

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

HYDROGÉOCHIMIE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX RÉGIONAL EN MONTÉRÉGIE EST, QUÉBEC

Par

Châtelaine Beaudry, ing.

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences, M.Sc. en sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Examineur externe	Dr Luc Aquilina Géosciences Rennes Université de Rennes, Rennes, France
Examineur interne	Dr John Molson Université Laval, Québec (Québec)
Directeur de recherche	Dr René Lefebvre INRS-ETE, Québec (Québec)
Codirecteurs de recherche	Dr Vincent Cloutier UQAT, Amos (Québec) Dre Christine Rivard RNCAN, CGC Québec (Québec)



RÉSUMÉ

L'étude hydrogéochimique régionale en Montérégie Est a été réalisée dans le cadre d'un projet de caractérisation hydrogéologique financé en grande partie par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) du Québec. Le projet a été réalisé par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), la Commission géologique du Canada (CGC), l'Institut de recherche en agroenvironnement (IRDA) et l'OBV Yamaska avec la contribution de plusieurs partenaires régionaux. Le territoire à l'étude, la Montérégie Est, s'étend sur environ 9 000 km² dans le sud du Québec. Il comprend trois bassins versants et est caractérisé par une variété de contextes géologiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques. En fonction de particularités communes basées essentiellement sur la géologie, la région a été divisée en cinq contextes hydrogéologiques: les Basses-terres du Saint-Laurent à l'intérieure desquelles se distinguent les parties nord et sud en fonction de l'épaisseur des sédiments superficiels, les Hautes-terres appalachiennes sculptées par le passage des glaciers (il y a plus de 16 000 ans), le Piémont appalachien qui est transitoire entre les hautes et les basses terres, ainsi que les sept intrusifs d'âge Crétacé, correspondant aux Collines montérégiennes, alignés d'ouest en est au centre de la région.

Les objectifs de l'étude étaient de dresser un portrait global de la qualité des eaux souterraines, d'identifier les différents groupes d'eau associés au système aquifère rocheux régional, d'établir des relations entre ceux-ci, ainsi que d'identifier et comprendre les mécanismes contrôlant la chimie de ces groupes. Ultimement, le portrait hydrogéochimique de la région devrait aussi permettre d'améliorer la compréhension du système d'écoulement régional.

Cette étude est basée sur les caractéristiques physico chimiques, chimiques et isotopiques de 242 échantillons d'eau recueillis dans des puits aménagés dans les aquifères rocheux (86 %) et dans les aquifères granulaires (14 %). Des groupes d'eau ont été définis et interprétés à l'aide notamment de méthodes d'analyse statistique multivariée. L'analyse hiérarchique regroupée (*clustering*) a été utilisée pour définir des groupes d'eau ayant des caractéristiques communes sur la base de 16 paramètres géochimiques. L'analyse en composantes principales a servi à faire l'interprétation des interactions entre les groupes en définissant des composantes géochimiques permettant de mieux expliquer la variabilité de la composition chimique de l'eau souterraine. Différentes analyses graphiques ont permis de compléter l'interprétation des mécanismes géochimiques importants. Huit groupes d'eau, composés d'échantillons ayant des caractéristiques similaires, ainsi que trois pôles géochimiques (*end-members*), permettent de décrire l'évolution géochimique de l'eau souterraine et les relations entre les types d'eau. L'information géochimique permet aussi de mieux comprendre la dynamique du système aquifère régional.

La qualité des eaux souterraines de la région à l'étude est en général assez bonne, car peu de dépassements des normes ont été observés. Par contre, une vaste zone (~2 200 km²) au nord-ouest de la région contient de l'eau saumâtre, impropre à la consommation. Celle-ci est liée à l'invasion des aquifères par l'eau de l'ancienne Mer de Champlain qui a occupé la vallée du Saint-Laurent pendant approximativement 1500 ans après la fin de la dernière glaciation, soit il y a environ 11 000 ans. Ces eaux souterraines saumâtres sont entourées par des eaux fortement alcalines et sodiques, en milieu captif à semi-captif, dont la composition est principalement contrôlée par le mécanisme d'échange ionique des minéraux argileux entre les cations Na⁺ et Ca²⁺, résultant du lessivage de l'eau d'origine marine et qui contrôle la composition de trois groupes d'eau. Une recharge des aquifères s'effectue en milieu semi-captif dans le sud des Basses-terres ainsi que dans le nord du Piémont. Ces eaux de recharge sont mélangées avec des eaux marines résiduelles. L'eau dans les Hautes-terres et le sud du Piémont est nettement moins chargée en ions, car les contextes géologiques favorisent une recharge plus importante de l'aquifère rocheux dans un environnement qui, en grande partie, n'a pas été affecté par l'invasion marine. Un type d'eaux relativement anciennes et évoluées est aussi largement présent dans les Hautes-terres ainsi que dans une partie du Piémont. Plusieurs questions demeurent cependant en suspens par rapport à leur origine, dont l'interprétation exigerait des données géochimiques plus spécifiques, telles que des résultats de datation à l'aide des gaz dissous.

En plus d'expliquer l'évolution géochimique de l'eau souterraine, cette étude a permis de fournir des informations essentielles à la compréhension régionale du système d'écoulement, incluant l'identification des zones de recharge et de résurgence, le temps relatif de résidence de cette eau en fonction des contextes hydrogéologiques, ainsi que des indications du faible écoulement dans la zone d'eau saumâtre se trouvant en conditions captives au nord-ouest de la région. Nos travaux démontrent d'ailleurs que le lessivage progressif des eaux marines n'est pas encore complété pour cette zone.

ABSTRACT

The groundwater chemistry of fractured-rock aquifers of the Montérégie Est region, in southern Quebec, Canada, was studied as part of a regional hydrogeological assessment project mainly funded by the Quebec Environment Ministry (Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, MDDEFP). This project was jointly carried out by the Institut national de recherche scientifique (INRS), the Geological Survey of Canada (GSC), the Institut de recherche en agroenvironnement (IRDA) and OBV Yamaska, along with a few other regional partners. The study area, which covers 9 000 km², includes three major watersheds and a variety of geological, hydrogeological and hydrogeochemical contexts. Five hydrogeological contexts were defined in the study area, mainly based on geology: the St. Lawrence Lowlands, which were subdivided in northern and southern parts since the former is overlain by thick continuous marine clay and silt deposits, the Appalachian Uplands that comprise glacial valleys and thin till deposits from the last glaciation (about 16 000 years ago), the Appalachian Piedmont, which is a transition zone between the Lowlands and the Uplands, and seven Cretaceous mafic intrusives forming the Monteregian Hills, which are aligned east-west at the center of the study area.

The objectives of the study were to assess groundwater of this vast area, identify water groups associated with the regional bedrock aquifer system, establish relationships between them, as well as identify and understand the mechanisms controlling groundwater composition of these groups. Ultimately, this groundwater quality assessment should also contribute to a better understanding of the regional groundwater flow system.

For this study, 242 water samples from bedrock aquifers (86%) and granular aquifers (14%) were obtained and analyzed for physico-chemical, chemical and isotopic parameters. Water groups were defined and interpreted using Multivariate Statistical Analysis methods. Hierarchical Cluster Analysis (HCA) was used to group samples into families having common characteristics based on 16 geochemical parameters. Principal Components Analysis (PCA) supported the understanding of relationships between water groups and their evolution through the definition of geochemical components that better explain the variability of groundwater composition. The use of a variety of geochemical graphs also supported the interpretation of the major geochemical processes. Eight water groups were defined and three end-members were identified, which describe the geochemical evolution of groundwater as well as the relations between water groups. The geochemical information also provided a better understanding of the regional aquifer dynamics.

The overall water quality is generally good in the Montérégie Est area, since a restricted number of parameters exceed drinking water limits. However, a wide 2 200 km² area containing non potable brackish groundwater was delineated in the north-western part of the study area. This brackish water is related to the Champlain Sea, which occupied the St. Lawrence valley for approximately 1 500 years after the end of the last glaciation, about 11 000 years ago. The

brackish water zone is surrounded by strongly Na-rich and alkaline groundwater, whose composition is mainly controlled by Na^+ - Ca^{2+} ion exchange. This water is characteristic of the freshening process caused by the mixing of fresh and saline waters. This important mechanism controls the composition of three water groups. Young groundwater, indicative of recharge zones, is encountered in the southern part of the Lowlands, in the north-western part of the Piedmont and in the Appalachian Uplands (mainly in the south-eastern part). Inside the former Champlain Sea limit, young waters are often mixed with residual brackish water. Fresh waters from the Uplands and southern Piedmont contain less TDS because topography and geology favor higher recharge rates in an environment has mostly not been affected by the marine invasion. Relatively old and evolved groundwater is present in the Uplands and part of the Piedmont. Many questions remain unanswered concerning the origin of this water, whose interpretation would require more specific geochemical data, such as dissolved gases dating datats.

