51	0.07	-0.86	0.02	5.58
04CHDB058	7.66	-2.43	-7.61	17.26	1.17	-1.74	2.19	19.00	0.34	0.70	-1.03	-0.49	5.50
04CHDB059	6.96	-1.75	-6.81	15.86	-2.76	-1.58	3.29	20.48	0.53	0.24	-0.84	-1.22	7.60
04CHDB060	5.73	-2.55	-4.48	13.40	-2.60	0.03	5.32	16.90	0.52	0.70	-0.86	-0.15	4.08
04CHDB061	5.39	-1.51	-8.83	12.71	-6.49	-0.74	6.71	18.92	0.47	-0.28	-0.90	-1.78	6.80
04CHDB062	6.09	-0.28	-9.87	14.10	-6.22	-0.82	6.42	21.16	0.30	-1.31	-1.08	-1.53	9.58
04CHDB063	6.65	-1.34	-7.46	15.23	-2.42	-0.93	4.89	20.35	0.71	0.40	-0.66	-1.87	7.53
04CHDB064	7.04	-1.83	-8.37	16.03	-1.85	-1.44	2.59	19.56	0.61	0.22	-0.75	-0.81	6.80
04CHDB065	6.20	-1.91	-7.58	14.34	-5.81	-1.45	3.88	21.29	0.52	-1.37	-0.85	-1.80	10.26
04CHDB066	6.33	-1.64	-6.72	14.60	-4.84	-1.43	2.59	19.78	0.48	-0.80	-0.89	-0.92	8.08
04CHDB067	5.90	-1.59	-7.06	13.74	-6.76	-1.74	2.56	22.92	0.45	-2.86	-0.92	-1.88	13.56
04CHDB069	6.18	-1.97	-8.17	14.28	-2.15	-1.45	3.70	18.34	0.50	0.29	-0.87	-1.19	5.26
04CHDB070	5.61	-1.86	-8.45	13.15	-7.41	-1.48	5.63	20.24	0.45	-1.21	-0.93	-2.17	9.04
04CHDB071	5.03	-2.06	-7.69	11.99	-3.32	-1.46	3.34	17.04	0.52	0.23	-0.85	-1.41	4.27
04CHDB072	5.93	-1.40	-6.91	13.80	-2.96	-0.91	4.64	18.95	0.66	0.71	-0.71	-1.40	5.89
04CHDB073	6.08	-2.05	-7.95	14.10	-1.30	-0.15	7.58	18.67	0.44	0.17	-0.93	-1.24	5.86
04CHDB077	5.79	-1.45	-7.53	13.52	-3.69	-1.65	3.35	19.53	0.56	-0.47	-0.81	0.05	7.48
04CHDB078	5.85	-1.74	-7.70	13.62	-6.89	-1.98	2.92	23.56	0.49	-3.58	-0.88	-2.32	14.95
04CHDB079	6.03	-1.58	-7.59	14.00	-1.75	-1.36	3.80	18.95	0.54	0.40	-0.83	-1.69	6.11
04CHDB080	5.60	-1.86	-8.49	13.14	-3.64	-1.16	4.68	22.46	0.43	-3.09	-0.94	-2.40	13.27
04CHDB081	5.86	-1.84	-9.03	13.66	-3.64	-1.61	3.27	17.92	0.57	0.36	-0.80	-1.43	5.00
04CHDB082	5.38	-1.91	-7.77	12.69	-7.22	-1.72	3.63	18.52	0.51	-0.34	-0.87	-1.61	6.31
04CHDB083	6.30	-1.51	-6.60	14.54	-3.48	-1.87	2.22	20.42	0.50	-0.70	-0.88	-0.10	8.56
04CHDB084	5.92	-1.24	-7.35	13.77	-3.45	-1.43	3.67	19.20	0.67	0.37	-0.71	-1.52	6.44
04CHDB085	5.85	-1.73	-6.98	13.63	-7.99	-0.14	7.64	22.28	0.39	-2.29	-0.99	-2.39	12.32
04CHDB086	5.71	-1.82	-7.14	13.35	-5.27	-2.06	2.91	18.33	0.45	0.16	-0.93	-1.63	5.63
04CHDB087	4.84	-1.71	-7.60	11.60	-3.91	-1.39	4.20	16.50	0.59	0.13	-0.79	-1.63	3.64
04CHDB088	6.51	-1.85	-9.36	14.96	-4.77	-1.53	2.46	22.99	0.62	-4.03	-0.76	-1.59	14.15
04CHDB089	5.18	-1.42	-7.48	12.30	-3.65	-1.36	4.06	17.69	0.60	0.34	-0.77	-1.86	4.97
04CHDB090	6.00	-1.56	-7.70	13.94	-3.67	-1.43	3.09	18.61	0.59	0.31	-0.78	-0.72	5.85
04CHDB091	6.37	-1.18	-6.52	14.67	-5.58	-1.23	4.43	21.79	0.56	-0.92	-0.82	-0.39	10.42
04CHDB092	5.50	-1.27	-7.97	12.93	-7.80	-1.44	4.04	21.42	0.50	-2.26	-0.87	-1.82	11.35
04CHDB093	5.62	-1.44	-8.49	13.17	-2.93	-1.16	3.94	17.67	0.52	0.08	-0.86	0.21	4.87
04CHDB095	5.51	-1.34	-6.65	12.95	-7.91	-1.97	3.45	19.98	0.45	-0.75	-0.92	-2.31	8.27
04CHDB096	6.21	-1.63	-6.27	14.34	-4.40	-1.60	3.10	19.47	0.29	-0.12	-1.09	-1.17	6.81
04CHDB098	5.12	-1.26	-7.34	12.17	-5.55	-1.31	4.46	18.06	0.54	0.21	-0.83	-1.55	5.41
04CHDB099	5.15	-1.75	-8.86	12.23	-4.41	-1.67	3.68	18.25	0.42	-0.75	-0.96	-1.54	6.15
04CHDB100	5.86	-2.78	-8.64	13.65	-13.38	-2.95	3.04	22.63	0.38	-2.28	-1.00	-4.22	12.20
04CHDB101	6.39	-1.78	-9.26	14.72	nd	nd	nd	20.90	0.46	-1.17	-0.92	-1.85	9.04
04CHDB102	6.09	-0.73	-5.95	14.11	nd	nd	nd	18.80	0.52	0.09	-0.86	-0.92	5.82
04CHDB103	6.16	-1.73	-8.28	14.25	-4.17	-0.53	6.77	19.56	0.57	0.22	-0.80	-1.85	6.85
04CHDB104	6.11	-2.06	-9.01	14.15	-7.46	-0.84	6.27	22.45	0.52	-2.69	-0.86	-2.09	12.43
04CHDB105	5.83	-1.47	-8.21	13.60	-4.27	-1.00	5.44	18.76	0.46	0.07	-0.91	-1.18	5.95
04CHDB107	4.73	-3.76	-5.02	11.39	-1.06	-0.75	3.47	19.65	0.42	-0.51	-0.95	-0.08	5.73
04CHDB108	5.69	-1.93	-6.17	13.31	-7.19	-1.13	4.46	18.30	0.29	-0.19	-1.09	-1.13	5.73
04CHDB109	5.51	-1.08	-7.13	12.95	-6.66	-1.63	2.97	18.63	0.50	0.08	-0.88	-1.03	5.98



Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech ID	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Hydroxyapatite	K-feldspar	K-mica	Pyrite	Quartz	Sliderite	SiO2(a)	Strontianite	Sulfur
04CHDB110	5.53	-1.75	-8.90	12.99	-5.29	-1.23	5.42	18.95	0.58	0.38	-0.79	-2.04	6.26
04CHDB111	4.31	-2.71	-10.14	10.56	-3.84	-1.43	3.96	15.88	0.55	-0.47	-0.83	-1.70	3.58
04CHDB112	4.88	-1.98	-8.67	11.70	-7.80	-2.09	3.87	17.86	0.40	-0.38	-0.97	-2.37	5.82
04CHDB113	4.69	-1.75	-7.22	11.30	-5.98	-0.25	7.44	18.01	0.38	-0.25	-1.00	-1.86	6.04
04CHDB114	2.04	-3.43	-10.20	6.01	-16.76	-3.41	2.91	17.47	0.34	-4.65	-1.03	-5.86	9.47
04CHDB115	5.34	-1.16	-8.58	12.61	-8.27	-1.63	4.68	20.81	0.41	-2.20	-0.96	-1.74	10.27
04CHDB116	9.01	-2.66	-7.13	19.95	-0.55	-0.82	4.07	23.88	0.43	-0.47	-0.95	-0.28	11.74
04CHDB117	6.22	-1.90	-7.57	14.37	-1.92	-0.65	5.66	19.25	0.59	0.17	-0.79	-1.11	6.44
04CHDB118	5.71	-1.84	-7.39	13.34	-4.40	-1.54	3.35	18.78	0.52	0.02	-0.87	-1.26	6.17
04CHDB119	4.96	-1.87	-6.39	11.84	-5.45	-1.36	3.91	17.47	0.50	-0.20	-0.88	-1.31	5.00
04CHDB120	8.23	-1.71	-8.04	18.38	-5.51	-1.41	3.60	23.62	0.60	0.43	-0.78	-1.85	10.76
04CHDB121	5.92	-2.09	-8.58	13.77	-9.72	-2.16	5.37	21.21	0.25	-1.41	-1.12	-2.96	10.07
04CHDB122	5.01	-2.66	-10.36	11.99	-2.54	-1.45	5.45	17.83	0.38	-2.21	-0.94	-2.16	7.56
04CHDB123	3.54	-3.41	-10.01	9.02	-13.28	-2.23	5.02	16.80	0.47	-1.14	-0.89	-4.78	5.55
04CHDB124	5.30	-1.77	-8.18	12.54	-7.61	-2.22	1.80	19.05	0.58	-0.62	-0.79	-2.07	7.25
04CHDB125	5.68	-1.13	-7.61	13.28	-2.01	-0.94	4.69	21.99	0.58	-0.37	-0.80	-0.36	7.95
04CHDB126	-1.18	-1.64	-5.43	-0.42	-3.36	-0.58	4.94	14.11	0.34	-3.91	-1.03	-0.49	2.00
04CHDB127	4.83	-1.35	-8.00	11.59	-4.57	-0.67	5.55	17.54	0.60	0.23	-0.78	-1.36	4.91
04CHDB128	5.27	-1.83	-6.60	12.46	-1.50	-1.03	3.95	17.34	0.57	0.26	-0.82	-0.98	4.49
04CHDB129	5.26	-1.67	-6.14	12.45	-3.24	-1.19	4.15	17.05	0.48	0.03	-0.90	-0.54	4.25
04CHDB131	4.87	-1.23	-7.14	11.68	-8.39	-1.32	3.63	17.91	0.62	0.30	-0.76	-1.04	5.39
04CHDB132	4.20	-2.76	-7.20	10.35	-4.50	-0.57	8.94	16.61	0.45	0.21	-0.91	-3.16	4.08
04CHDB133	4.56	-1.78	-8.18	11.06	-4.08	-0.60	5.55	17.10	0.69	0.06	-0.68	-1.63	4.67
04CHDB134	6.48	-1.94	-6.66	14.90	-7.49	-1.97	2.52	21.21	0.48	-0.74	-0.88	-1.54	9.53
04CHDB135	4.54	-2.09	-8.50	11.01	-5.41	-1.74	3.42	18.11	0.54	-1.39	-0.85	-1.45	6.89
04CHDB136	5.17	-1.35	-5.91	12.28	-4.77	-1.44	4.06	18.22	0.64	0.40	-0.73	-1.92	5.66
04CHDB137	5.41	-3.51	-7.05	12.75	-0.54	-0.56	4.22	19.43	0.67	0.10	-0.71	-0.69	6.22
04CHDB140	6.16	-0.93	-6.58	14.26	-3.07	-0.42	6.62	20.04	0.69	0.47	-0.68	-1.55	7.36
04CHDB141	3.80	-2.24	-10.12	9.54	-7.45	-0.84	6.24	16.59	0.51	-1.53	-0.86	-2.10	5.56
04CHDB142	4.82	-1.76	-7.43	11.57	-3.39	-0.23	6.53	17.46	0.59	-0.11	-0.79	-1.04	5.15
04CHDB143	5.41	-1.37	-8.48	12.76	-5.55	-0.66	5.36	17.53	0.50	-0.03	-0.86	-0.38	5.00
04CHDB144	5.41	nd	-8.26	12.75	-3.12	-0.24	6.18	17.03	0.55	0.35	-0.83	-0.80	4.06
04CHDB145	5.02	-1.59	-8.29	11.97	-8.38	-1.72	3.88	19.93	0.52	-1.58	-0.86	-1.76	9.11
04CHDB146	5.00	-1.19	-8.51	11.92	-3.74	-9.44	-3.93	17.69	-2.04	0.46	-3.42	-1.39	4.77
04CHDB147	5.81	-1.32	-6.10	13.56	-2.99	-0.08	6.58	18.10	0.50	0.09	-0.87	-0.33	5.42
04CHDB148	4.81	-3.26	-6.35	11.56	-17.32	-2.08	2.74	21.01	0.62	-3.03	-0.75	-3.21	11.96
04CHDB149	5.71	-1.56	-6.10	13.36	-8.35	-0.78	6.34	21.30	0.59	0.23	-0.77	-1.33	8.38
04CHDB150	5.36	-1.98	-8.35	12.65	-8.11	-1.47	3.23	18.94	0.53	-0.30	-0.84	-1.93	6.91
04CHDB151	6.15	-2.30	-11.37	14.22	-2.61	-2.09	2.99	23.36	0.40	-4.26	-0.98	-1.85	14.66
04CHDB152	4.11	-2.03	-7.42	10.16	-8.89	-2.00	2.42	19.52	0.39	-2.93	-0.98	-1.98	10.20
04CHML200	8.35	-1.99	-7.80	18.64	-2.04	-0.34	5.63	25.92	0.61	-2.00	-0.77	-0.70	15.45
<b>Rejetés</b>													
04CHDB017	5.37	-1.36	-7.85	12.67	-7.29	-1.31	3.45	17.56	0.60	0.10	-0.77	-0.20	4.63
04CHDB037	5.84	-1.02	-9.10	13.60	-8.68	-1.35	5.28	23.03	0.46	-3.19	-0.92	-2.39	13.91
04CHDB068	3.38	-1.37	-7.36	8.69	-3.23	-0.93	4.97	14.65	0.44	-0.63	-0.93	-0.53	2.70
04CHDB075	5.37	-1.20	-8.79	12.68	-6.32	-1.82	3.85	20.83	0.33	-2.41	-1.05	-1.58	10.76

Tableau F5: Indice de saturation (SI) (suite)