Beside the contribution of this study to the understand of the geochemical evolution of groundwater, this study also significantly contributed to the understanding of the regional bedrock aquifer flow system by identifying recharge and discharge areas and groundwater relative travel time in the different hydrogeological contexts. It has also provided evidences of the slow groundwater flow that explains the presence of the brackish water zone, in which the progressive desalination process is still on-going.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet d'envergure n'aurait pas été possible sans la collaboration du MDDEFP, des partenaires régionaux, de la division Québec de la Commission géologique du Canada ainsi que de l'INRS-ETE. Je remercie sincèrement chacun des intervenants et tout particulièrement René Lefebvre (INRS-ETE), directeur de recherche du présent projet, avec qui j'ai énormément appris et qui s'est toujours montré disponible, ouvert aux discussions et très généreux pour partager ses connaissances. Merci à Christine Rivard (CGC), codirectrice de recherche ayant également démontré une grande disponibilité ainsi qu'une capacité à résoudre des problèmes en tout genre. Merci également à Vincent Cloutier (UQAT), codirecteur de recherche, pour ses connaissances en géochimie ainsi qu'à John Molson (U. Laval) et Luc Aquilina (U. de Rennes), réviseurs, qui ont accepté de sacrifier quelques heures de leurs vacances de Noël pour la lecture de ce mémoire. Je tiens aussi à remercier Daniel Blanchette et Laurie Tremblay, auteurs de travaux hydrogéochimiques inspirants et de qui j'ai pu recevoir de précieux conseils techniques. Je remercie également les assistants de terrain Rachel Thériault, Emmanuelle Millet, Jean-Bernard Kabran Gnankon, Marc Laurencelle et Jean-Sébastien Gosselin ainsi que les professionnels ayant assuré le succès général du projet, soit Marc-André Carrier, Harold Vigneault, Jean-Marc Ballard et Xavier Malet. Finalement, un merci tout particulier aux collaborateurs spéciaux qui m'ont apporté une aide précieuse: Jessica Hutchings et Luc Massé. Sincères salutations à vous tous.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	3
1.1 CONTEXTE DES TRAVAUX.....	3
1.2 STRUCTURE DU MEMOIRE.....	4
1.3 PROBLEMATIQUE.....	5
1.4 OBJECTIFS	6
1.5 PORTRAIT DE LA MONTEREGIE EST	7
1.5.1 Géographie.....	7
1.5.2 Hydrologie.....	9
1.5.3 Géologie et hydrogéologie.....	11
CHAPITRE 2 : PRINCIPES ET MÉTHODES.....	17
2.1 PRINCIPES (REVUE DE LITTÉRATURE)	17
2.1.1 L'hydrogéochimie.....	17
2.1.2 La compréhension des systèmes d'écoulement.....	19
2.1.3 Études régionales	21
2.2 METHODOLOGIE DE COLLECTE DES DONNEES.....	23
2.2.1 Campagne d'échantillonnage.....	23
2.2.2 Programme analytique	27
2.3 METHODOLOGIE DE TRAITEMENT DES DONNEES	30
2.3.1 Validation des données.....	30
2.3.4 Indice de saturation.....	33
2.3.5 Analyse statistique.....	34
2.3.7 Isotopes de l'eau.....	36

DEUXIÈME PARTIE : ARTICLE ET RAPPORT

CHAPITRE 3 : ARTICLE	41
3.1 INTRODUCTION.....	43
3.2 STUDY AREA.....	43
3.3 MATERIALS AND METHODS	47
3.3.1 Data collection.....	47

3.3.2	<i>Data management</i>	47
3.3.3	<i>Data interpretation techniques</i>	47
3.4	RESULTS.....	49
3.4.1	<i>Multivariate Statistical Analysis</i>	49
3.4.2	<i>Geochemical characteristics of water groups</i>	52
3.4.3	<i>Spatial distribution of water groups</i>	55
3.4.4	<i>Groundwater dating</i>	57
3.4.5	<i>Water origins</i>	59
3.5	INTERPRETATION OF GEOCHEMICAL PROCESSES.....	60
3.5.1	<i>Origin of groundwater salinity</i>	60
3.5.2	<i>Freshening / Ion exchange</i>	63
3.5.3	<i>Mixing</i>	64
3.5.4	<i>Other mechanisms</i>	66
3.6	CONCEPTUAL MODEL AND DISCUSSION.....	68
3.7	CONCLUSIONS.....	72
CHAPITRE 4 : QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE		75
4.1	INTRODUCTION.....	75
4.1.1	<i>Problématique</i>	75
4.1.2	<i>Objectifs et méthodologie</i>	76
4.2	QUALITE D'EAU DES PUIITS.....	76
4.3	QUALITE D'EAU DES GROUPES.....	81
4.3.1	<i>Définition des huit groupes d'eau régionaux</i>	81
4.3.2	<i>Description de la qualité de l'eau par groupe</i>	84
4.3.3	<i>Provenance des composés affectant la qualité</i>	89
4.4	ZONES DE QUALITE D'EAU.....	91
4.4.1	<i>Zone d'eau « non potable »</i>	91
4.4.2	<i>Zone de qualité « passable »</i>	92
4.4.3	<i>Zone de qualité « acceptable »</i>	92
4.5	BILAN REGIONAL.....	94
CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS		97
RÉFÉRENCES		103

ANNEXES

ANNEXE A: CARTES GÉOLOGIQUES.....	111
. <i>Géologie du roc de la Montérégie Est</i>	
. <i>Géologie du Quaternaire de la Montérégie Est</i>	
ANNEXE B: RÉSUMÉ DU PROTOCOLE DE PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS D'EAU SOUTERRAINE DU PROGRAMME D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LES EAUX SOUTERRAINES AU QUÉBEC.....	117
ANNEXE C: PROTOCOLE DE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS D'EAU INTERSTITIELLE DES ARGILES MARINES DE LA MONTÉRÉGIE EST.....	133
ANNEXE D: PROTOCOLE DE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS D'EAU DE PRÉCIPITATIONS.....	143
ANNEXE E: ANALYSES EN LABORATOIRES : LABORATOIRES, MÉTHODES ET RÉSULTATS.	147
. E.1 : Laboratoires.....	148
. E.2 : Méthodes analytiques.....	149
. E.3 : Résultats analytiques brutes.....	151
Tableau E.3 : Paramètres <i>In Situ</i> et classifications	
Tableau E.4 : Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)	
Tableau E.5 : Indices de saturation (SI)	
ANNEXE F: TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES.....	187
Tableau F.1 : Fichier d'entrée pour l'analyse statistique multivariée	
Tableau F.2 : Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP)	
ANNEXE G: FICHIERS ÉLECTRONIQUES (PRÉSENTÉS SUR DISQUE COMPACT)	
. <i>Compilation des informations relatives à chacun des échantillons prélevés : localisation, type d'échantillon, provenance, résultats analytiques et autres informations pertinentes (fichier Excel)</i>	
. <i>Rapport « Délimitation des eaux souterraines saumâtres en Montérégie Est, Québec, Canada »</i>	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Localisation géographique de la Montérégie Est.	8
Figure 1.2: Présentation des cinq contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est sur fond topographique.	9
Figure 1.3: Présentation des trois principaux bassins versants de la Montérégie Est.	10
Figure 1.4: Évaluation du niveau de confinement selon la nature et l'épaisseur des dépôts d'argile et de till.	15
Figure 2.1: Réactions et processus géochimiques contrôlant la composition de l'eau souterraine dans un système aquifère à l'échelle régionale (adapté de Hounslow (1995) et de Cloutier (2004)).	17
Figure 2.2: Localisation, sur fond topographique, hydrographique et routier, de chacun des échantillons prélevés dans le cadre de l'étude.	24
Figure 2.3: Exemples des types de puits échantillonnés.	26
Figure 2.4: Résultats en $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de précipitation.	36
Figure 3.1: <i>Montérégie Est location and physiographic contexts.</i>	44
Figure 3.2: <i>Confinement level of aquifers of Montérégie Est and location of the brackish area, in the North.</i>	46
Figure 3.3: <i>Results of the MSA. A) Tree diagram resulting from the Cluster Analysis and defining the 8 water groups. B) Spatial distribution of the 190 samples. C) 1st and 2nd component of the PCA for the 190 samples.</i>	50
Figure 3.4: <i>Composition in major ions. A) Piper diagram. B) Stiff diagrams.</i>	52
Figure 3.5: <i>Average pe and pH values for each of the eight water groups</i>	54
Figure 3.6: <i>Geographical distribution of the eight water groups in Montérégie Est.</i>	55
Figure 3.7: <i>A) Water groups dating with tritium (^3H is in tritium units (T.U.)) and radiocarbon (^{14}C is in years before present (BP)). B) Groundwater isotopic composition illustrated by groups and compared to the Basses-Laurentides meteoric water line.</i>	59
Figure 3.8: <i>Sea water mixing. Typical Br / Cl ratio illustrates dilution of seawater by fresh water. Champlain Sea water is composed of 34% of seawater diluted by fresh water.</i>	61
Figure 3.9: <i>Carbonate dissolution mechanism dominant for water groups A1 and LL. A) Saturation index of calcite and dolomite. B) Ca / HCO_3 ratio (in mmol/L) with the 1:2 dissolution line (dashed line).</i>	62
Figure 3.10: <i>Evidence of freshening due to Na-Ca ion exchange. A) Gibbs' representation of the mechanism controlling world water chemistry. B) Ca versus Na concentrations in mmol/L (logarithmic scales) featuring the drastic decrease of Ca, typical for a freshening mechanism.</i>	63
Figure 3.11: <i>Mixing mechanisms explained with end-members. A) 1st and 2nd components of PCA showing the end-members and illustrating the mixing between water groups. b) Relative concentrations of major cations (X axis) and major anions (Y axis), similar to a Piper plot, supporting the explanation based on PCA.</i>	65
Figure 3.12: <i>Hypothesis for barium ionic exchange. A) The variations in Ba concentrations. B) Ionic exchange effects on Ba and Ca concentrations.</i>	66
Figure 3.13: <i>Desorption of fluoride from kaolinite when pH > 7.5.</i>	67

Figure 3.14: <i>Conceptual model of groundwater geochemical evolution in Montérégie Est.</i>	68
Figure 3.15: <i>Geochemical conceptual model represented by a schematic cross-section from the Appalachian Uplands to the St. Lawrence River.</i>	70
Figure 4.1: Localisation des dépassements des critères de qualité d'eau pour chacun des 237 puits étudiés.	78
Figure 4.2 : Localisation spatiale des huit groupes d'eau	82
Figure 4.3: Délimitation des zones de qualité de l'eau souterraine à l'échelle régionale à l'aide de trois classes de qualité relative : « non potable », « passable » et « acceptable ».	93
Figure 4.4 : Concentrations en azote (N) associées aux nitrites (NO ₂) et nitrates (NO ₃) pour les eaux souterraines de la Montérégie Est.	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Structure du mémoire	4
Tableau 1.2: Principaux groupes lithostratigraphiques des Basses-terres en Montérégie Est.	12
Tableau 2.1 : Détail de la provenance des échantillons d'eau souterraine.	26
Tableau 2.2: Paramètres physico-chimiques mesurés <i>in situ</i> et en laboratoire.	28
Tableau 2.3: Paramètres chimiques mesurés en laboratoire pour chacun des échantillons d'eau souterraine.	29
Table 3.1: <i>Loading value of each of the 16 parameters for the first 5 components of the PCA.</i>	51
Table 3.2: <i>Descriptive statistics (25, 50 and 75th centiles) for groundwater geochemical parameters for water groups</i>	53
Table 3.3: <i>Descriptive statistics (25, 50, and 75th centiles) for tritium and radiocarbon data.</i>	58
Tableau 4.1: Nombre de puits dépassant les critères applicables, pour chacun des paramètres, en fonction du type d'aquifère.	78
Tableau 4.2: Description sommaire des huit groupes d'eau identifiés en Montérégie Est.	83
Tableau 4.3: Proportion de puits (en pourcentage) dont l'eau dépasse les critères applicables, pour chacun des paramètres, en fonction des groupes d'eau.	85

**HYDROGÉOCHIMIE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX RÉGIONAL
EN MONTÉRÉGIE EST, QUÉBEC**

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Contexte des travaux

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec (PACES), mis sur pied en 2008 par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) du Québec. L'objectif global du programme est de dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines des territoires municipalisés du Québec, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité (MDDEFP, 2012b). Le Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE), a été mandaté en 2009 pour la réalisation du projet PACES couvrant la région de la Montérégie Est. Le projet est réalisé en collaboration avec la Commission géologique du Canada (CGC-Québec), pour qui ce projet s'inscrit également dans son programme d'hydrogéologie ainsi que dans une étude conjointe avec la US Geological Survey portant sur un aquifère interfrontalier reconnu par l'organisme ISARM (*Internationally Shared Aquifer Resources Management*). La réalisation du projet profite aussi de la participation de l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et de l'organisme de bassin versant de la Yamaska, ainsi que de la collaboration de nombreux partenaires régionaux (Conférence régionale des élus (CRÉ), municipalités régionales de comté (MRC), organismes de bassins versants (OBV)).

Le volet hydrogéochimique du projet PACES en Montérégie Est constitue l'essentiel des travaux décrits dans ce mémoire. Il sera question de qualité d'eau dans un contexte d'approvisionnement en eau potable, mais les caractéristiques chimiques des eaux seront également interprétées globalement dans le but de mieux comprendre l'hydrodynamique de la région et ainsi servir d'outil complémentaire à la compréhension de l'écoulement régional.

Les conclusions du présent mémoire seront notamment utilisées dans le cadre du rapport final du projet du PACES en Montérégie Est (Carrier et al., 2013) afin de dresser un portrait de la qualité des eaux souterraines, mais surtout afin de contraindre, compléter ou supporter l'interprétation

des conditions d'écoulement menant à la présentation d'un modèle conceptuel d'écoulement régionale. Mentionnons également les travaux de doctorat de Marc Laurencelle (Laurencelle et al., 2012) qui proposeront un modèle conceptuel détaillé de l'écoulement régional dans l'aquifère rocheux de la Montérégie Est ainsi que les travaux de doctorat de Jean-Sébastien Gosselin (Gosselin et al., 2012) qui proposeront une évaluation de la recharge du système d'écoulement de la Montérégie Est. Ces études utiliseront également l'interprétation hydrogéochimique à titre de contrainte à leurs travaux respectifs.

1.2 Structure du mémoire

Afin de favoriser la diffusion des résultats de l'étude hydrogéochimique, les travaux sont présentés sous forme de mémoire par article. La structure du mémoire est constituée de 5 chapitres, répartis en deux parties (tableau 1.1). La première partie présente le contexte détaillé des travaux ainsi que les principes et méthodes. La seconde partie du mémoire est composée de trois chapitres distincts : 1) soit un article scientifique, correspondant au cœur du présent mémoire, 2) un rapport portant sur la qualité de l'eau souterraine dans la région et qui constituera un chapitre du rapport final du projet PACES-Montérégie Est et 3) les conclusions générales découlant de cette étude géochimique. Les annexes complètent l'ouvrage.

Tableau 1.1: Structure du mémoire

Première partie : Contexte

- . Chapitre 1 : Introduction
- . Chapitre 2 : Principes et méthodes

Deuxième partie : Article et rapport

- . Chapitre 3 : Article (*Hydrogeochemistry of Regional fractured rock aquifers in Montérégie Est, Québec, Canada*)
- . Chapitre 4 : Qualité de l'eau souterraine
- . Chapitre 5 : Conclusions

Annexes

De façon plus détaillée, le premier chapitre présente la problématique et les grands objectifs de l'étude et dresse un portrait géographique, hydrographique et hydrogéologique de la région. Le second chapitre propose une revue de la littérature et présente en détail la méthodologie

employée. L'article, soit le chapitre 3, a pour but de mettre en valeur le traitement des données, de proposer une interprétation des mécanismes hydrogéochimiques opérant dans la région et ultimement, de contribuer à la compréhension du système aquifère à l'aide des données géochimiques. Il est important de mentionner que l'article est construit de façon à ne pas répéter inutilement les notions abordées dans les autres chapitres, mais également de façon à présenter en détail la méthodologie de traitement des données et l'interprétation qui en découle. Ainsi, la structure de l'article étant adaptée au contexte du présent mémoire, il est prévu d'y apporter des modifications avant de la soumettre pour publication, notamment au niveau de la revue de littérature. Quant au chapitre 4, il sera intégré au rapport final du projet PACES (Carrier et al., 2013). Il vise à informer le MDDEFP et les différents intervenants régionaux sur l'état de la qualité des eaux souterraines en Montérégie Est. Les conclusions du mémoire, au chapitre 5, viennent compléter la deuxième partie. Les annexes compilent les informations détaillées sur les méthodes utilisées pour la réalisation des travaux ainsi que les données analytiques.