Ech_ID	Goethite	Gypsum	Halite	Hematite	Hydroxyapatite	K-feldspar	K-mica	Pyrite	Quartz	Siderite	SiO2(a)	Strontianite	Sulfur
<b>Rejetés</b>													
04CHDB076	5.73	-1.69	-7.25	13.40	-2.90	-2.00	1.97	17.37	0.42	0.03	-0.95	0.23	4.52
04CHDB094	5.94	-1.67	-7.54	13.81	-2.42	-1.63	3.66	18.17	0.56	0.24	-0.81	-1.65	5.42
04CHDB097	5.52	-1.88	-7.97	12.98	-6.21	-1.46	3.43	18.17	0.58	0.07	-0.79	-0.39	5.48
04CHDB138	5.42	-0.96	-7.05	12.78	-7.75	-0.86	5.69	19.80	0.45	-0.86	-0.92	-0.70	8.38
04CHDB139	8.01	-1.08	-7.85	17.97	-3.19	-1.57	2.31	23.36	0.76	0.45	-0.61	-1.59	10.63
<b>Multi-niveaux</b>													
04CH3R-45	5.20	-1.30	-5.79	12.34	-4.50	-1.25	4.86	16.88	0.23	0.01	-1.14	-0.97	4.17
04CH3R-55	5.85	-1.10	-6.18	13.63	-6.99	-1.41	4.62	18.66	0.22	-0.11	-1.15	-1.05	6.08
04CH3R-70	6.11	-1.15	-5.79	14.15	-6.26	-1.26	4.53	18.70	0.25	0.15	-1.12	-0.75	5.86
04CH4R-11	5.90	-2.68	-8.40	13.74	-5.71	-0.45	6.72	19.27	0.52	0.20	-0.84	-2.06	6.70
04CH4R-15.9	6.17	-2.06	-9.24	14.28	-5.58	-0.08	7.97	19.92	0.54	0.05	-0.84	-1.85	7.27
04CH4R-25.4	5.30	-2.39	-8.92	12.53	-6.84	-0.73	6.45	18.91	0.52	-0.25	-0.86	-1.86	6.67
04CH5R-33.5	6.15	-0.77	-6.69	14.23	-5.16	-0.43	6.74	18.88	0.23	0.12	-1.15	-0.50	5.94
04CH5R-46.3	6.40	-0.78	-6.69	14.73	-4.72	-0.14	7.58	19.15	0.21	0.15	-1.17	-0.38	6.15
04CH6R-52.5	5.07	-2.61	-8.40	12.10	-17.32	-4.21	0.60	22.60	0.29	-3.97	-1.06	-4.82	14.18
04CH6R-65.2	4.98	-2.73	-8.41	11.92	-17.52	-4.23	0.81	22.09	0.25	-3.74	-1.09	-4.89	13.57
04CH10R-25	6.56	-1.61	-7.93	15.05	-7.61	-1.32	5.11	21.79	0.54	-0.97	-0.84	-2.24	10.14
04CH10R-46.6	5.39	-1.69	-7.83	12.72	-5.94	-0.83	5.89	19.37	0.54	-0.32	-0.84	-1.83	6.61
04CH11R-33	8.42	-2.44	-7.44	18.77	-3.51	-1.51	3.33	23.76	0.44	-0.09	-0.94	-1.08	11.17
04CH11R-52	8.15	-2.30	-7.19	18.22	-4.14	-1.55	3.27	23.45	0.42	-0.39	-0.96	-1.10	11.17
04CH12R-22	7.57	-1.67	-8.22	17.06	-3.46	-1.21	4.05	22.95	0.60	-0.42	-0.78	-1.09	10.85
04CH12R-50.9	3.97	-2.06	-8.11	9.87	-2.49	-1.24	3.93	19.11	0.54	-0.50	-0.84	-0.95	5.17
04CH13R-20.5	6.39	-1.95	-7.75	14.72	-1.98	-0.82	5.18	19.50	0.59	0.14	-0.79	-1.10	6.77
04CH13R-31.8	6.57	-1.91	-7.54	15.07	-2.00	-0.97	4.63	20.04	0.61	0.14	-0.77	-1.07	7.29
04CH13R-55.8	6.92	-2.00	-7.52	15.76	-2.11	-1.55	2.95	20.62	0.58	0.04	-0.80	-1.10	7.92
04CH14R-29.5	6.48	-2.14	-8.68	14.89	-2.50	-1.17	3.80	19.04	0.49	-0.04	-0.89	-0.91	6.29
04CH14R-35	6.18	-2.13	-8.71	14.29	-2.95	-1.07	4.42	18.78	0.49	-0.01	-0.88	-1.11	6.05
04CH14R-85.5	6.12	-2.11	-8.22	14.16	-2.94	-1.42	3.29	18.56	0.47	-0.17	-0.90	-0.97	5.95

## **ANNEXE G**

**Statistiques descriptives des données chimiques brutes en fonction des contextes géologiques et hydrogéologiques**

Tableau G1: Statistiques descriptives en fonction des contextes géologiques

Paramètres	Dolomie				Grès				Calcaire+Shale				Interface sédiments-roc				Sédiments			
	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75
Temp. (°C)	85	9.0	9.5	9.9	35	8.9	9.3	10.2	7	9.7	10.5	11.1	12	9.4	9.6	10.1	5	9.2	9.6	11.0
pH	85	7.24	7.53	7.74	35	7.00	7.45	7.66	7	7.00	7.42	7.58	12	7.25	7.44	7.69	5	7.39	7.42	7.61
Cond. spec. (uS/cm)	85	640	796	1056	35	346	568	974	7	970	1089	1614	12	641	696	945	5	443	498	798
Oxyg_diss (mg/L)	82	0.14	0.21	0.60	34	0.24	0.54	3.01	6	0.17	0.24	0.67	11	0.24	0.50	2.12	5	0.21	0.25	0.32
Eh (mV)	77	40	96	140	32	71	97	209	7	66	84	163	12	63	127	175	5	21	71	82
Ag (ug/L)	84	<0.001	<0.001	0.001	34	<0.001	<0.001	0.001	7	<0.001	0.004	0.005	12	<0.001	0.001	0.002	5	<0.001	0.001	0.001
Al (ug/L)	84	0.20	0.45	0.70	34	0.3	0.6	2.0	7	0.2	0.2	1.3	12	0.30	0.80	1.35	5	1.4	2.2	2.5
Alcalinité (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	85	230	280	330	35	110	170	220	7	180	270	380	11	190	280	360	5	230	250	300
As (ug/L)	84	0.22	0.41	1.16	34	0.18	0.36	0.88	7	0.18	0.43	0.67	12	0.16	0.53	0.93	5	0.18	0.30	0.70
B (ug/L)	85	21	44	110	34	12	40	100	7	86	250	300	12	10.9	16.5	68.0	5	7.2	9.8	57.0
Ba (ug/L)	84	68.5	97.5	160	34	28.0	68.5	130	7	16	63	72	12	68.5	95.0	175	5	60	110	290
Br (ug/L)	84	6.5	11.5	23.0	34	4.7	11.0	30.0	7	11	15	35	12	7.1	11.0	15.5	5	2.8	9.0	12.0
Ca (mg/L)	85	52	71	110	35	40	54	85	7	62	63	140	12	62	78	104	5	32	53	75
Cd (ug/L)	84	0.0055	0.010	0.016	34	0.0060	0.0095	0.017	7	0.005	0.007	0.010	12	0.0075	0.0100	0.0135	5	0.007	0.008	0.009
Cl (mg/L)	85	15	30	70	35	6.7	16	75	7	8.8	65	160	11	11	25	50	5	0.6	5	33
CID (mg/L)	84	53.5	66	79	35	26	40	56	7	48	66	99	12	53	67.5	86	5	50	61	64
COD (mg/L)	79	0.8	1.1	2.0	35	0.7	1.2	1.9	7	0.4	0.6	4.6	12	0.45	1.0	1.7	5	0.5	2.2	2.5
Couleur (U.C.V.)	83	1	2	4	33	1	2	2	7	<1	2	4	11	1	2	5	5	1	7	10
Cr (ug/L)	84	<0.04	0.050	0.465	34	<0.04	0.135	0.43	7	<0.04	1.3	2.5	12	0.135	0.37	0.70	5	0.20	0.21	0.28
Cu (ug/L)	84	0.345	0.89	1.85	34	0.39	1.15	2.2	7	0.30	0.62	15	12	0.27	0.37	0.68	5	0.17	0.20	0.27
Cyan_totaux (mg/L)	85	<0.003	<0.003	<0.003	35	<0.003	<0.003	<0.003	7	<0.003	<0.003	<0.003	12	<0.003	<0.003	<0.003	5	<0.003	<0.003	<0.003
F (mg/L)	82	0.12	0.18	0.36	34	0.10	0.15	0.22	7	0.24	0.64	0.94	12	0.10	0.16	0.28	5	0.08	0.18	0.22
Fe (ug/L)	85	64	290	750	35	21	390	740	7	370	760	1700	12	89.5	225	490	5	15	370	370
Hg (ug/L)	85	<0.01	0.01	0.02	35	<0.01	0.01	0.02	7	<0.01	0.01	0.02	12	<0.01	0.01	0.01	5	<0.01	<0.01	<0.01
I (ug/L)	84	1.1	2.35	4.2	34	0.7	1.0	2.4	7	4.1	9.0	12	12	1.10	1.85	3.65	5	<0.5	1.5	2.5
K (mg/L)	85	2.1	3.6	5.3	35	1.7	3.3	5.6	7	3.4	3.5	6.6	12	2.15	2.95	7.7	5	1.7	1.8	4.1
Li (ug/L)	84	2.55	5.20	7.15	34	1.20	3.15	7.40	7	11	19	39	12	2.55	4.8	6.6	5	1.3	2.9	6.3
Mg (mg/L)	85	28	35	43	35	8.4	14.5	23	7	20	49	56	12	21	35.5	41	5	23	23	28
Mn (ug/L)	85	10	29	72	34	20	68	100	7	12	16	30	12	8.7	30.5	60.5	5	8.6	15	50
Na (mg/L)	85	13.2	29	59	35	4.9	11.9	36	7	69	80	190	12	9.80	20.15	56	5	4.3	7.4	35
Ni (ug/L)	84	0.115	0.335	0.855	34	<0.02	0.26	0.73	7	<0.02	<0.02	0.81	12	0.190	0.535	0.765	5	0.09	0.27	0.41
NH <sup>4</sup> (mg N/L)	85	0.02	0.12	0.23	35	<0.02	0.03	0.14	7	0.03	0.27	0.51	12	0.035	0.135	0.220	5	0.03	0.08	0.18
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> (mg N/L)	85	<0.02	0.02	0.05	35	<0.02	<0.02	0.11	7	<0.02	0.02	0.02	12	<0.02	0.030	0.125	5	0.02	0.02	0.08
N-total (mg N/L)	84	0.12	0.23	0.43	35	0.08	0.19	0.40	7	0.23	0.43	0.70	12	0.16	0.205	0.62	5	0.10	0.20	0.34
P (ug/L)	84	3	11	26	34	<2	7.8	31	7	<2	2	9	12	<2	3.5	13	5	<2	14	21
Pt_inor. (mg P/L)	85	<0.03	<0.03	<0.03	35	<0.03	<0.03	<0.03	7	<0.03	<0.03	<0.03	12	<0.03	<0.03	<0.03	5	<0.03	<0.03	<0.03
Pb (ug/L)	84	<0.02	0.04	0.09	34	<0.02	0.045	0.14	7	<0.02	0.03	0.08	12	<0.02	<0.02	0.035	5	<0.02	<0.02	<0.02
Se (ug/L)	84	<0.3	<0.3	<0.3	34	<0.3	<0.3	<0.3	7	<0.3	<0.3	<0.3	12	<0.3	<0.3	<0.3	5	<0.3	<0.3	<0.3
Si (mg/L)	84	4.80	5.45	6.35	34	3.8	4.8	5.9	7	6.6	6.9	7.4	12	5.25	6.20	7.05	5	5.5	5.7	5.8
SO <sub>4</sub> (mg/L)	81	50	85	160	34	19	52.5	110	7	75	130	240	12	55.0	62.5	120	4	20.0	49.5	111.5
Sr (ug/L)	85	310	670	1500	35	210	570	1400	7	1600	4500	11000	12	240	550	940	5	150	660	800
Sulf_totaux (mg/L)	85	<0.03	<0.03	<0.03	35	<0.03	<0.03	<0.03	7	<0.03	<0.03	<0.03	12	<0.03	<0.03	<0.03	5	<0.03	<0.03	<0.03
U (ug/L)	84	0.079	0.285	0.820	34	0.12	0.27	0.56	7	0.033	0.044	0.38	12	0.145	0.485	0.785	5	0.19	0.38	0.45
Zn (ug/L)	84	1.25	3.7	7.5	34	1.40	2.65	6.5	7	1.6	6.7	9.7	12	0.50	3.15	5.9	5	<0.7	<0.7	<0.7

N: Nombre d'échantillons

25, 50, 75: Centiles

Tableau G2: Statistiques descriptives en fonction des conditions de l'écoulement de l'eau souterraine et de la position sur la ligne d'écoulement