1.3 Problématique

Le projet PACES en Montérégie Est se veut multidisciplinaire et vise à améliorer la compréhension de l'hydrodynamique des aquifères, entre autres en quantifiant les propriétés hydrogéologiques de ces derniers et en définissant la qualité de l'eau souterraine à l'échelle régionale. Ceci impliquait notamment l'élaboration d'une base de données hydrogéologique régionale incluant les caractéristiques chimiques de différents échantillons d'eau souterraine prélevés sur l'ensemble du territoire. La compilation de ces caractéristiques chimiques et leur comparaison avec les critères et recommandations applicables pour l'eau potable au Québec (Gouvernement du Québec, 2012; Santé Canada, 2012) ont permis de dresser un portrait de la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale. Ce portrait, présenté de façon cartographique, pourra ensuite servir d'outil aux différents décideurs et intervenants régionaux au niveau de l'exploitation et de la protection de la ressource en eaux souterraines.

Différents enjeux régionaux majeurs avaient été identifiés à partir des informations disponibles en début de projet, suscitant ainsi plusieurs questionnements auxquels les connaissances acquises dans le cadre du projet permettront de répondre :

- Des eaux souterraines saumâtres occupent la partie nord de la région. Proviennent-elles réellement de la Mer de Champlain? Pourquoi n'ont-elles pas été lessivées à ce jour?
- Où se situent les zones de recharge et d'émergence de l'eau souterraine?
- Existe-t-il un lien hydraulique entre les aquifères et les cours d'eau?

Ainsi, en plus de fournir un portrait de la qualité régionale de l'eau, les données géochimiques recueillies dans le cadre du projet PACES ont été exploitées de façon à fournir des réponses, ou au moins des éléments de réponses, à ces importantes questions.

1.4 Objectifs

Cinq grands objectifs ont été poursuivis dans la présente étude :

1. Construire une base de données géochimique représentative de la Montérégie Est;
2. Dresser un portrait de la qualité des eaux souterraines dans un contexte d'utilisation de la ressource pour l'approvisionnement et évaluer l'influence des processus naturels sur la qualité des eaux. Les informations ainsi recueillies sur la qualité de l'eau pourront servir d'outil aux intervenants régionaux pour la gestion de la ressource;
3. Identifier et définir les différents types d'eau de la région à l'aide des propriétés physico-chimiques des eaux et les contextes géologiques et hydrogéologiques présents, selon des méthodes graphiques et statistiques proposées dans la littérature;
4. Identifier et expliquer les effets des principaux processus géochimiques qui contrôlent les caractéristiques physico-chimiques des types d'eau;
5. Interpréter la présence, dans différents contextes hydrogéochimiques, des groupes d'eau définis dans le but de mieux comprendre la dynamique régionale d'écoulement et ainsi étayer et compléter les réponses proposées aux grands enjeux régionaux identifiés par le projet de caractérisation régionale.

1.5 Portrait de la Montérégie Est

La région d'étude s'étend sur 9036 km² et est située à l'extrême sud du Québec, immédiatement à l'est de la ville de Montréal (figure 1.1). Elle est bordée au nord-ouest par le fleuve Saint-Laurent et au sud par les états américains de New York et du Vermont. Les neuf MRC (municipalités régionales de comté) comprises dans la Conférence régionale des élus (CRÉ) de la Montérégie Est constituent 82 % du territoire étudié (CRÉ Montérégie Est, 2012). De petits territoires satellites appartenant aux quatre CRÉ voisines, soit celles de la Vallée-du-Haut-Saint-Laurent, de Longueuil, de l'Estrie et du centre du Québec viennent également se greffer à la région à l'étude. Ces territoires satellites ont été incorporés afin de couvrir la totalité des bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska, ainsi que de la Baie Missisquoi.

1.5.1 Géographie

La CRÉ de la Montérégie Est comprend 107 municipalités (CRÉ Montérégie Est, 2012). Plus de la moitié de son territoire est utilisé à des fins agricoles. Les villes les plus peuplées sont Sorel-Tracy au nord, Saint-Hyacinthe au centre, Granby dans l'est et St-Jean-sur-Richelieu au sud-ouest (figure 1.1). L'extrême ouest du territoire de la CRÉ constitue la banlieue éloignée de Montréal.

La région à l'étude peut être divisée en cinq contextes hydrogéologiques bien distincts sur la base de la géologie. Ces contextes correspondent également à des conditions physiographiques distinctes (figure 1.2). On retrouve, d'ouest en est, la plate-forme du Saint-Laurent qui occupe les Basses-terres (celle-ci est divisée en parties nord et sud en fonction de l'épaisseur de la couverture d'argile marine), la zone externe des Hautes-terres appalachiennes qui constitue le piémont appalachien et la zone interne qui est représentée par les Hautes-terres appalachiennes à proprement dit. Le cinquième contexte, les Collines montérégiennes, est discontinu et traverse les quatre précédents contextes. Ces collines sont au nombre de 7 dans la région d'étude, soit, d'ouest en est, les monts Saint-Bruno, Saint-Hilaire, Rougemont, Saint-Grégoire, Yamaska, Shefford et Brome.

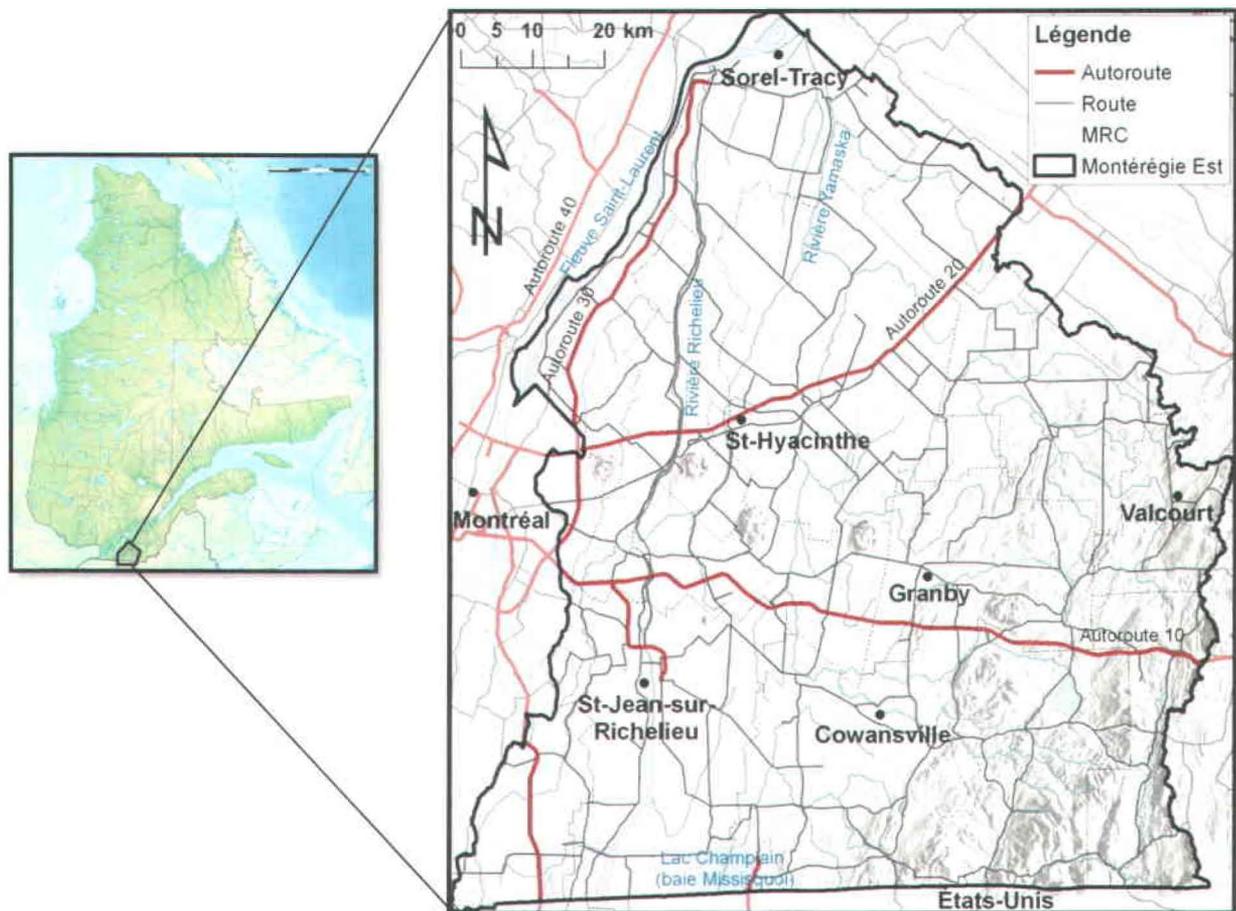


Figure 1.1: Localisation géographique de la Montérégie Est.