Paramètres	Libre				Semi-confiné				Confiné				Recharge				Intermédiaire				Émergence			
	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75	N	25	50	75
Temp. (°C)	19	9.0	9.3	9.6	87	9.2	9.6	10.2	38	8.8	9.4	9.9	35	8.8	9.4	10.1	64	9.1	9.6	10.1	45	9.0	9.4	10.0
pH	19	6.70	7.09	7.33	87	7.22	7.48	7.65	38	7.39	7.65	7.84	35	7.17	7.29	7.61	64	7.20	7.49	7.75	45	7.29	7.56	7.71
Cond. spec. (µS/cm)	19	239	471	897	87	572	739	1007	38	670	858	1160	35	598	792	1007	64	466	714	892	45	611	890	1182
Oxyg. diss. (mg/L)	19	0.25	1.94	4.86	81	0.16	0.24	0.73	38	0.16	0.28	0.51	33	0.18	0.37	0.99	61	0.16	0.32	1.54	44	0.17	0.21	0.44
Eh (mV)	17	110	177	286	79	53	97	151	37	21	64	116	31	72	123	172	60	47	102	203	42	39	76	98
Ag (ug/L)	18	<0.001	<0.001	0.001	87	<0.001	<0.001	0.001	37	<0.001	<0.001	0.001	35	<0.001	<0.001	0.002	63	<0.001	<0.001	0.001	44	<0.001	0.001	0.001
Al (ug/L)	18	0.20	1.25	5.80	87	0.2	0.4	0.7	37	0.4	0.7	1.4	35	0.3	0.5	1.1	63	0.2	0.4	0.8	44	0.3	0.5	1.2
Alcalinité (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	19	71	160	230	86	210	260	300	38	220	290	350	34	190	260	300	64	180	230	300	45	210	280	350
As (ug/L)	18	0.11	0.22	0.85	87	0.26	0.44	1.13	37	0.17	0.43	0.83	35	0.18	0.33	0.67	63	0.23	0.40	0.89	44	0.26	0.71	1.46
B (ug/L)	18	6.9	11.5	41.0	87	12	32	75	38	54	140	320	35	8.7	33.0	84.0	63	12	32	78	45	40	75	230
Ba (ug/L)	18	60	140	220	87	47	84	110	37	67	150	190	35	59	86	140	63	49	88	140	44	52.5	120	170
Br (ug/L)	18	4.0	6.0	11.0	87	6.1	11.0	21.0	37	9.5	16.0	140	35	4.8	8.1	16.0	63	6.2	11.0	17.0	44	9.1	17.5	42.0
Ca (mg/L)	19	26	57	92	87	53	76	110	38	40	61	80	35	53	80	110	64	50.5	63	84	45	45	72	110
Cd (ug/L)	18	0.0040	0.0075	0.0170	87	0.006	0.010	0.014	37	0.006	0.010	0.016	35	0.005	0.007	0.013	63	0.005	0.010	0.014	44	0.0075	0.012	0.019
Cl (mg/L)	19	5.6	16	63	86	10	26.5	62	38	13	40.5	160	34	6.7	20.5	46	64	9.4	26	62.5	45	15	40	100
CID (mg/L)	19	18.6	37	54	86	47	63.5	76	38	50	65.5	77	35	46	64	76	63	40	56	70	45	50	65	90
COD (mg/L)	19	0.6	1.0	6.1	83	0.7	1.1	1.7	36	0.8	1.35	2.2	34	0.5	1.0	1.8	59	0.7	1.0	1.8	45	1.0	1.5	2.5
Couleur (U.C.V.)	18	1	2	4	84	1	2	3	37	2	2	5	34	1	1.5	3	61	1	2	3	44	2	2	4
Cr (ug/L)	18	<0.04	0.135	0.25	87	<0.04	0.08	0.50	37	<0.04	0.12	0.47	35	<0.04	0.11	0.37	63	<0.04	0.17	0.68	44	<0.04	0.090	0.475
Cu (ug/L)	18	0.37	1.75	4.4	87	0.35	1.0	2.2	37	0.27	0.39	0.80	35	0.30	0.61	1.9	63	0.36	1.0	2.3	44	0.275	0.615	1.3
Cyan_totaux (mg/L)	19	<0.003	<0.003	<0.003	87	<0.003	<0.003	<0.003	38	<0.003	<0.003	<0.003	35	<0.003	<0.003	<0.003	64	<0.003	<0.003	<0.003	45	<0.003	<0.003	<0.003
F (mg/L)	17	0.10	0.10	0.16	85	0.10	0.14	0.26	38	0.18	0.29	0.42	34	0.10	0.14	0.34	63	0.10	0.16	0.34	43	0.14	0.22	0.32
Fe (ug/L)	19	15	160	670	87	29	290	740	38	190	370	800	35	21	160	760	64	24.5	230	505	45	260	460	970
Hg (ug/L)	19	<0.01	<0.01	0.02	87	<0.01	0.01	0.02	38	<0.01	0.01	0.02	35	<0.01	0.01	0.02	64	<0.01	0.01	0.02	45	<0.01	<0.01	0.01
I (ug/L)	18	<0.5	0.75	1.3	87	0.9	1.6	3.2	37	2.2	5.4	16	35	0.6	1.3	3.0	63	0.9	1.9	4.1	44	1.10	2.45	6.35
K (mg/L)	19	1.7	2.4	4.8	87	1.8	3.1	4.0	38	4.1	6.6	9.1	35	1.6	2.5	4.4	64	1.9	3.2	4.55	45	3.3	4.2	8.8
Li (ug/L)	18	0.7	1.4	3.0	87	2.4	4.4	6.9	37	5.3	7.1	9.3	35	1.7	3.3	6.4	63	2.0	3.8	6.7	44	3.60	6.50	8.45
Mg (mg/L)	19	3.7	11.4	24	87	23	34	40	38	24	33	43	35	23	34	40	64	19.45	30.0	40.5	45	22	32	42
Mn (ug/L)	18	4.2	52	120	87	11	29	76	38	12.0	26.5	64	35	9.6	25	75	63	9.7	25	56	45	20	57	120
Na (mg/L)	19	3.4	8.4	31	87	10.3	21	46	38	20.0	54.5	140	35	7.4	16.8	44	64	8.45	17.45	50.5	45	16.9	38	130
Ni (ug/L)	18	0.16	0.7	1.4	87	<0.02	0.30	0.78	37	0.12	0.27	0.54	35	0.10	0.54	1.1	63	<0.02	0.29	0.78	44	<0.02	0.265	0.550
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N/L)	19	<0.02	<0.02	0.07	87	0.02	0.08	0.19	38	0.10	0.25	0.42	35	<0.02	0.03	0.19	64	<0.02	0.075	0.22	45	0.08	0.16	0.36
NO <sub>2</sub> -NO <sub>3</sub> (mg N/L)	19	<0.02	0.02	0.36	87	<0.02	0.02	0.08	38	<0.02	<0.02	0.04	35	<0.02	0.03	0.22	64	<0.02	0.02	0.10	45	<0.02	<0.02	0.03
N-total (mg N/L)	19	0.10	0.20	0.83	87	0.09	0.20	0.36	37	0.16	0.35	0.55	34	0.09	0.235	0.47	64	0.105	0.225	0.415	45	0.13	0.23	0.43
P (ug/L)	18	<2	9	17	87	<2	8	18	37	3	18	40	35	<2	10	18	63	2.0	9.3	21	44	<2	8.5	28.5
Pt_inor. (mg P/L)	19	<0.03	<0.03	<0.03	87	<0.03	<0.03	<0.03	38	<0.03	<0.03	<0.03	35	<0.03	<0.03	<0.03	64	<0.03	<0.03	<0.03	45	<0.03	<0.03	<0.03
Pb (ug/L)	18	<0.02	0.085	0.250	87	<0.02	0.04	0.09	37	<0.02	<0.02	0.04	35	<0.02	0.03	0.08	63	<0.02	0.03	0.10	44	<0.02	<0.02	0.08
Se (ug/L)	18	<0.3	<0.3	<0.3	87	<0.3	<0.3	<0.3	37	<0.3	<0.3	<0.3	35	<0.3	<0.3	<0.3	63	<0.3	<0.3	<0.3	44	<0.3	<0.3	<0.3
Si (mg/L)	18	3.30	4.25	5.4	87	4.8	5.6	6.4	37	5.1	5.8	6.9	35	4.7	5.5	6.4	63	4.7	5.4	6.5	44	4.7	5.6	6.4
SO <sub>4</sub> (mg/L)	17	12	36	80	85	50	75	150	36	62.5	90	165	34	44	70	190	63	42	73	140	41	50	75	140
Sr (ug/L)	19	110	250	880	87	270	600	1700	38	670	1000	1800	35	250	530	1900	64	235	575	1400	45	370	930	1700
Sulf_totaux (mg/L)	19	<0.03	<0.03	<0.03	87	<0.03	<0.03	<0.03	38	<0.03	<0.03	<0.03	35	<0.03	<0.03	<0.03	64	<0.03	<0.03	<0.03	45	<0.03	<0.03	<0.03
U (ug/L)	18	0.057	0.150	0.560	87	0.13	0.38	0.73	37	0.041	0.12	0.68	35	0.10	0.38	0.78	63	0.059	0.21	0.56	44	0.115	0.335	0.715
Zn (ug/L)	18	2.50	5.65	7.0	87	1.4	3.7	7.5	37	0.9	1.8	4.7	35	1.5	3.8	6.4	63	1.4	2.9	7.5	44	0.95	3.25	8.05

N: Nombre d'échantillons 25, 50, 75: Centiles

## **ANNEXE H**

### **Statistiques descriptives des ions majeurs et mineurs en fonction des types d'eau et des clusters**

Tableau H1: Statistiques descriptives en fonction des types d'eau

Tableau H2: Statistiques descriptives en fonction des clusters d'eau souterraine

Tableau H1: Statistiques descriptives en fonction des types d'eau

Type d'eau	Centiles	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Alk earth HCO <sub>3</sub> N = 2	25	42.0	25.2	20.9	3.9	285	0.38	0.05	42.8
	50	44.0	25.4	23.9	4.2	286	0.48	13.0	53.2
	75	46.0	25.7	26.9	4.6	286	0.59	26.0	63.7
Ca-Cl N = 2	25	13.1	2.9	4.0	1.0	24.3	0.001	18.0	10.4
	50	13.5	3.0	9.5	1.7	27.9	0.002	24.0	13.7
	75	13.9	3.1	15.0	2.5	31.6	0.003	30.0	17.0
Ca-HCO <sub>3</sub> N = 78	25	56.0	20.6	7.4	1.6	236	0.21	10.0	35.4
	50	71.5	29.2	12.9	2.4	308	0.28	25.0	49.9
	75	92.8	35.9	27.9	4.3	358	0.41	55.0	86.0
Ca-SO <sub>4</sub> N = 9	25	95.0	8.2	7.7	3.3	132	0.07	2.4	192
	50	137	12.8	15.4	3.6	200	0.18	15.0	273
	75	173	38.4	30.9	5.3	313	0.26	40.0	395
Mg-HCO <sub>3</sub> N = 5	25	42.3	33.8	16.8	2.1	270	0.51	6.5	38.2
	50	43.2	38.0	27.8	3.0	272	0.73	11.0	54.0
	75	47.4	43.0	42.8	7.1	415	1.1	13.0	66.3
Mx cations Cl N = 2	25	68.8	39.5	81.8	2.8	272	0.24	180	47.4
	50	108	50.8	106	3.3	352	0.32	275	72.3
	75	147	62.1	129	3.9	433	0.39	370	97.3
Mx cations HCO <sub>3</sub> N = 14	25	41.0	22.7	42.9	3.6	262	0.48	8.3	43.1
	50	54.8	31.2	51.2	4.0	327	0.64	34.0	67.6
	75	62.1	35.0	64.7	4.4	373	0.85	120	111
Na-Cl N = 8	25	22.7	19.2	144	10.4	220	0.51	175	106
	50	36.2	24.3	328	15.9	260	1.1	360	162
	75	41.4	31.6	477	17.0	471	3.8	540	257
Na-HCO <sub>3</sub> N = 12	25	18.2	14.8	81.6	2.9	242	0.42	17.0	17.5
	50	25.5	21.5	120	4.4	335	1.3	52.5	58.5
	75	46.4	27.9	154	6.1	464	2.0	102	107
Na-SO <sub>4</sub> N = 1	na	136	26.8	188	15.1	152	0.30	230	440
Na-Mx anions N=1	na	53.0	46.6	188	8.8	294	0.78	160	257
Ca-Mx anions N = 1	na	119	41.2	63.7	3.1	272	0.15	130	100

Concentrations en mg/L

Tableau H2: Statistiques descriptives en fonction des clusters d'eau souterraine

Paramètres	Centiles	C1	C2	C3	C4	C5	C6
		N = 33	N = 7	N = 12	N = 8	N = 46	N = 29
Ba <sup>2+</sup> (mg/L)	25	0.020	0.451	0.040	0.041	0.081	0.056
	50	0.026	0.788	0.058	0.067	0.110	0.081
	75	0.072	1.6	0.071	0.093	0.154	0.141
Br <sup>-</sup> (mg/L)	25	0.0130	0.0130	0.0066	0.0180	0.0076	0.0032
	50	0.0760	0.0350	0.0075	0.022	0.0110	0.0049
	75	0.1700	0.720	0.0135	0.029	0.0160	0.0062
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	25	44.7	11.9	67.8	131	56.9	28.6
	50	67.1	27.0	78.8	143	70.3	44.5
	75	115	30.5	95.8	179	88.5	51.4
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	25	12.0	5.0	23.0	36.0	17.0	2.0
	50	78.0	25.0	35.0	94.0	29.0	6.6
	75	160	660	71	180	55.0	16.0
F <sup>-</sup> (mg/L)	25	0.246	0.211	0.047	0.094	0.096	0.078
	50	0.384	0.384	0.076	0.110	0.146	0.116
	75	0.475	0.410	0.104	0.149	0.210	0.174
Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	25	0.142	0.016	0.001	0.748	0.163	0.003
	50	0.242	0.067	0.003	1.1	0.316	0.020
	75	0.558	0.121	0.022	1.5	0.545	0.182
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	25	214	356	356	393	270	130
	50	260	589	358	426	320	178
	75	309	658	407	484	367	238
K <sup>+</sup> (mg/L)	25	3.6	6.6	4.5	1.7	2.0	1.2
	50	5.3	8.8	6.5	2.6	3.1	1.7
	75	9.1	16.7	14.1	3.5	4.2	2.4
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	25	17.4	26.2	31.8	39.0	26.6	6.9
	50	24.6	33.9	33.8	51.4	32.5	10.9
	75	33.6	47.3	39.7	59.3	37.1	20.0
Mn <sup>2+</sup> (mg/L)	25	0.012	0.001	0.001	0.063	0.018	0.001
	50	0.017	0.002	0.002	0.123	0.036	0.012
	75	0.039	0.004	0.005	0.187	0.072	0.034
Na <sup>+</sup> (mg/L)	25	27.8	64.8	12.5	20.6	12.8	3.9
	50	79.5	129	23.4	29.9	19.7	6.5
	75	139	568	40.8	95.0	38.9	11.6
Si (mg/L)	25	4.8	4.5	4.2	6.5	5.2	4.2
	50	5.3	5.7	5.0	7.6	5.8	4.9
	75	6.0	7.8	5.6	8.0	6.6	5.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	25	111	0.25	36.0	103	42.8	15.2
	50	153	4.8	44.0	150	53.8	23.2
	75	199	15.5	69.4	279	72.7	42.6
Sr (mg/L)	25	1.6	0.77	0.12	0.44	0.26	0.10
	50	2.7	0.84	0.27	0.56	0.56	0.21
	75	4.7	1.2	0.3919	1.5	0.82	0.43
MDT (mg/L)	25	506	344	543	881	458	183
	50	645	559	619	1114	535	303
	75	872	1523	752	1260	628	366
Dureté (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	25	213	171	304	475	263	113
	50	275	192	338	569	310	173
	75	383	243	390	695	361	208
Longueur tubage (m)	25	9.1	13.7	5.8	9.7	6.7	6.1
	50	14.2	25.9	9.0	11.9	12.2	7.0
	75	26.1	29.0	13.0	14.2	17.4	17.0

N: Nombre d'échantillons

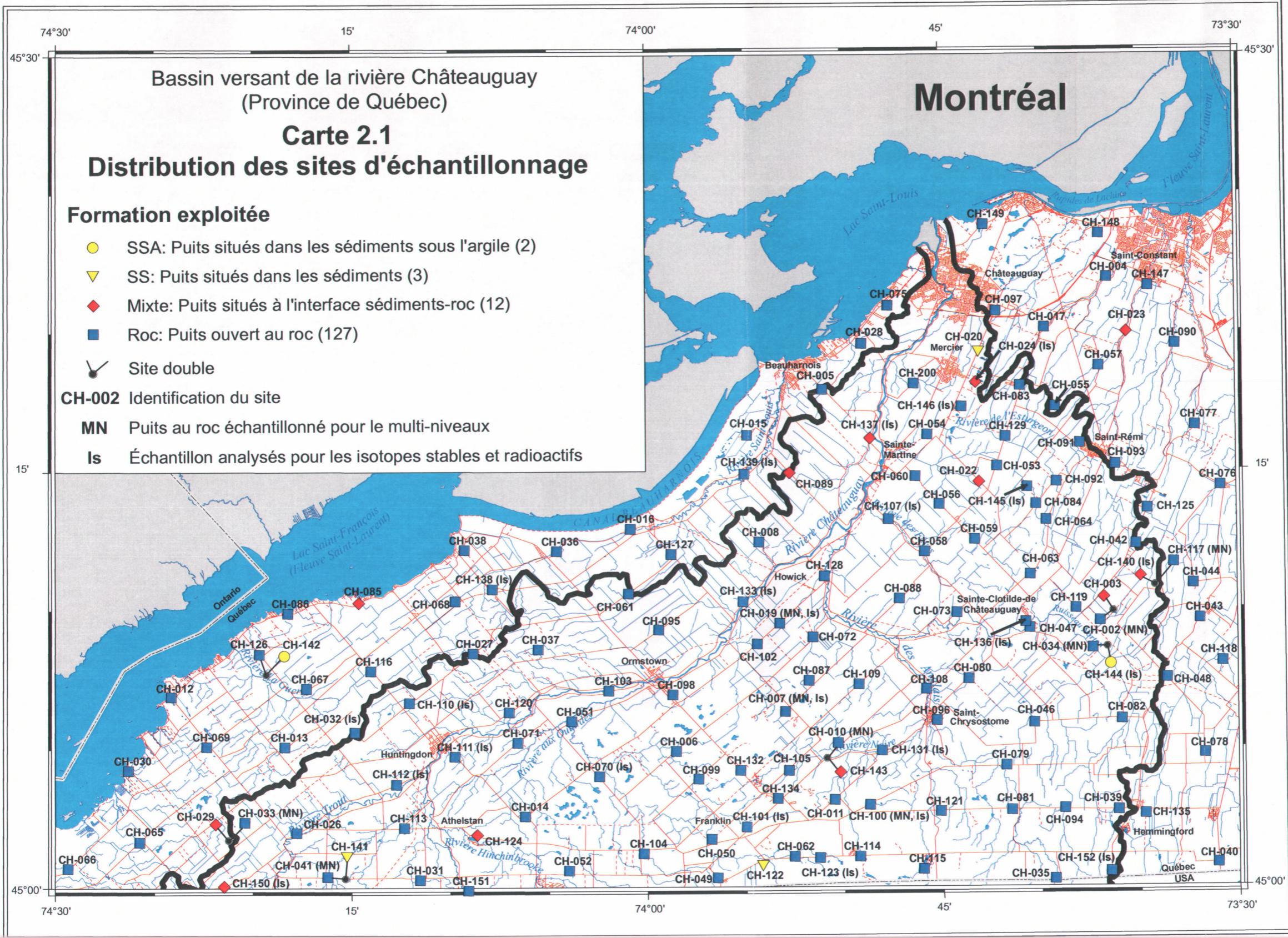


# **ANNEXE I**

## **Cartes du chapitre 2**

## Liste des cartes

- 2.1: Distribution des sites d'échantillonnage
- 2.2: Concentrations en ions  $\text{Ca}^{2+}$
- 2.3: Concentrations en ions  $\text{Mg}^{2+}$
- 2.4: Concentrations en ions  $\text{Na}^+$
- 2.5: Concentrations en ions  $\text{K}^+$
- 2.6: Concentrations en ions  $\text{HCO}_3^-$
- 2.7: Concentrations en ions  $\text{Cl}^-$
- 2.8: Concentrations des ions  $\text{SO}_4^{2-}$
- 2.9: Concentrations des ions  $\text{Ba}^{2+}$
- 2.10: Concentrations des ions  $\text{NO}_3^-$
- 2.11: Concentrations en ions  $\text{F}^-$
- 2.12: Matière dissoute totale (MDT)
- 2.13: Concentrations en ions  $\text{Fe}^{2+}$
- 2.14: Concentrations en ions  $\text{Mn}^{2+}$
- 2.15:  $\text{H}_2\text{S}$  gazeux dissous
- 2.16: Couleur vraie
- 2.17: Distribution du pH
- 2.18: Distribution des types d'eau simplifiés



Bassin versant de la rivière Châteauguay  
(Province de Québec)

### Carte 2.1 Distribution des sites d'échantillonnage

#### Formation exploitée

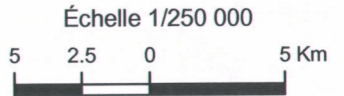
- SSA: Puits situés dans les sédiments sous l'argile (2)
- ▼ SS: Puits situés dans les sédiments (3)
- ◆ Mixte: Puits situés à l'interface sédiments-roc (12)
- Roc: Puits ouvert au roc (127)
- ↙ Site double

#### CH-002 Identification du site

- MN Puits au roc échantillonné pour le multi-niveaux
- Is Échantillon analysés pour les isotopes stables et radioactifs

### Légende

- Réseau routier
- Réseau hydrique
- Limites du bassin

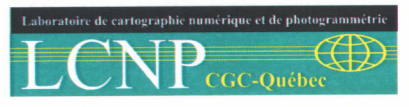


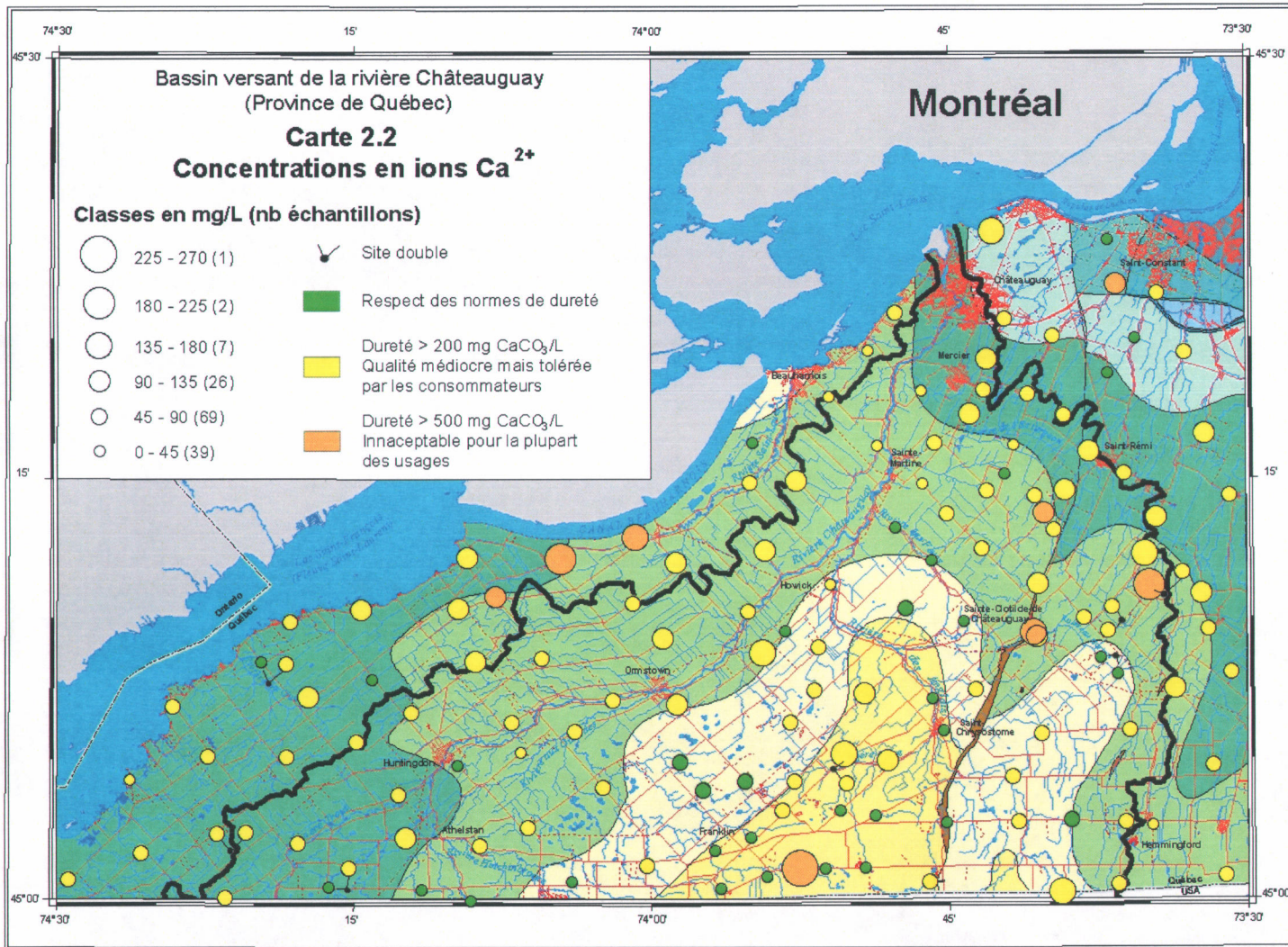
#### Sources des données

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada

Projection  
UTM NAD 83 Zone 18

Auteur  
Daniel Blanchette





### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

**CARTES SNRC**

N  
W — E  
S

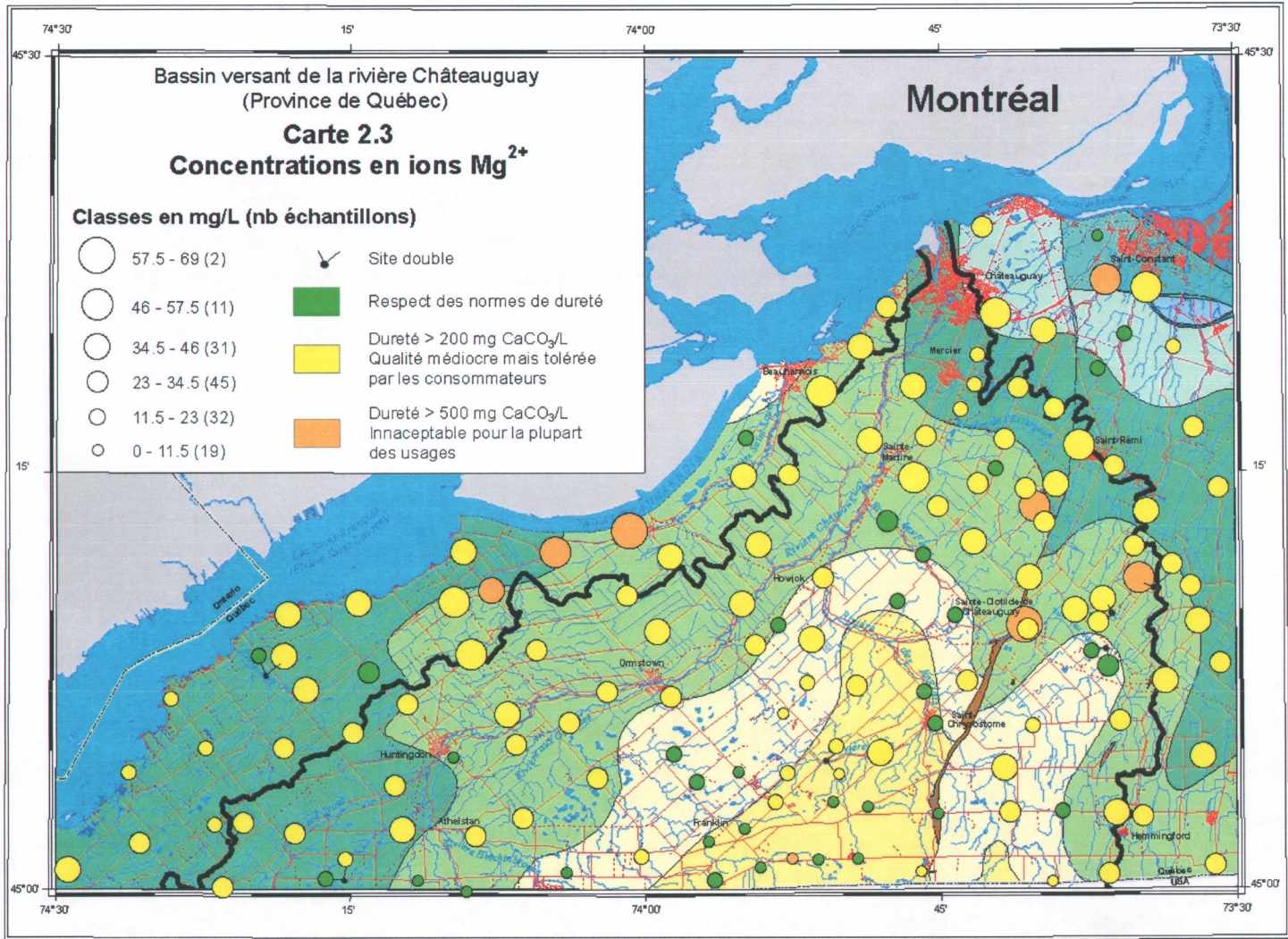
Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 km