Les Basses-terres du Saint-Laurent couvrent la moitié ouest du territoire. La topographie est généralement plane et les sols sont grandement exploités pour des activités agricoles. Le Piémont fait la transition entre la plaine et les montagnes appalachiennes. Son relief est plus accentué, mais l'agriculture y est toujours présente. À l'est, les Hautes-terres appalachiennes ont un caractère plus forestier et moins rural. La population est nettement moins dense, sauf dans certaines vallées. Les montagnes aux sommets arrondis culminent à des élévations variant entre 210 et 540 m. Les sept Collines montérégiennes percent littéralement la plaine dans l'ouest et se confondent aux montagnes appalachiennes dans l'est. Leurs altitudes varient entre 218 m (mont Saint-Bruno) et 553 m (mont Brome). Elles sont en partie reconnues comme zones de villégiature et aires protégées, mais celles-ci sont également exploitées pour la culture maraîchère et l'on y retrouve quelques carrières.

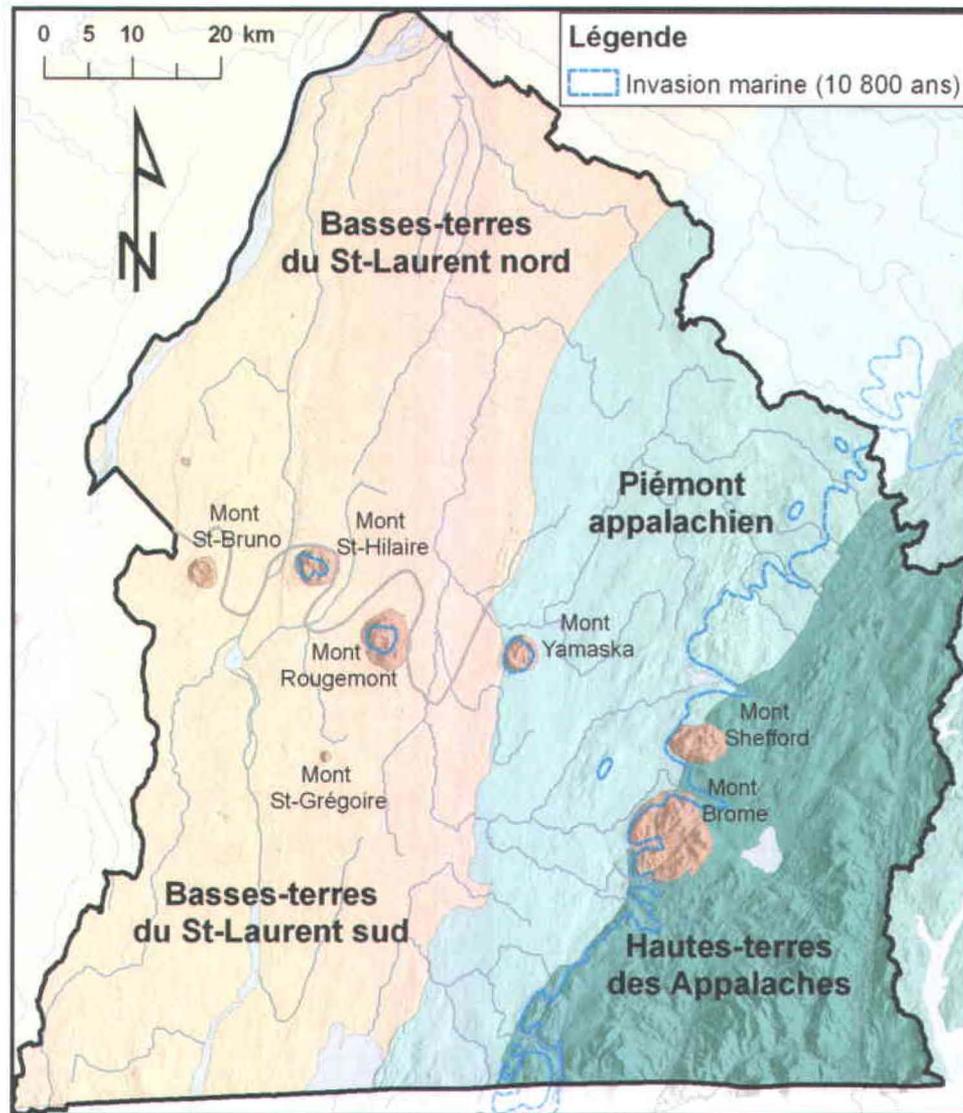


Figure 1.2: Présentation des cinq contextes hydrogéologiques de la Montérégie Est sur fond topographique: les Basses-terres du Saint-Laurent nord et sud (beige), le Piémont appalachien (vert pâle), les Hautes-terres des Appalaches (vert) ainsi que les Collines montérégiennes (brun). La limite maximale approximative de l'invasion de la Mer de Champlain apparaît en trait pointillé bleu à proximité de la limite entre le piémont et les Hautes-terres (Parent et Occhiotti, 1988).

1.5.2 Hydrologie

La région est divisée en 3 bassins versants, soit ceux des rivières Richelieu et Yamaska ainsi que de la baie Missisquoi (figure 1.3).

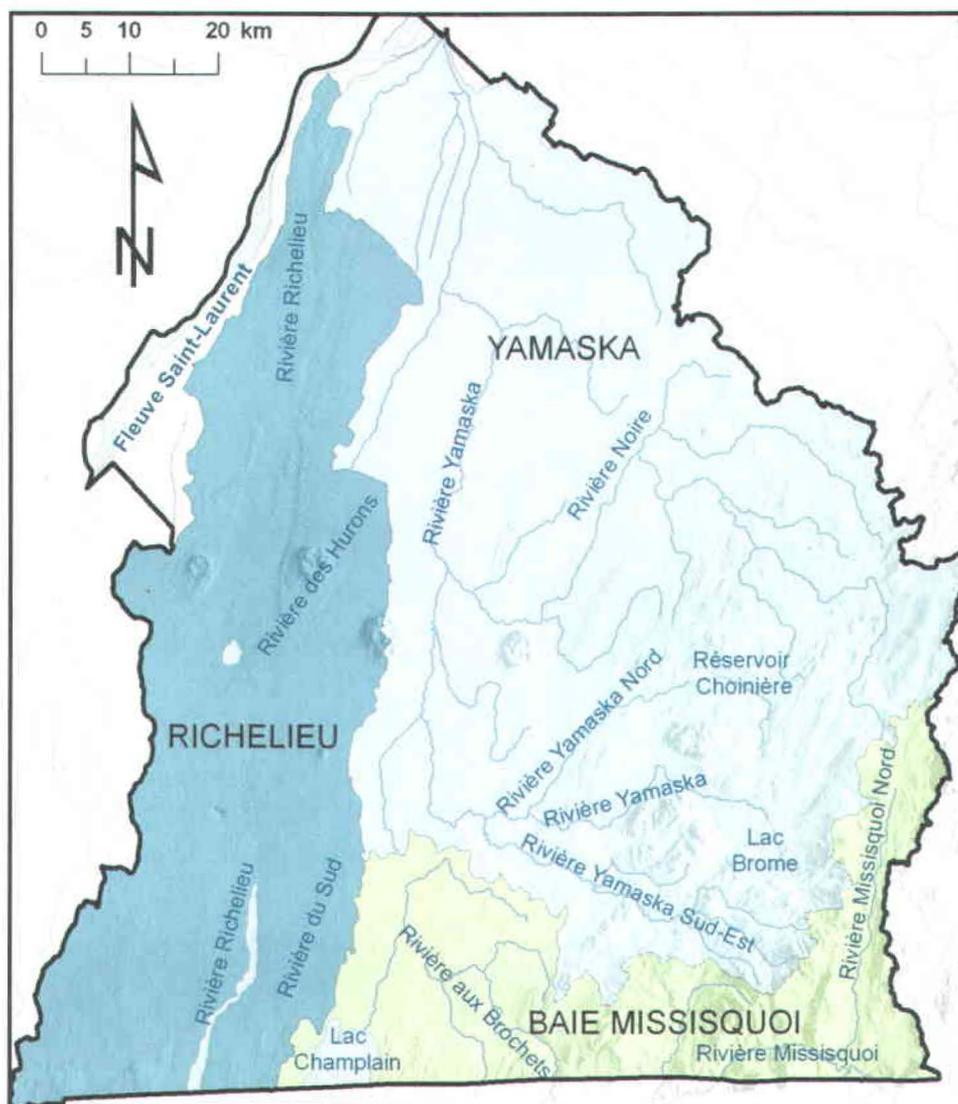


Figure 1.3: Présentation des trois principaux bassins versants de la Montérégie Est: les bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska, et de la baie Missisquoi.

Bassin de la rivière Yamaska

Le bassin versant de la rivière Yamaska, d'une superficie de 4 784 km² est le seul à être entièrement situé en territoire québécois. Les principaux cours d'eau du bassin sont la rivière Yamaska, prenant sa source dans le lac Brome et se déversant dans le fleuve Saint-Laurent, ainsi que les rivières Noire, Yamaska Nord et Yamaska Sud-Est, qui sont toutes des affluents de la rivière Yamaska. Les autres plans d'eau de superficie considérable sont les lacs Roxton, Shefford et Yamaska ainsi que les réservoirs Choinière et Boivin (OBV Yamaska, 2012).

Bassins de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi

Les bassins de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi sont tous deux des sous-bassins du grand bassin versant du lac Champlain, dont le territoire est partagé entre le Québec, du côté canadien, et les états du Vermont et de New York, du côté américain. La partie québécoise du bassin de la rivière Richelieu couvre 2 506 km² et celle du bassin de la baie Missisquoi couvre 1 315 km². Elles totalisent un peu plus de 16 % de la superficie totale du bassin du lac Champlain (COVABAR, 2012). Les principaux cours d'eau du bassin de la baie Missisquoi sont les rivières Missisquoi, Missisquoi Nord ainsi que la rivière aux Brochets, coulant toutes en direction du Lac Champlain. Les cours d'eau importants du bassin de la Richelieu sont, outre la rivière Richelieu, les rivières des Hurons et du Sud (OBV de la baie Missisquoi, 2012).

1.5.3 Géologie et hydrogéologie

Les différents contextes physiographiques présentés précédemment à la figure 1.2 correspondent également à des contextes géologiques et hydrogéologiques distincts. Chacun d'eux a subi l'influence de la dernière glaciation. La dernière grande glaciation a eu pour effet d'arrondir les sommets et de sculpter des vallées, laissant au passage des dépôts de surface caractéristiques. Les glaciers se sont progressivement retirés vers le nord, laissant pénétrer de l'eau marine à l'intérieur des terres, ces dernières ayant subi un affaissement isostatique sous le poids des glaces de 2 à 3 km de hauteur. C'est ainsi, il y a environ 12 000 ans, que la Mer de Champlain envahissait les Basses-terres ainsi qu'une grande partie du piémont (voir figure 1.2). L'eau marine s'est rendue jusqu'au pied des Hautes-terres appalachiennes au maximum de sa transgression il y a environ 11 000 ans (figure 1.2), à environ 170 m d'altitude, puis s'est progressivement retirée sur une période d'environ 1 500 ans (Bourque, 1997; Parent et Occhietti, 1988).

Géologie du roc

La carte géologique du socle rocheux de la Montérégie Est, présentée en annexe A, correspond à une compilation des travaux réalisés par Globensky (1985) pour la plate-forme du Saint-Laurent, de ceux de Slivitzky et Saint-Julien (1987) réalisé pour la région de l'Estrie-Beauce, et de ceux

de Brisebois et Nadeau (2003) qui avaient travaillé sur la géologie de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent.

Le socle rocheux de la région des Basses-terres du Saint-Laurent est constitué d'une plate-forme sédimentaire peu déformée datant principalement du Cambrien et de l'Ordovicien (Globensky, 1985). On y retrouve surtout des shales rouges, des shales noirs, des dolomies et des calcaires. Le tableau 1.2 dresse un portrait plus détaillé des principaux groupes lithostratigraphiques rencontrés.

Tableau 1.2: Principaux groupes lithostratigraphiques des Basses-terres en Montérégie Est.

Groupes lithostratigraphiques	Lithologies principales
Lorraine	Calcaire, shale, grès
Queenston	Shale rouge, grès vert
Sainte-Rosalie	Ardoise, dolomie, mudstone non calcaireux, siltstone dolomitique
Chazy	Calcaire cristallin, shale
Beekmantown	Grès dolomitique, dolomie, calcaire
Trenton	Calcaire cristallin, shale
Black River	Calcaire, dolomie, grès

La limite entre les provinces géologiques de la plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches correspond à la Ligne de Logan, une importante zone de failles. Elle traverse le bassin versant de la rivière Yamaska du nord au sud en frôlant au passage le mont Yamaska, puis la rive est de la baie Missisquoi.

Les Appalaches, chaîne de montagnes érigée au Dévonien et couvrant tout le sud-est du Québec, sont formées de roches de marge continentale ayant subi d'importantes déformations et un métamorphisme de faible intensité. Elles sont dominées par des assemblages de shales rouges et

grès verts, de schistes ardoisiers et dolomies ou de shales noirs et calcaires argileux (Slivitzky et Saint-Julien, 1987). On retrouve quelques volcanites et intrusions dans le Piémont.

Les Collines montérégiennes sont des massifs intrusifs généralement mafiques, parfois felsiques, d'âge Crétacé (Bédard, 2009). On retrouve sept plutons en Montérégie Est ayant été mis à nu par érosion différentielle : ceux-ci correspondent aux sept collines identifiées à la figure 1.2. Des anomalies gravimétriques, étudiées par des techniques géophysiques aéroportées, permettent d'y associer, plus en profondeur, de nombreux dykes mafiques et ultramafiques (Feininger et Goodacre, 1995). Ceux-ci sont essentiellement composés de syénites, de diorites et de gabbros.

Géologie du Quaternaire

Une carte de la géologie du Quaternaire est également présentée en annexe A. Cette carte correspond à une compilation des travaux de Gaucher (1984) et de Prichonnet (1984) à l'échelle 1 :50 000, ayant été révisé et mis à jour par les travaux de Dubé-Loubert et Parent (2013) spécifiquement pour le PACES. Cependant, en date de rédaction de ce mémoire, la carte n'est pas encore disponible.

Les dépôts argileux (argile silteuse) de la Mer de Champlain recouvrent la majorité du territoire des Basses-terres. Les plus importantes épaisseurs d'argile sont rencontrées au nord des Collines montérégiennes où les sédiments peuvent atteindre plus de 60 m d'épaisseur par endroit. Du till est généralement présent sur le roc, parfois sous l'argile, particulièrement dans le nord et parfois en surface, surtout dans le sud des Basses-terres (Carrier et al., 2013). Une mince couche de sédiments fluviaux et sableux recouvre l'argile par endroit, soit au centre-nord des bassins des rivières Richelieu et Yamaska.

À l'endroit des anciennes rives de la Mer de Champlain, soit sur le Piémont, se retrouvent des sédiments sablo-graveleux littoraux ainsi que des tills remaniés. Dans la partie sud du piémont, le till est parfois recouvert de sédiments marins discontinus de faible épaisseur. Les Hautes-terres appalachiennes sont quant à elles recouvertes d'un till plus ou moins continu où percent de

nombreux affleurements rocheux. Les vallées appalachiennes contiennent, par endroit, d'importantes épaisseurs de dépôts meubles grossiers, pouvant constituer des aquifères granulaires, généralement recouverts de sédiments silteux.

Hydrogéologie

L'évaluation des conditions d'écoulement de l'eau souterraine (conditions de nappe libre, captive ou semi-captive) dans le socle rocheux a été réalisée dans le cadre du projet PACES (Carrier et al., 2013) et est illustrée à la figure 1.4. Cette évaluation est basée sur la nature et l'épaisseur des dépôts de surface. Les aquifères recouverts par plus de 5 m d'argile sont qualifiés de captifs. Les aquifères recouverts par moins de 5 m d'argile sont qualifiés de semi-captif. Une distinction s'applique toutefois aux dépôts de moins de 1 m quant à la présence ou non de till en surface. Les aquifères recouverts de toute autre configuration de dépôts de surface ou non recouverts de dépôts (roc affleurant) sont considérés libres.

Le nord des Basses-terres est caractérisé par la présence d'eau souterraine saumâtre dans l'aquifère rocheux fracturé qui est en condition captive à cause de la présence de l'épaisse couche de sédiments marins (silts et argiles de la Mer de Champlain). L'étendue des eaux saumâtres correspond approximativement à la zone ayant plus de 5 m d'argile sur la carte de la figure 1.4. Ces eaux saumâtres, dont l'origine est reliée à l'invasion de l'eau de la Mer de Champlain, présentent des concentrations en chlorures (Cl⁻) de plus de 250 mg/L, soit la limite du critère esthétique proposé par Santé Canada (2012). Les concentrations maximales en Cl⁻ répertoriées par le Système d'informations hydrogéologiques (SIH) (MDDEFP, 2012b) sont d'environ 7000 mg/L. Selon Cloutier et al. (2010), la Mer de Champlain présentait une eau dont les concentrations en matières dissoutes totales (MDT) étaient de l'ordre de 11 300 mg/L pour la région des Basses-Laurentides (nord-ouest de Montréal), soit une eau de mer (34 %) diluée par l'eau douce de fonte des glaciers et des précipitations (66 %). L'étendue de la zone d'eau saumâtre identifiée par les travaux de McCormack (1980) a été précisée par Beaudry et al. (2011) dans un rapport présenté intégralement en annexe G. Cette zone, évaluée à 2200 km², a été délimitée en fonction des valeurs disponibles de concentrations en chlorures (Cl⁻), en bromures (Br⁻), en MDT, ainsi que la conductivité électrique. Le sud des Basses-terres ainsi que

le Piémont présentent également des concentrations en chlorures considérables par endroits. Il s'agit possiblement d'endroits où les aquifères sont captifs à semi-captifs, ce qui a limité la recharge et donc le lessivage des eaux marines par la recharge des nappes (Beaudry et al., 2011). Les causes de la présence de ces eaux saumâtres seront discutées au chapitre 3.