**Sources des données**  
Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

CARTES SNRC

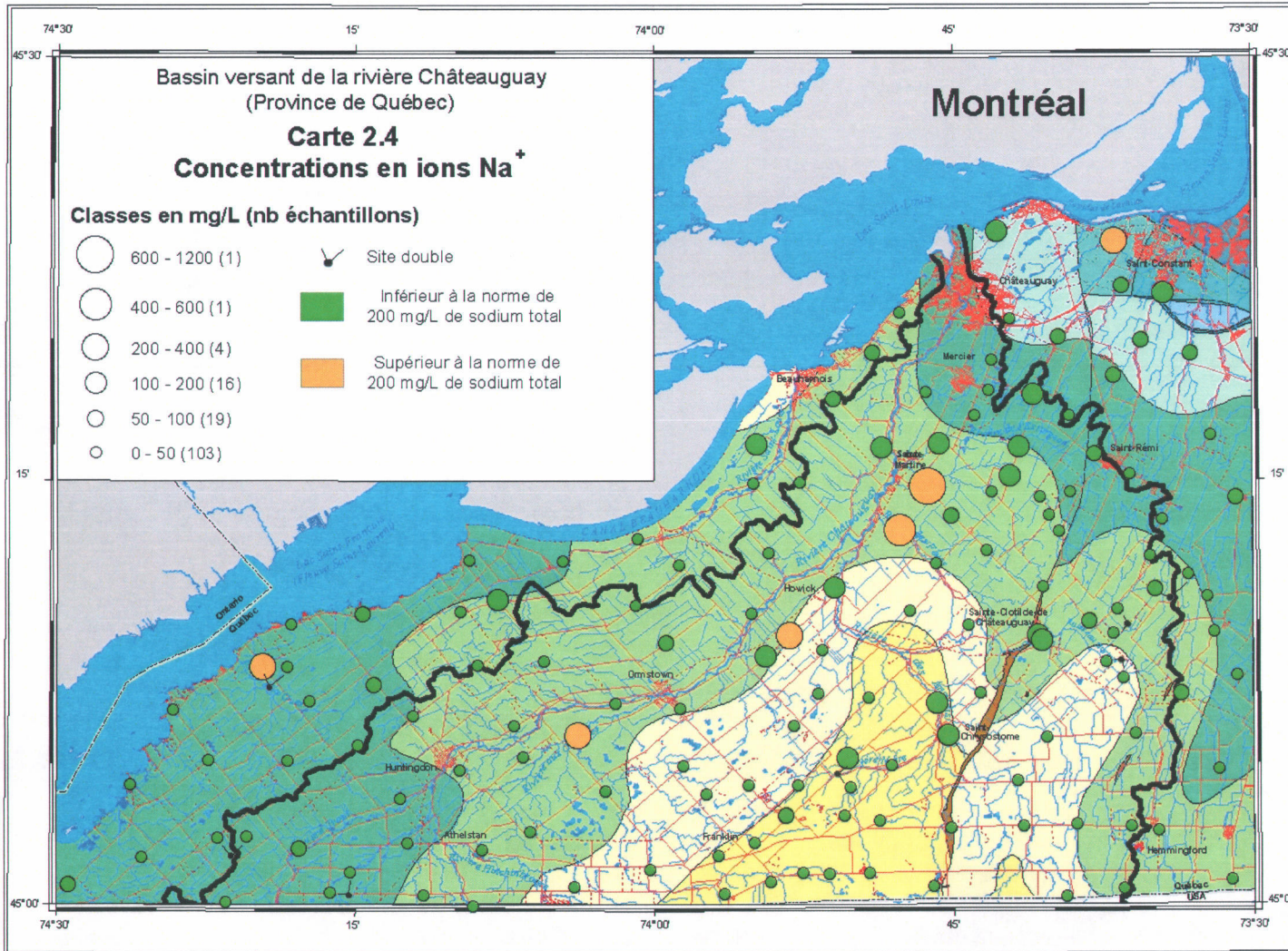
Échelle 1/250 000

**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

CARTES SNRC

Échelle 1/250 000

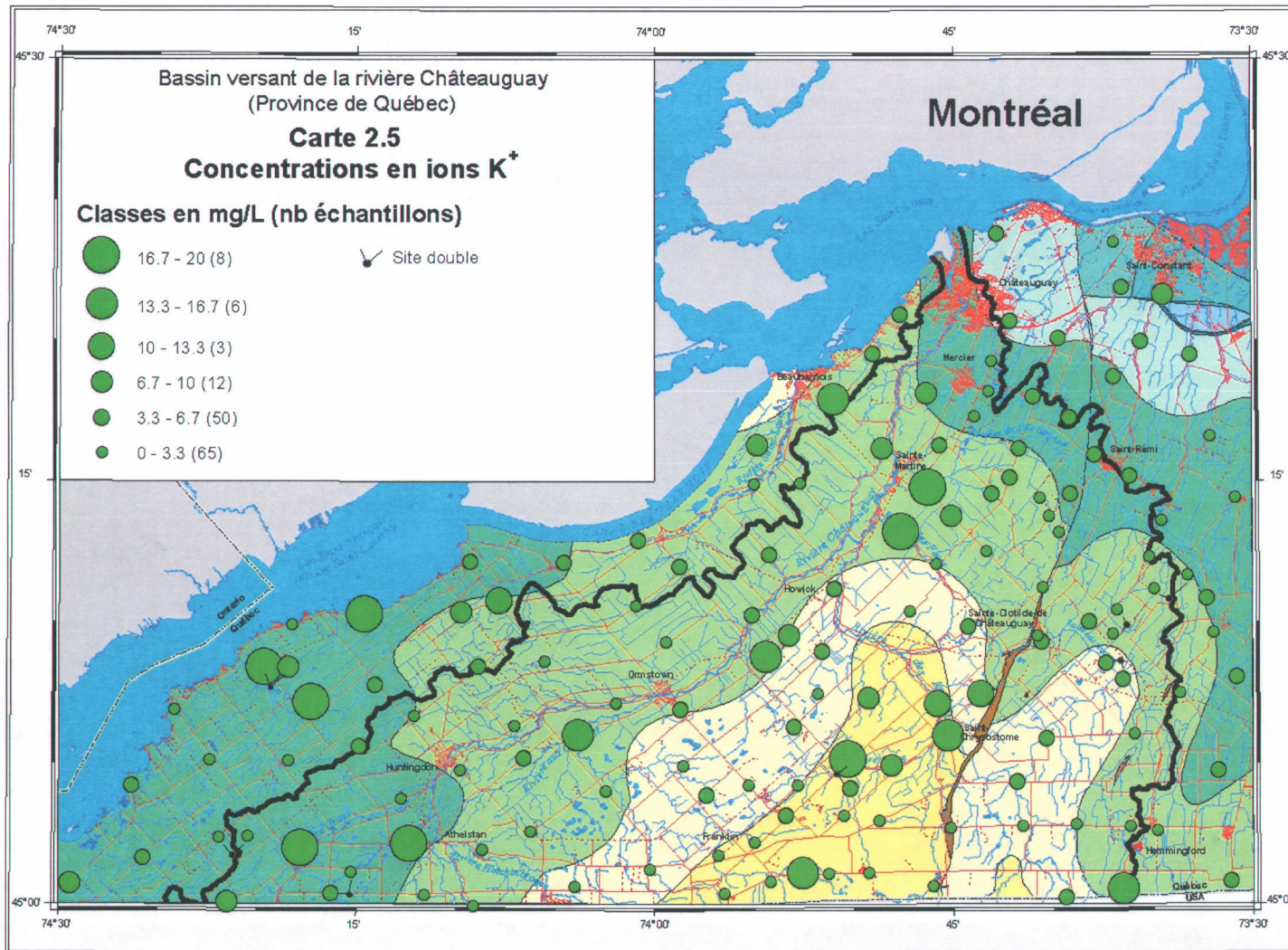
5 2.5 0 5 km

**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)













**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



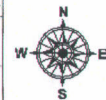
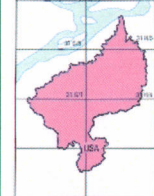
## Légende

### Géologie

-  Fm. Nicolet
-  Shale d'Utica
-  Brèche de Havelock
-  Fm. Tétérouville
-  Mb Saint-Michel
-  Fm. Deschambault
-  Gr. Black River
-  Fm. Laval
-  Fm. Beauharnois
-  Fm. Theresa
-  Fm. Cairnside
-  Fm. Covey Hill

 Limites du bassin

### CARTES SNRC



Échelle 1/250 000  
5 2.5 0 5 Km

### Sources des données

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

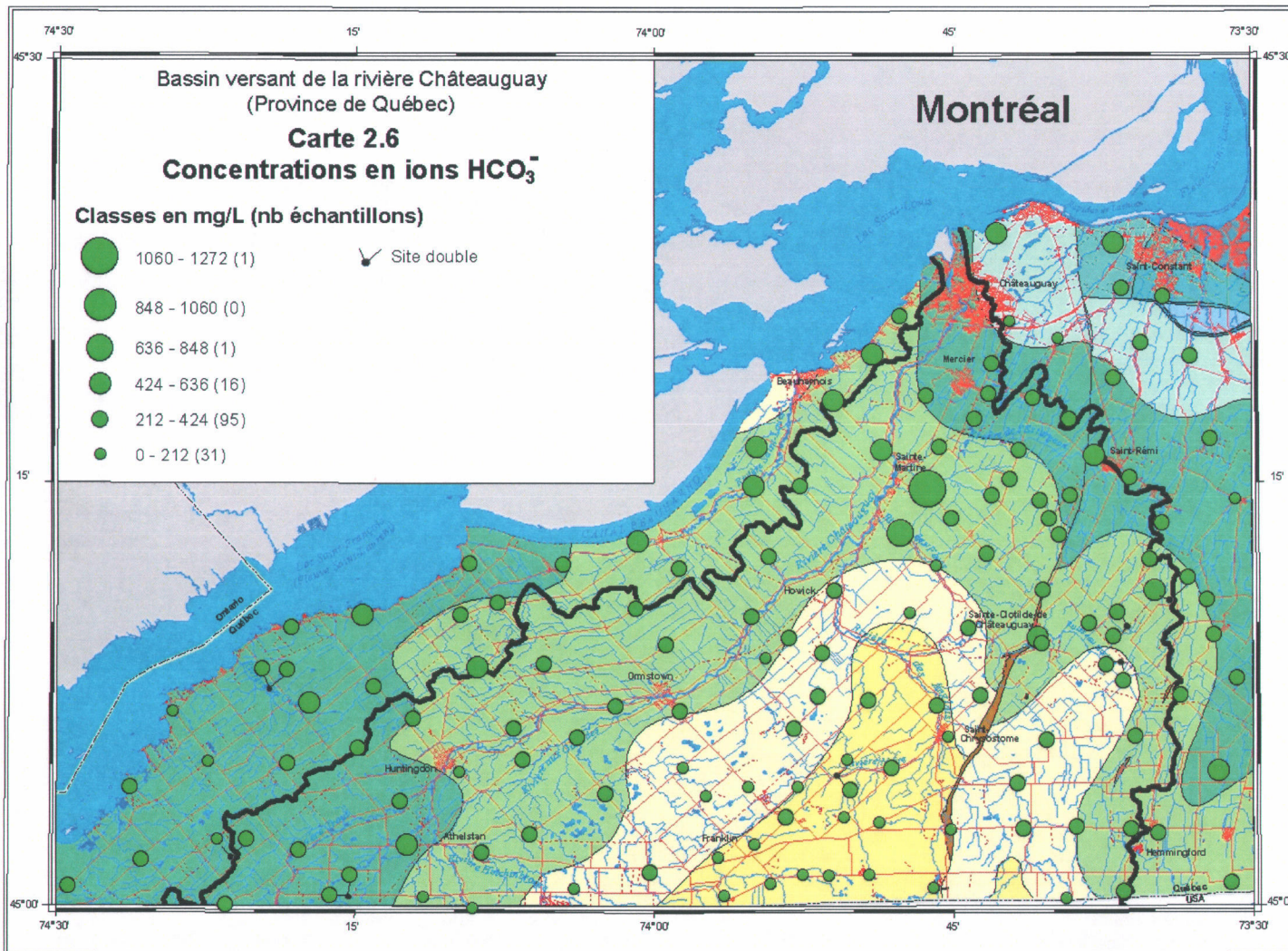
### Projection

UTM NAD 83 Zone 18

### Auteur

Daniel Blanchette



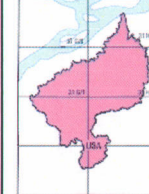


## Légende

### Géologie

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill
- Limites du bassin

### CARTES SNRC



Échelle 1/250 000  
5 2.5 0 5 km

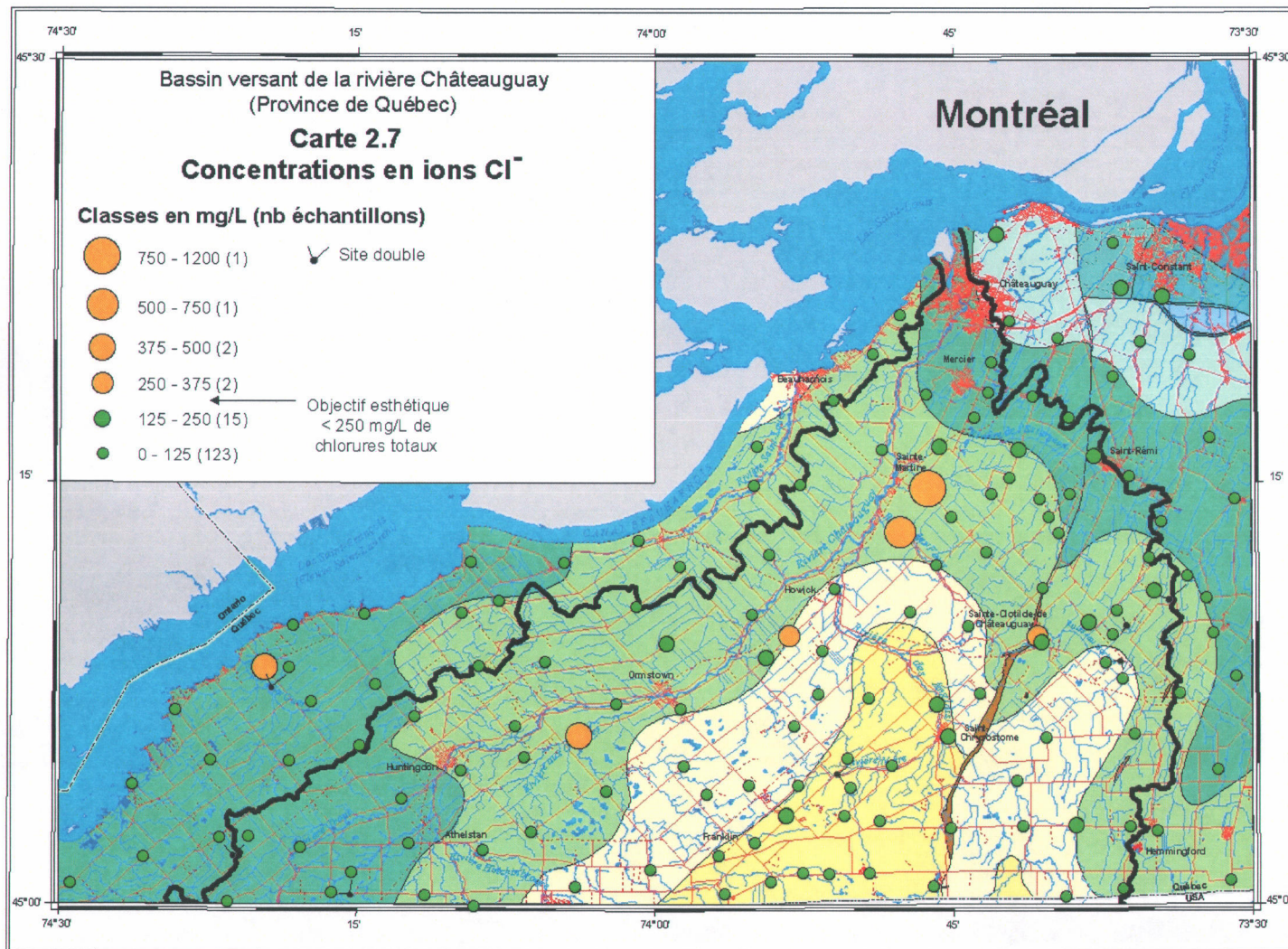
**Sources des données**  
Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette





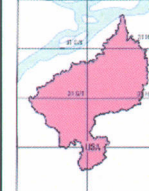


## Légende

### Géologie

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill
- Limites du bassin

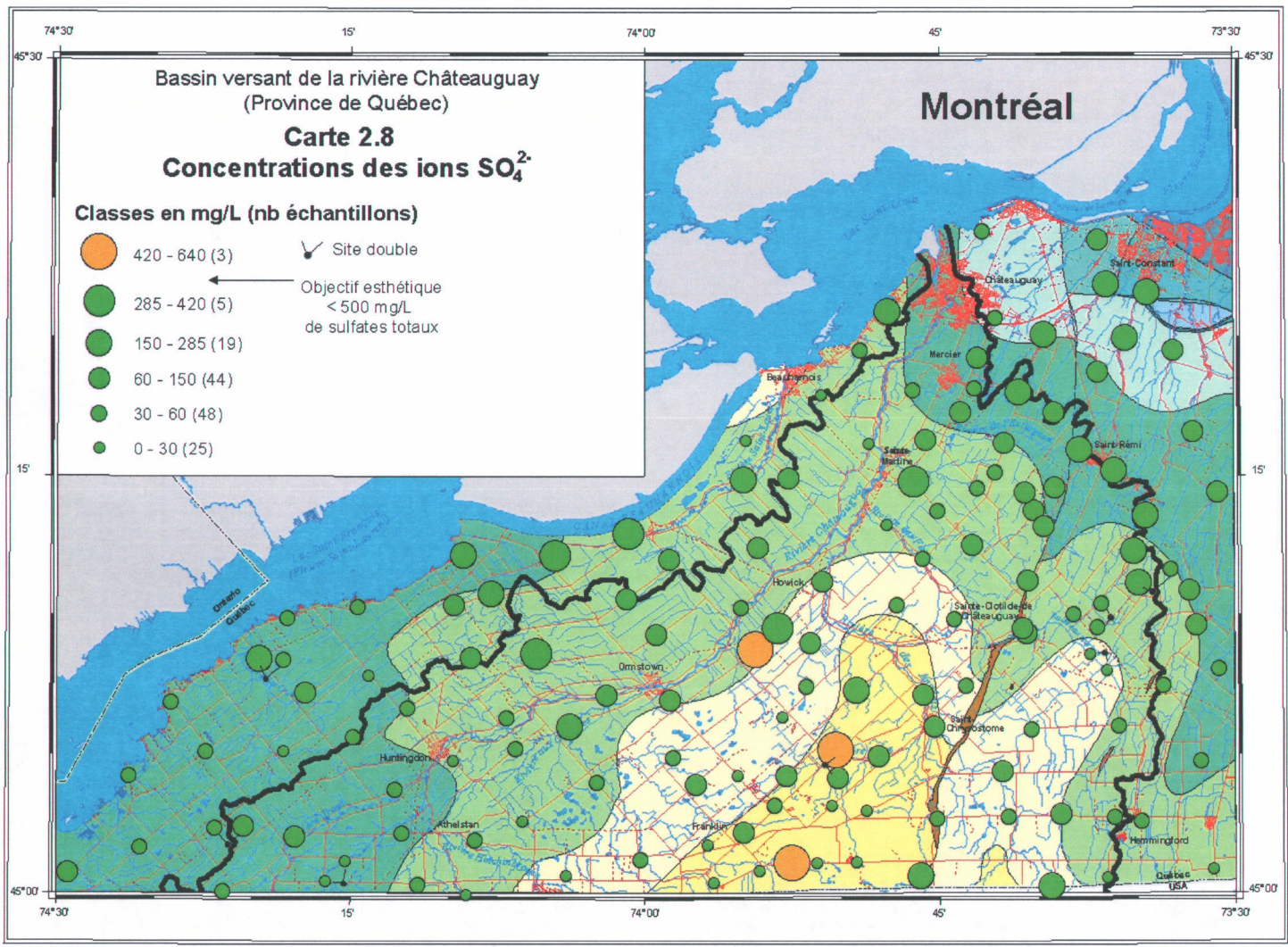
### CARTES SNRC



Échelle 1/250 000  
5 2.5 0 5 Km

**Sources des données**  
Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)  
**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18  
**Auteur**  
Daniel Blanchette





### Légende

**Géologie**

	Fm. Nicolet
	Shale d'Utica
	Brèche de Havelock
	Fm. Tétréauville
	Mb Saint-Michel
	Fm. Deschambault
	Gr. Black River
	Fm. Laval
	Fm. Beauharnois
	Fm. Theresa
	Fm. Cairnside
	Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