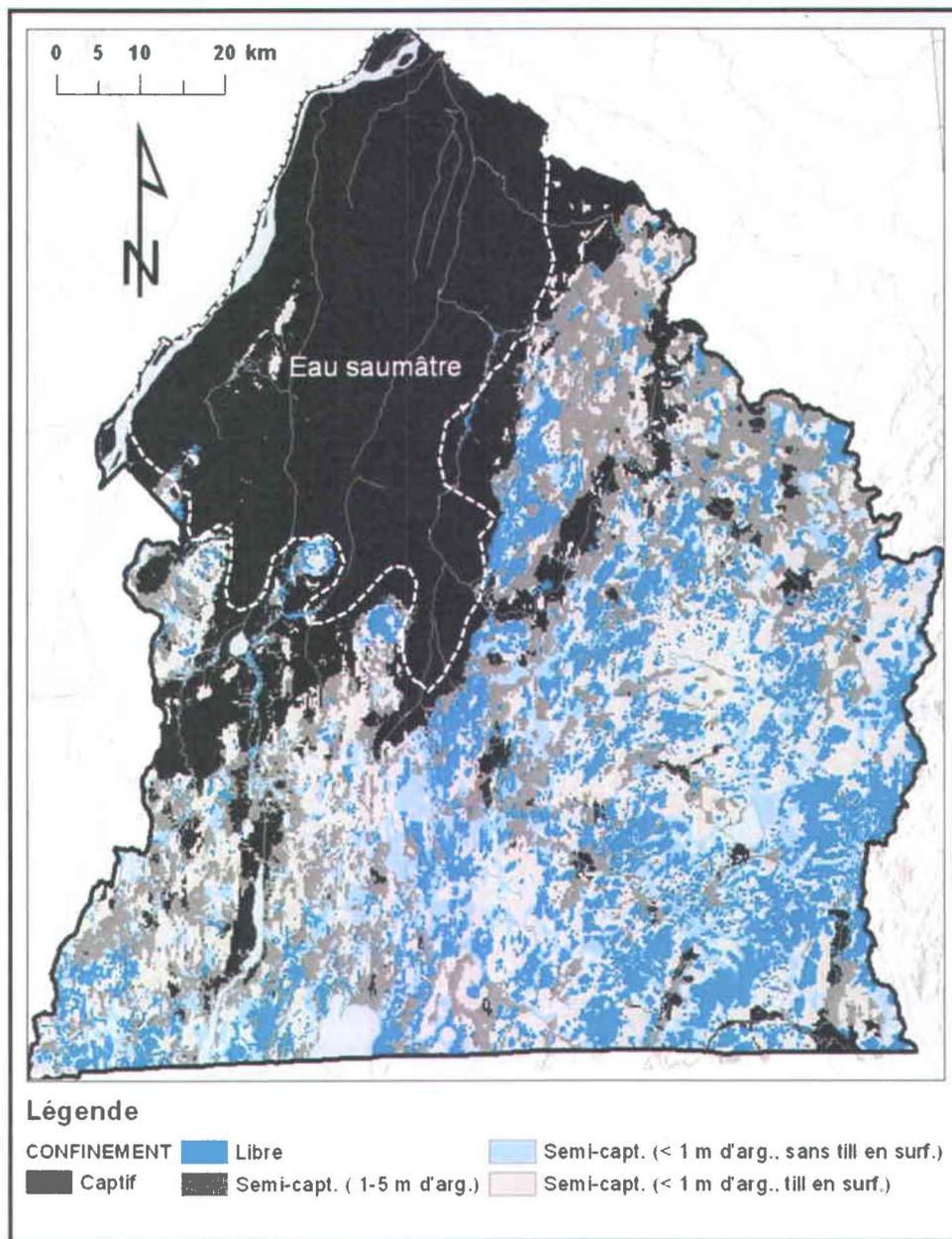


Figure 1.4: Évaluation du niveau de confinement selon la nature et l'épaisseur des dépôts d'argile et de till. La ligne pointillée blanche indique la limite des eaux souterraines saumâtres dans l'aquifère rocheux fracturé.

Des zones de recharge potentielle sont identifiées dans le sud des Basses-terres et le Piémont, bien que les dépôts marins et glaciaires (till) diminuent par endroit la recharge. Les conditions de recharge dans les Hautes-terres appalachiennes sont également variables spatialement et dictées par la couverture de till. Une des questions d'intérêt pour l'étude hydrogéochimique est à savoir si la dynamique d'écoulement dans les Hautes-terres appalachiennes s'effectue localement à l'échelle des vallées ou si une influence plus significative se fait sentir à l'échelle régionale. Cette question sera également abordée au chapitre 3.

CHAPITRE 2 : PRINCIPES ET MÉTHODES

2.1 Principes (revue de littérature)

2.1.1 L'hydrogéochimie

L'hydrogéochimie est la science qui explore les processus contrôlant la composition des eaux souterraines (traduction libre d'après Appelo et Postma (2005)). Selon Gibbs (1970), les trois mécanismes influençant la composition des eaux douces sont, par ordre croissant de concentrations en matières dissoutes totales (MDT ou sels) : les précipitations atmosphériques, la géologie ainsi que les processus d'évapo-cristallisation. Les ions dissous les plus notables résultant de ces mécanismes sont les ions sodium (Na^+) et les ions calcium (Ca^{2+}). Ceux-ci sont, tels qu'exposés ultérieurement dans ce mémoire, prépondérants dans le contexte régional de la Montérégie Est.

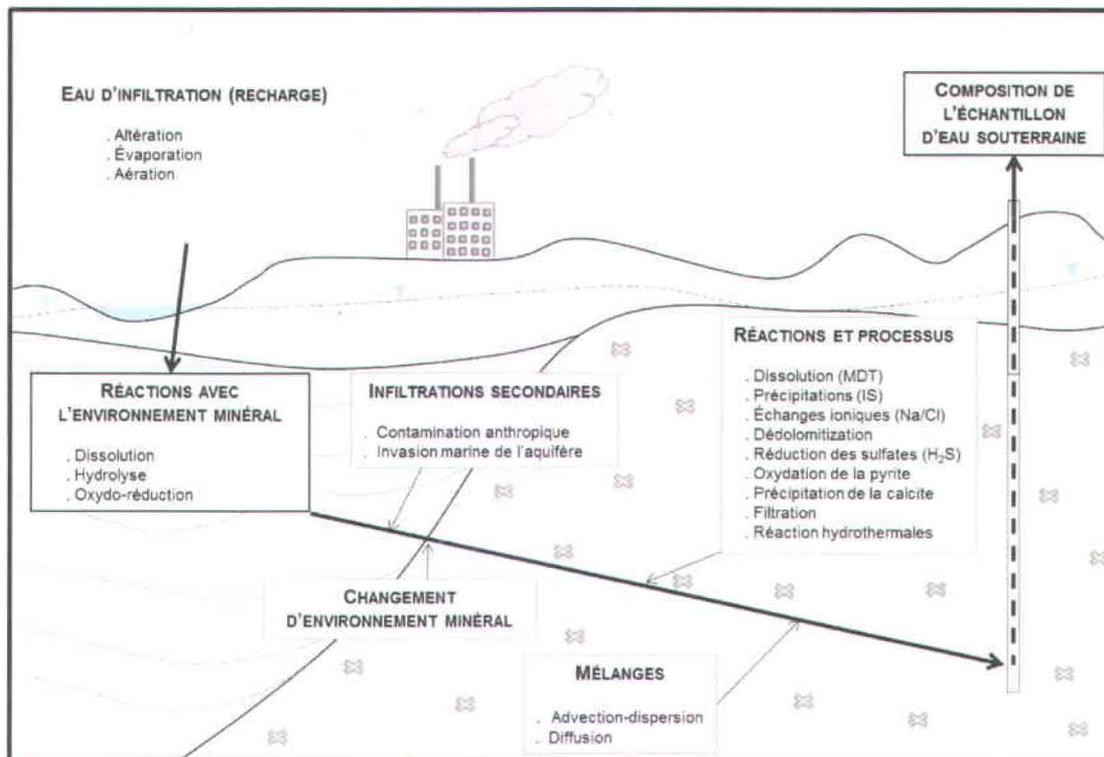


Figure 2.1: Réactions et processus géochimiques contrôlant la composition de l'eau souterraine dans un système aquifère à l'échelle régionale (adapté de Hounslow (1995) et de Cloutier (2004)).