**CARTES SNRC**

Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 km

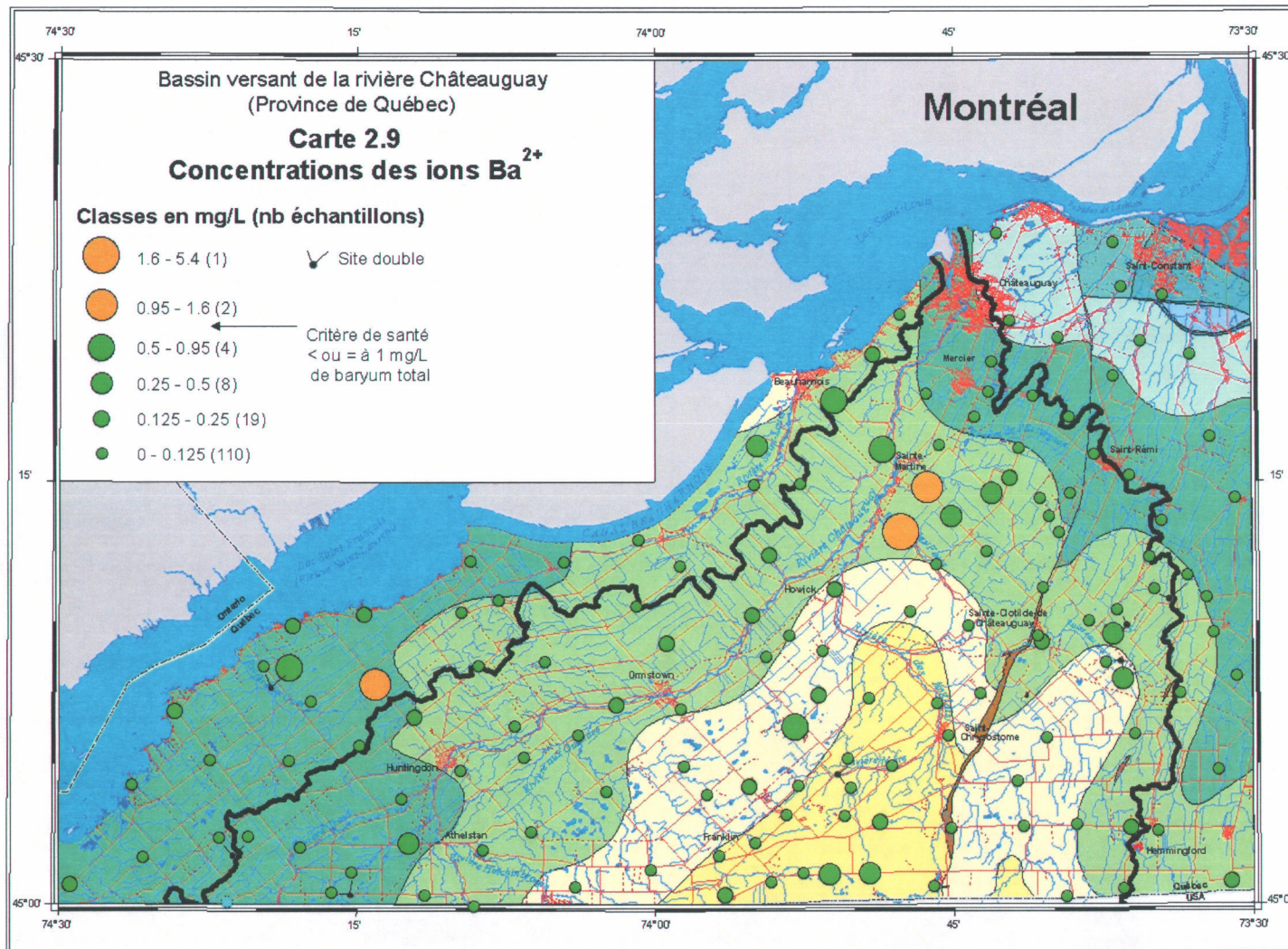
**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada

Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)














**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette

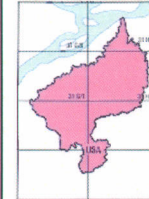


## Légende

### Géologie

-  Fm. Nicolet
-  Shale d'Utica
-  Brèche de Havelock
-  Fm. Tétreauville
-  Mb Saint-Michel
-  Fm. Deschambault
-  Gr. Black River
-  Fm. Laval
-  Fm. Beauharnois
-  Fm. Theresa
-  Fm. Cairnside
-  Fm. Covey Hill
-  Limites du bassin

### CARTES SNRC

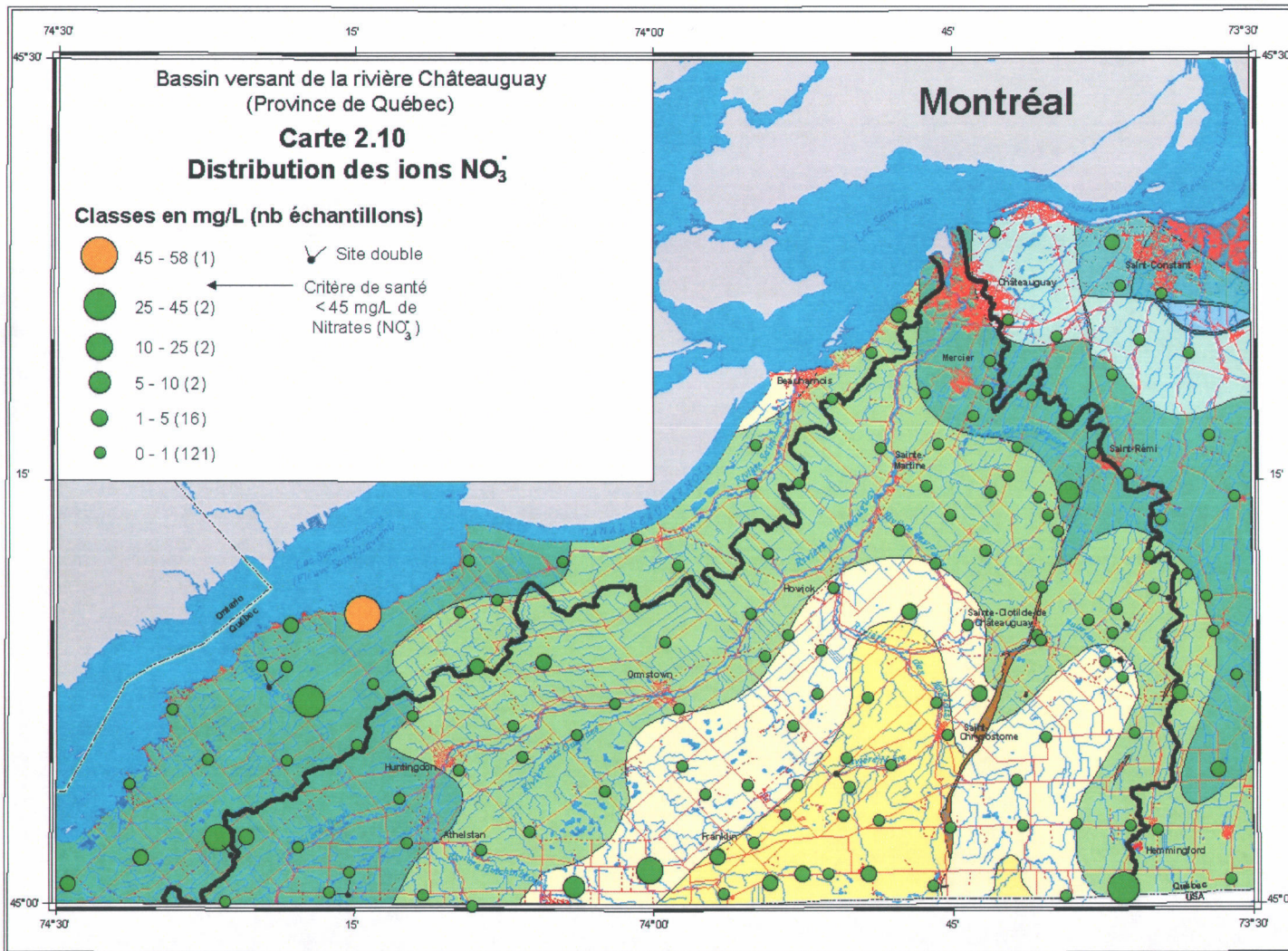


Échelle 1/250 000  
5 2.5 0 5 km

### Sources des données

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)  
**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18  
**Auteur**  
Daniel Blanchette





### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétéreville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

Limites du bassin

**CARTES SNRC**

Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 Km

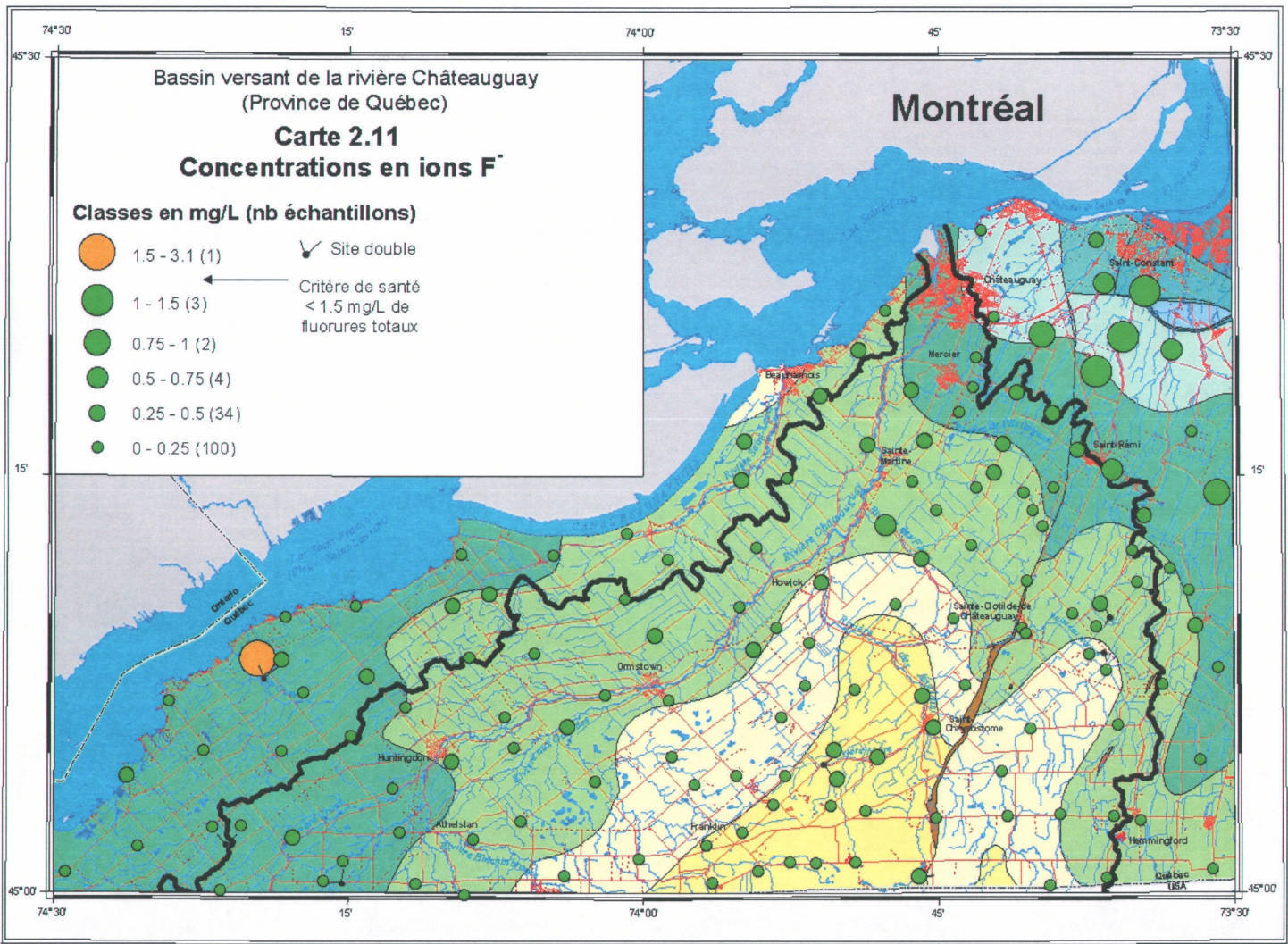
**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada

Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

**CARTES SNRC**

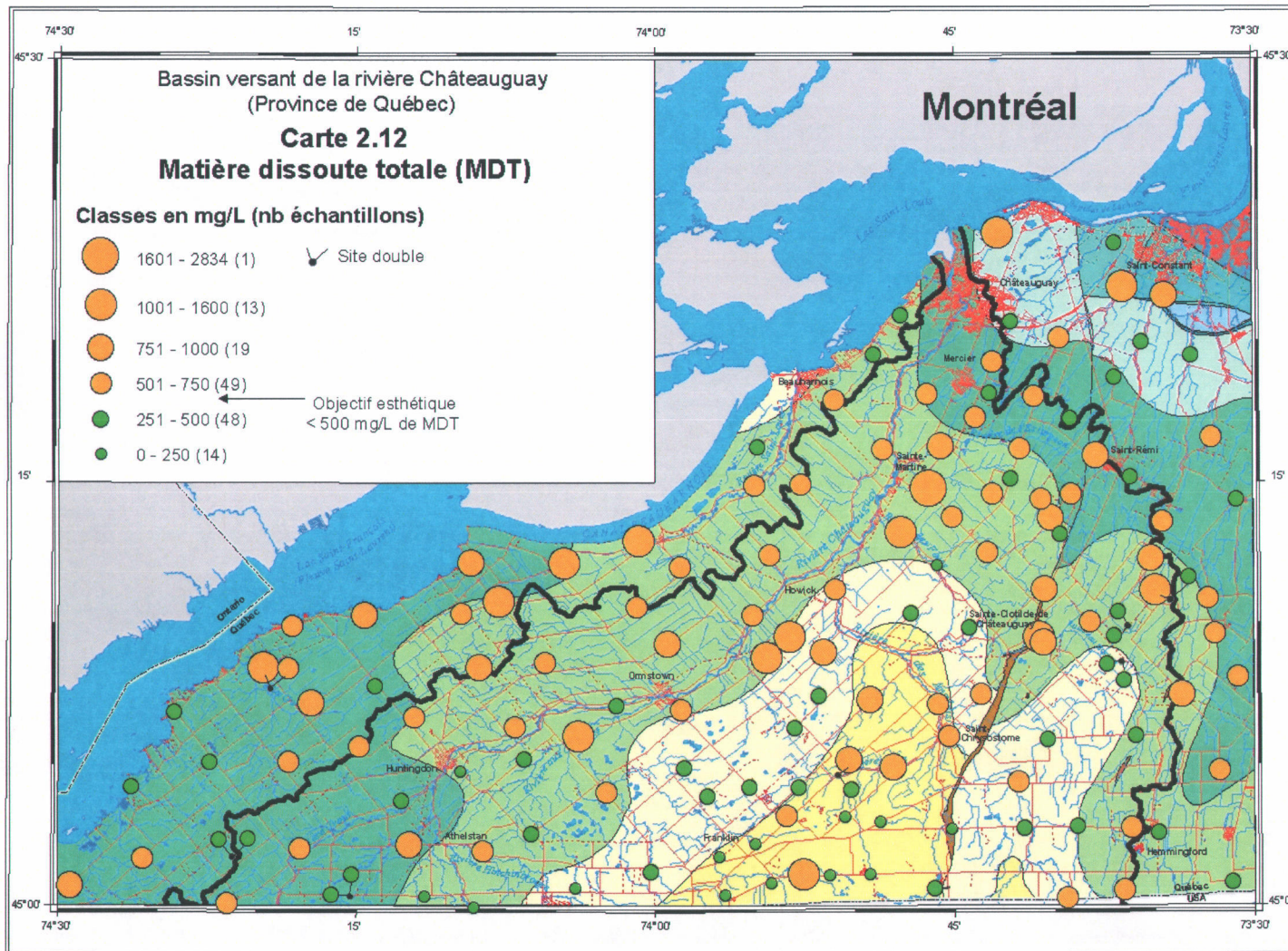
Échelle 1/250 000

**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

CARTES SNRC

Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 Km

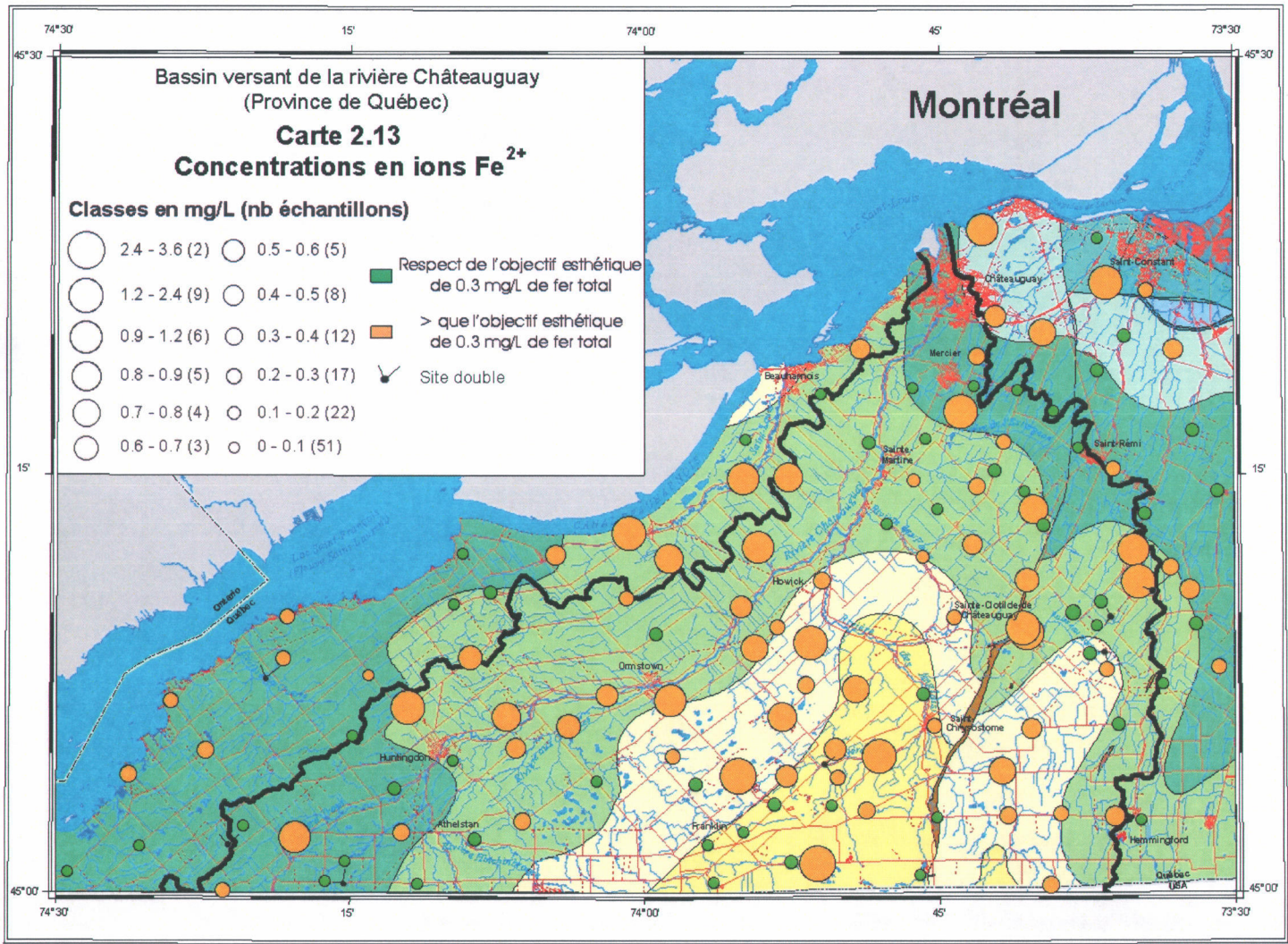
**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada

Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1967)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

#### Géologie

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

CARTES SNRC

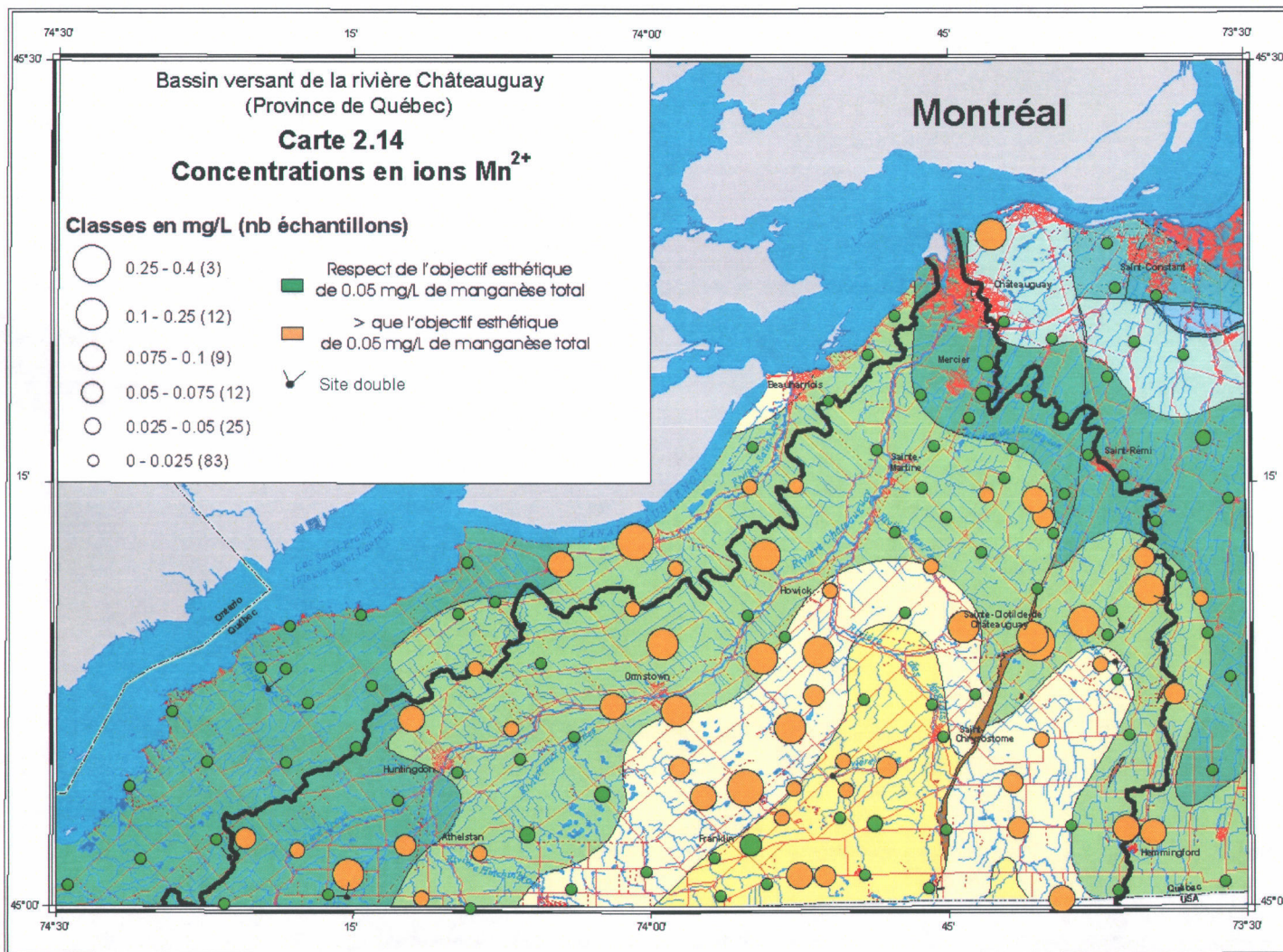
Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 km

**Sources des données**  
Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

CARTES SNRC

Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 Km

**Sources des données**

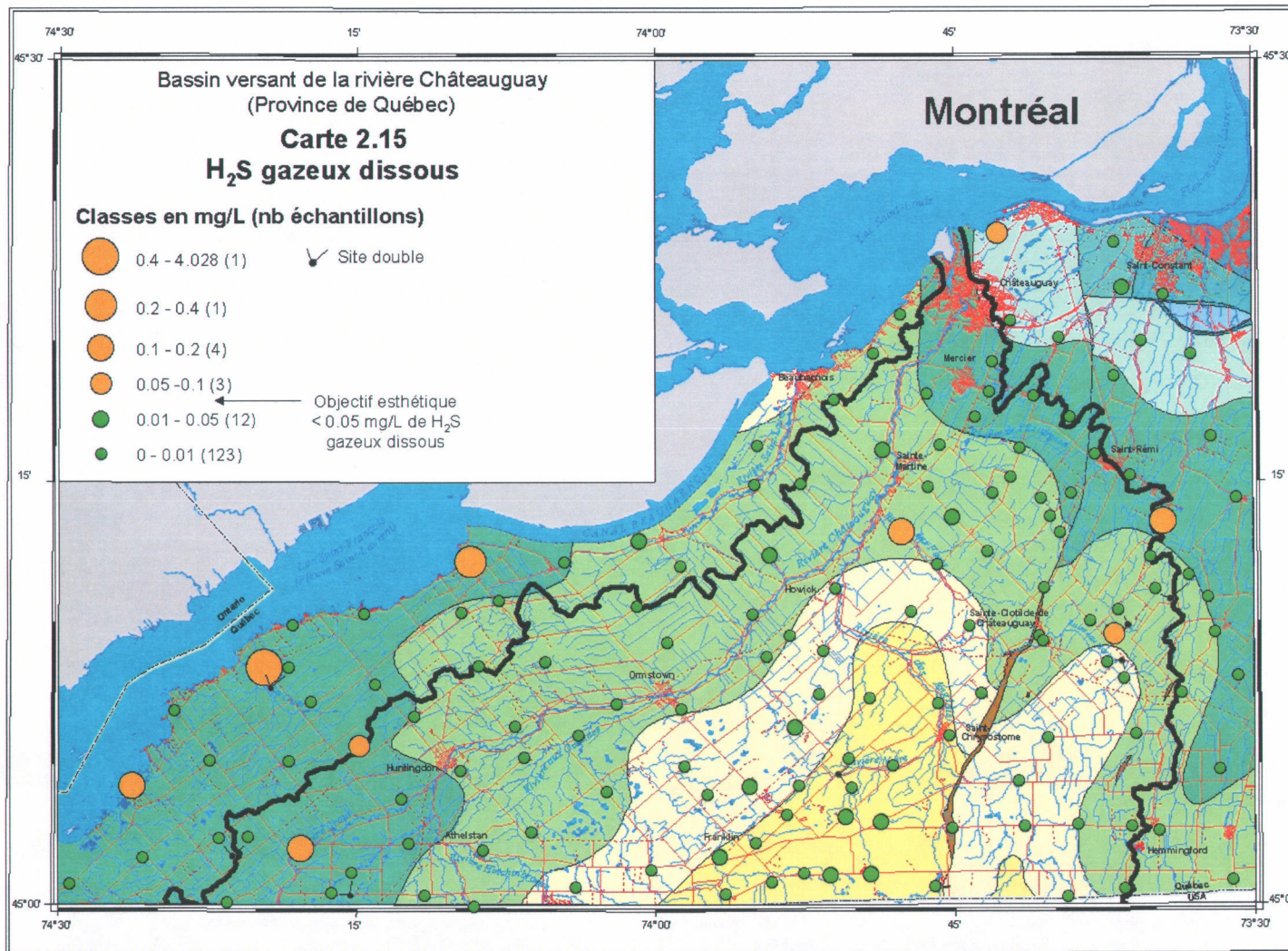
Fond de carte numérique  
Géomatique Canada

Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette





### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétéreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

— Limites du bassin

**CARTES SNRC**

Échelle 1/250 000

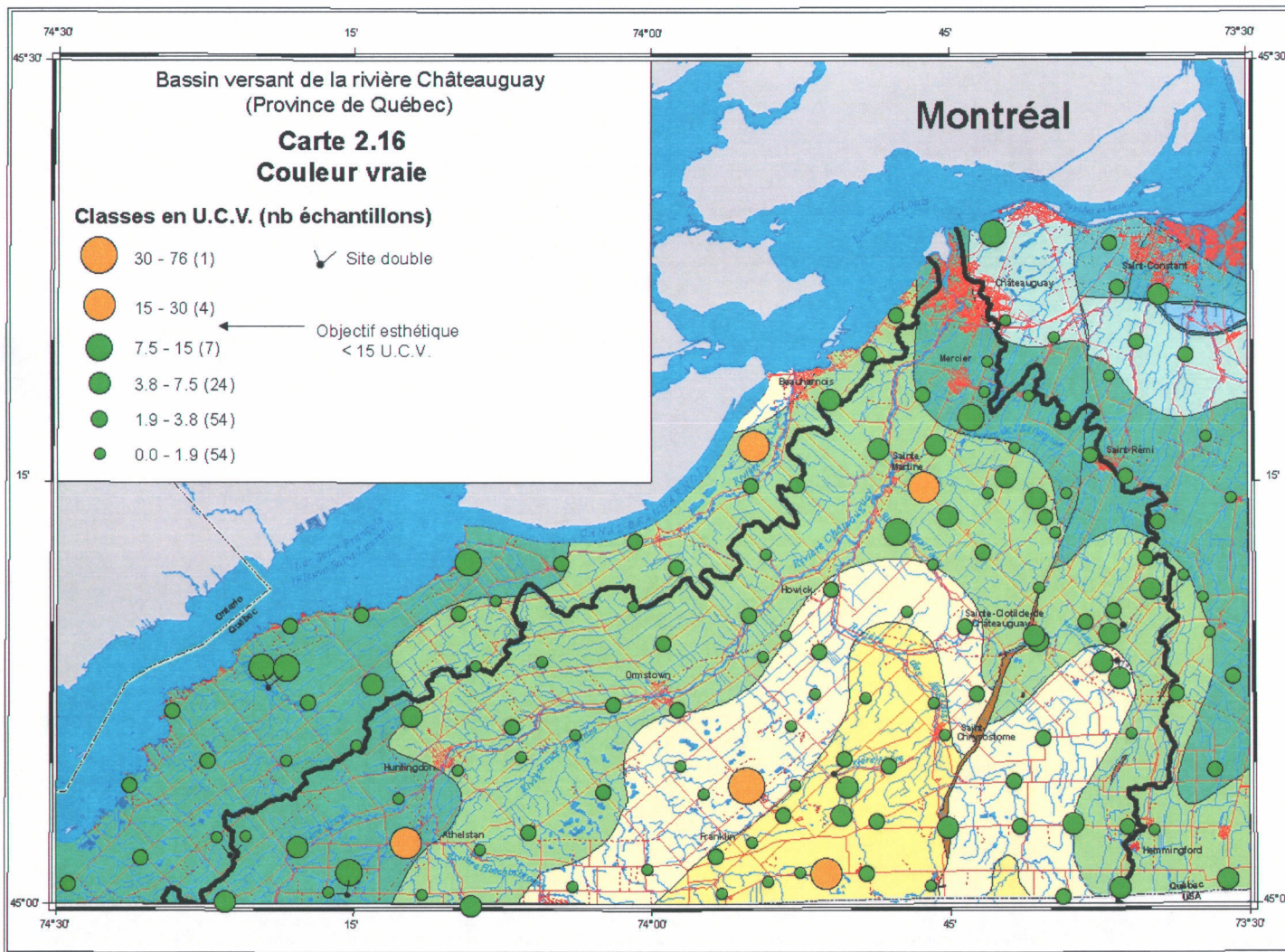
5    2.5    0    5 Km

**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

Limites du bassin

CARTES SNRC

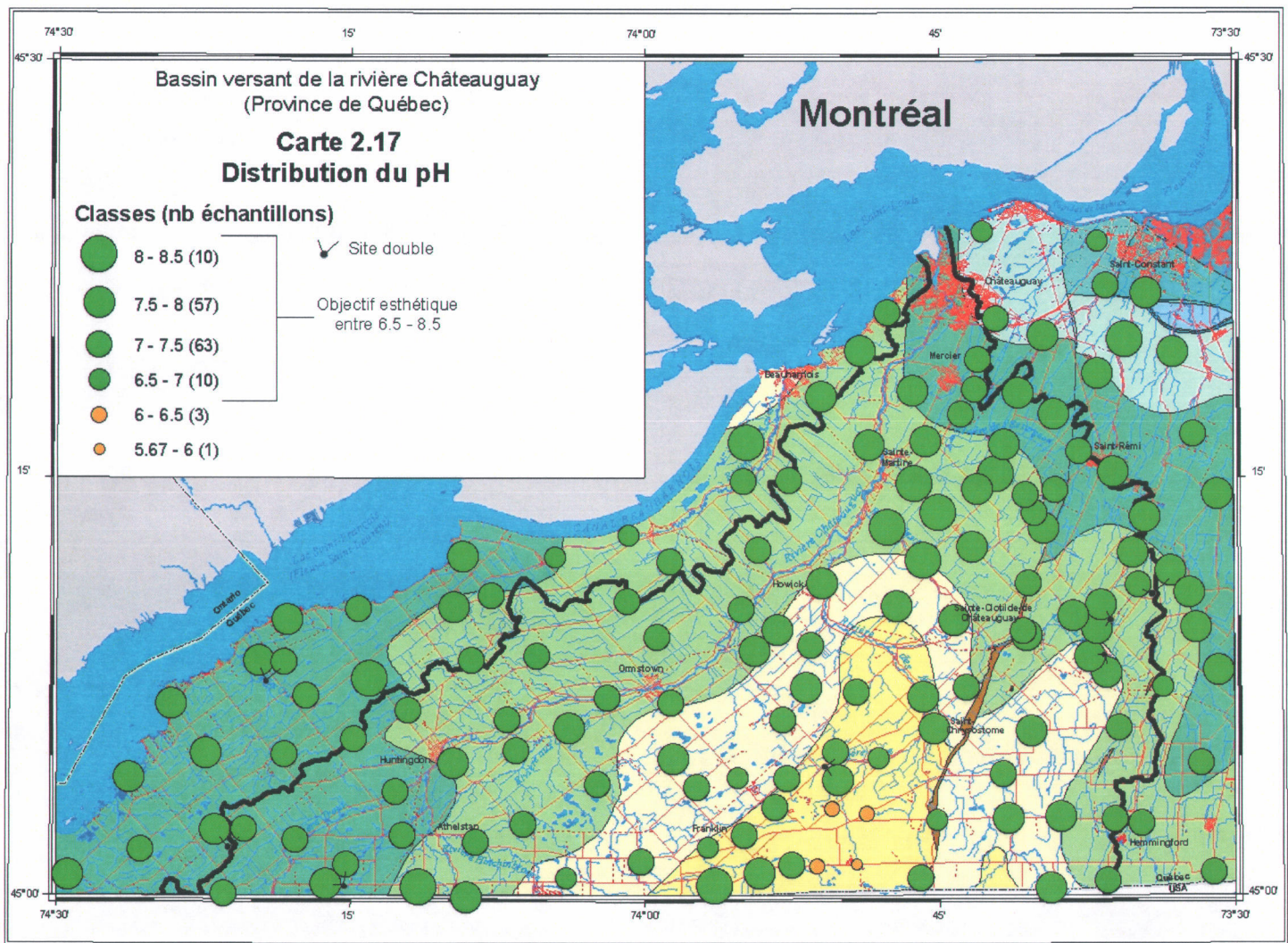
Échelle 1/250 000

**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)

**Projection**  
UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**  
Daniel Blanchette



### Légende

**Géologie**

- Fm. Nicolet
- Shale d'Utica
- Brèche de Havelock
- Fm. Tétreauville
- Mb Saint-Michel
- Fm. Deschambault
- Gr. Black River
- Fm. Laval
- Fm. Beauharnois
- Fm. Theresa
- Fm. Cairnside
- Fm. Covey Hill

Limites du bassin

**CARTES SNRC**

N  
W E  
S

Échelle 1/250 000

5 2.5 0 5 Km

**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada  
Fond de carte géologique  
adapté de Globensky (1987)








**Projection**  
UTM NAD 83 Zone

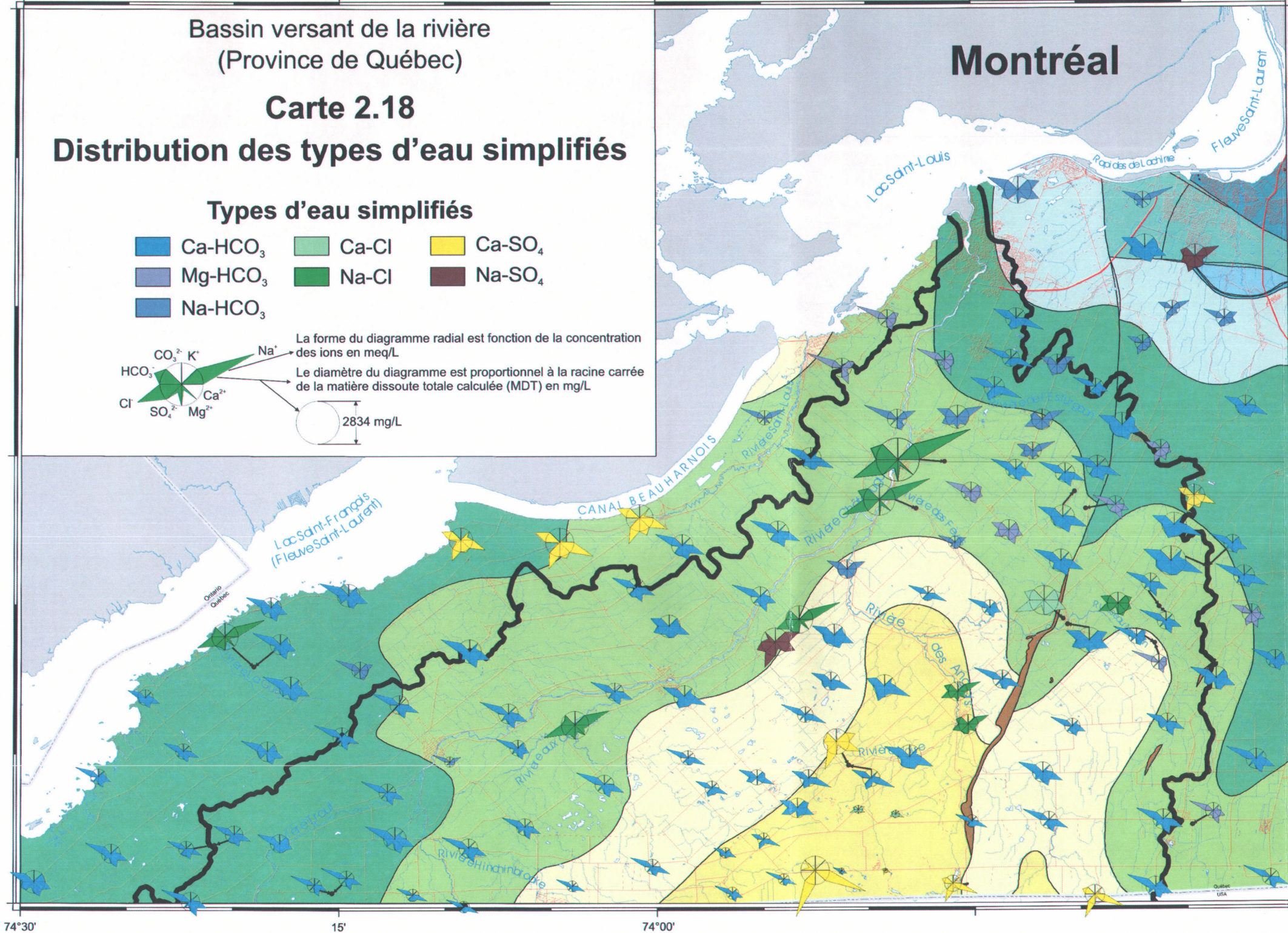
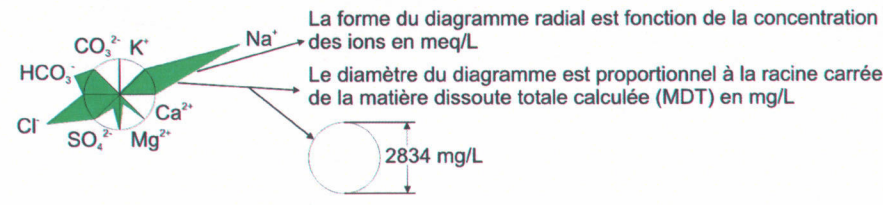
**Auteur**  
Daniel Blanchette

Bassin versant de la rivière  
(Province de Québec)

## Carte 2.18

### Distribution des types d'eau simplifiés

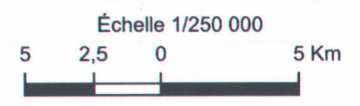
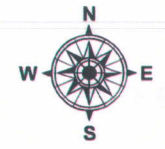
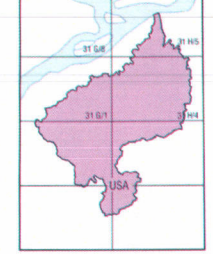
- Types d'eau simplifiés**
- |   |   |   |
|---|---|---|
|  Ca-HCO <sub>3</sub> |  Ca-Cl |  Ca-SO <sub>4</sub> |
|  Mg-HCO <sub>3</sub> |  Na-Cl |  Na-SO <sub>4</sub> |
|  Na-HCO <sub>3</sub> |   |   |



## Légende

- Géologie**
-  Formation de Nicolet
  -  Shale d'Utica
  -  Brèche de Havelock
  -  Formation de Tétéreauville
  -  Membre de Saint-Michel
  -  Formation de Deschambault
  -  Groupe de Black River
  -  Formation de Laval
  -  Formation de Beauharnois
  -  Formation de Theresa
  -  Formation de Cairnside
  -  Formation de Covey Hill
-  Limites du bassin

CARTES SNRC



**Sources des données**

Fond de carte numérique  
Géomatique Canada

Fond de carte géologique  
Adapté de Globensky (1987)

**Projection**

UTM NAD 83 Zone 18

**Auteur**

Daniel Blanchette

## **ANNEXE J**

### **Interprétation de la section géochimique C-C'**

## **Interprétation de la section géochimique C-C'**

La section géochimique C-C' (Figure I1) présente l'évolution géochimique des concentrations des ions et de la matière dissoute totale (MDT) de l'eau souterraine entre la Covey Hill et le fleuve Saint-Laurent. Par contre, comme pour les sections géochimiques A-A' et B-B', la rivière Châteauguay est considérée comme la zone d'émergence principale du bassin versant de la rivière Châteauguay. Bien que des conditions confinées dominent aux abords de cette rivière selon, l'eau souterraine peut émerger à partir des quelques endroits où il y a la présence de roc affleurant ou recouvert de matériaux perméables.

Le début de l'évolution se fait plus en aval sur la Covey Hill. L'eau a initialement des concentrations plus élevées que pour les sections A-A' et B-B' avec une valeur de MDT de 183 mg/L pour l'eau souterraine de la station CH-122. La tendance générale indique une augmentation des concentrations jusqu'au fleuve Saint-Laurent pour atteindre une MDT de 1226 mg/L à la station CH-036. Le comportement des ions indique que les processus qui semblent être responsables de cette augmentation des concentrations sont la dissolution des carbonates (dolomie, calcite), du gypse et de l'halite sans oublier l'échange ionique. Ceci est aussi suggéré par les figures 2.5, 2.6 et 2.9 du chapitre 2. Il y a peu d'indices qui indiquent des recharges locales le long de cette section à l'exception de l'échantillon de la station CH-061. À cet endroit, l'évolution géochimique est marquée par une légère diminution pour certains paramètres tels que  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et MDT. Cette diminution suivant les interprétations des sections A-A' et B-B' serait le résultat d'une dilution de l'eau plus évoluée et plus ancienne par une eau plus fraîche et plus jeune. Cette recharge locale peut avoir lieu aux environs de la limite du bassin versant qui montre une élévation de la surface du roc. Les limites du bassin versant ont été traitées comme des zones de recharge dans le cadre de cette étude. L'évolution de la MDT entre les stations CH-095 (774 mg/L) et CH-061 (532 mg/L) suggère que cette dilution de l'eau souterraine soit non négligeable.

Des augmentations notables des concentrations de  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont observées entre les stations CH-101 et CH-132 ainsi que de la station CH-006 vers la station CH-095. Aucune donnée ne porte à croire à la présence d'eau plus saline qui porterait la signature de l'eau de l'ancienne mer de Champlain. Comme il est indiqué sur la coupe géologique, ces augmentations peuvent être le résultat de zones où l'eau souterraine est

## **ANNEXE K**

**Base de données sur CD**

## **Description du CD de données**

### **Dossier K1:**

Fichier Caractéristiques\_puits (Fichier Excel)

Description: Caractéristiques techniques des puits échantillonnés

Fichier Explications\_champs\_fichier\_caractéristiques\_puits.pdf

Description: Signification des entêtes de colonnes

Fichier Résultats\_brutes\_analyses\_chimiques.xls

Description: Données brutes physico chimiques et analyses chimiques

### **Dossier K2**

Fichier Données\_entrées\_spéciation\_PHREEQC.txt

Description: Fichier texte des données utilisées pour la spéciation dans PHREEQC

Fichier\_entrée\_spéciation\_PHREEQC.pqi (Ouvrir avec Wordpad)

Description: Format d'entrée de données pour PHREEQC

Fichier\_sortie\_spéciation\_\_PHREEQC.pqo (Ouvrir avec Wordpad)

Description: Fichier texte du résultat de la spéciation

Fichier Données\_sortie\_spéciation\_PHREEQC (Ouvrir avec Wordpad)

Description: Résultats de la spéciation sous forme de tableau

### **Dossier K3:**

Fichier AnnexeC\_tableau\_C1.xls: Caractéristiques techniques des puits

Fichier AnnexeF\_tableaux\_F1\_F2\_F3.xls: Données chimiques brutes

Fichier AnnexeF\_tableau\_F4.xls: Paramètres chimiques modélisés et calculés

Fichier AnnexeF\_tableau\_F5.xls: Indice de saturation (SI)

Fichier AnnexeG\_tableaux\_G1\_G2.xls: Statistiques descriptives des données chimiques brutes en fonction des contextes géologiques et hydrogéologiques

Fichier AnnexeH\_tableau\_H1.xls: Statistiques descriptives en fonction des types d'eau

Fichier AnnexeH\_Tableau\_H2.xls: Statistiques descriptives en fonction des clusters d'eau souterraine



**REPROGRAPHIE DE LA REMISE FINALE  
DU MÉMOIRE OU DE LA THÈSE**

Lors de la remise finale de mon mémoire ou de ma thèse, les photocopies ont été effectuées par :

l'étudiant(e) : Daniel Blanchette

*Les photocopies effectuées par l'étudiant(e)  
seront sous sa responsabilité.*

Daniel BLANCHETTE

Nom

Daniel Blanchette

Signature

Nom du directeur de recherche: René Lefebvre

Nom du co-directeur de recherche: Miroslav Nastev

Boursier ou non-boursier: Boursier