L'interaction entre l'eau et son environnement minéral est décrite en détail par Hem (1985) et Hounslow (1995), qui traitent de la composition chimique des eaux naturelles. Hounslow (1995) énumère les processus chimiques qui influencent spécifiquement les eaux souterraines (figure 2.1), soit: 1) les mécanismes pouvant influencer les caractéristiques des eaux d'infiltration (recharge); 2) les interactions possibles de l'eau avec l'environnement minéral rencontré lors de l'écoulement; et 3) les infiltrations secondaires et mélanges possibles avec des eaux de différentes origines. L'ensemble de ces processus contrôle la composition et les propriétés physicochimiques de l'eau résultante, dont les caractéristiques au moment de l'échantillonnage sont définies par les mesures et analyses qui sont effectuées sur place ou en laboratoire.

Avant même leur interprétation, le traitement des données géochimiques est une étape importante qui doit tenir compte des données disponibles ainsi que des contraintes et objectifs de l'étude. Les propriétés d'un échantillon d'eau, souvent résumées par les proportions relatives en ions majeurs, peuvent être représentées par des diagrammes traditionnels de type Piper ou Stiff, par exemple (Domenico et Schwartz, 1990), ou novateurs tels que ceux proposés par Al-Bassam et Khalil (2012) et Chadha (1999). Cependant, lorsqu'une grande quantité d'échantillons et de résultats doivent être traités, des méthodes statistiques sont requises pour regrouper les échantillons en fonction de leurs caractéristiques chimiques et ainsi en simplifier la représentation (Riggs, 1968). L'analyse statistique multivariée a été utilisée dans le cadre d'études régionales semblables (Blanchette, 2006; Cloutier, 2004), plus spécifiquement en utilisant une combinaison de l'analyse hiérarchique regroupée (*clustering*) et de l'analyse en composantes principales tel que proposé par Güler et al. (2002). Les données utilisées doivent préalablement être préparées et uniformisées (Sanford et al., 1993). Au-delà de la définition de groupes et de l'identification des principaux paramètres responsables de la variabilité des données, l'analyse statistique permet aussi de définir les relations entre les différents groupes d'eau en identifiant les pôles d'origine (*end-members*) et en évaluant les niveaux de mélange entre ceux-ci (Valder et al., 2012).

2.1.2 La compréhension des systèmes d'écoulement

La compréhension traditionnelle des systèmes d'écoulement régionaux a été grandement influencée par les travaux de Tòth (1963), puis de Freeze et Witherspoon (1967). Tòth (1963) a été le premier à définir trois types de systèmes d'écoulement en régime permanent à l'échelle régionale (soit les systèmes locaux, intermédiaires et régionaux) pouvant être prédits principalement en fonction de la topographie. Freeze et Witherspoon (1967) ont poursuivi les travaux de Tòth en mettant l'accent sur l'importance non seulement de la topographie, mais également des variations stratigraphiques. La Montérégie Est présente un territoire d'intérêt pour la mise en pratique de cette théorie compte tenu de sa topographie variant de la plaine à la chaîne de montagnes ainsi que de ses différents contextes stratigraphiques dont les origines, compositions et niveaux de déformations des roches sont variés. Les projets de doctorat de Marc Laurencelle et de Jean-Sébastien Gosselin traiteront respectivement de l'hydrodynamique régionale et de la distribution de la recharge des aquifères de la Montérégie Est.

Les travaux plus récents de Tòth (1999) et d'Appelo et Postma (2005) établissent clairement les liens entre les systèmes d'écoulement régionaux, la géologie et la chimie des eaux souterraines. Ces études apportent une dimension spatiale et temporelle aux mécanismes physico-chimiques précédemment exposés dans la littérature et mettent ainsi l'hydrogéochimie au service de la compréhension des systèmes d'écoulement régionaux.

L'aspect temporel de l'écoulement de l'eau souterraine, ou la détermination de son temps de résidence, est largement associé à la chimie isotopique. Les ouvrages de Clark et Fritz (1997) et de Kazemi et al. (2006) portent essentiellement sur la composition isotopique des eaux souterraines et de leur interprétation. Dans le cadre de la présente étude, des indications du temps de résidence ont été obtenues à l'aide des isotopes radioactifs du tritium (^3H) et du carbone (^{14}C) pour la datation des eaux plus jeunes et plus anciennes, respectivement (Ferronsky et Polyakov, 2012). Ces méthodes de datation ont notamment été utilisées dans les travaux de Cloutier (2004) portant sur les aquifères fracturés des Basses-Laurentides, Québec, pour mieux comprendre l'écoulement régional, mais également dans des travaux visant à identifier la présence

d'anciennes intrusions marines (Han et al., 2011) ainsi qu'à qualifier la recharge et les mécanismes géochimiques généraux (Kazemi et al., 2006). La datation au ^{14}C s'applique également à de plus vastes usages, par exemple l'identification de l'origine de gaz combustibles présents dans l'eau potable de certains puits (Révész et al., 2012). L'étude isotopique des gaz nobles (ex : hélium, argon, radon) s'avère être une avenue différente et complémentaire à la datation traditionnelle des eaux souterraines (Pinti et al., 2010), et ce sujet sera traité sommairement au chapitre 5.

Les isotopes stables de l'eau, sont quant à eux interprétés conformément aux notions initialement proposées par Craig (1961) selon lesquelles la mise en graphique des compositions en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des précipitations atmosphériques d'un endroit donné forme une droite (nommée « droite des eaux météoriques locale » ou « DEML ») dont la pente et la localisation sont directement reliées au climat, à la latitude et à l'altitude de recharge de l'eau. Le phénomène s'explique par le mécanisme de fractionnement isotopique dans le cycle de l'eau tel que décrit par Dansgaard (1964) puis tel que repris par de nombreux auteurs (Clark et Fritz, 1997; Criss et Farquhar, 2008; Johnson et al., 2004; Kazemi et al., 2006). C'est pourquoi l'étude des isotopes stables de l'eau en Montérégie Est comprend deux volets, soit l'échantillonnage et l'analyse de ces isotopes stables dans les eaux souterraines, mais également l'échantillonnage et l'analyse de ces isotopes stables dans les précipitations, ce qui permet de définir une droite des eaux météoriques locales (DEML) qui servira à l'interprétation des valeurs obtenues pour l'eau souterraine. Plus de 800 droites de références (DEML) sont produites et mises à jour pour plusieurs endroits dans le monde grâce au réseau de surveillance du GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*) géré par l'Agence internationale de l'énergie atomique (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2012). Les stations les plus proches de la Montérégie Est se situent dans les villes d'Ottawa (Ontario) et de Sainte-Agathe (Québec). Cloutier (2004) a aussi défini une DEML pour les Basses-Laurentides, une région située encore plus près de la Montérégie Est.

2.1.3 Études régionales

L'hydrogéologie et l'hydrogéochimie de la Montérégie Est ont été étudiées dans le passé, à différentes échelles. Deux études ont été publiées il y a plus de 30 ans par le gouvernement provincial du Québec : un inventaire détaillé réalisé dans les bassins versants de la rivière Richelieu (McCormack, 1980) et un inventaire plus général du bassin de la rivière Yamaska (Paré, 1978). Plus récemment, des rapports de travaux financés par l'Union des producteurs agricoles (UPA) du Québec ont décrit quelques segments régionaux (TechnoRem, 2008). Cependant, aucune de ces études antérieures n'a considéré la région de plus de 9000 km² dans sa totalité. Immédiatement au sud de la Montérégie Est, une étude portant sur la qualité des eaux souterraines du bassin versant du lac Champlain, dans l'état de New York, a été réalisée plus récemment (Nystrom, 2004). Ailleurs au Québec, plusieurs projets du PACES sont en cours, dont six seront complétés en 2013, s'ajoutant ainsi à d'autres études antérieures à ce programme, dont les études du bassin versant de la rivière Châteauguay (Blanchette, 2006), des Basses-Laurentides (Cloutier, 2004), et du bassin de la rivière Chaudière (Benoit et al., 2011), qui se sont particulièrement intéressées à la caractérisation géochimique des aquifères régionaux.

Dans la littérature scientifique récente, plusieurs études portent sur la caractérisation des aquifères régionaux avec comme objectif d'identifier les processus contrôlant la qualité de l'eau souterraine. Ces études utilisent toutes des données chimiques et isotopiques généralement traitées à l'aide de méthodes graphiques. Al-Charideh (2011) conclut que les mécanismes géochimiques dominants dans les aquifères du bassin d'Alep en Syrie sont la dissolution des minéraux et l'évaporation. Des conclusions similaires sont proposées par Gaofeng et al. (2009) et par Yin et al. (2009) dans le cadre d'études portant respectivement sur les bassins de la rivière Heihe et du lac Habor, tous deux situés dans le nord-ouest de la Chine, soit une région au climat tout aussi aride. Une étude réalisée dans le nord-ouest de l'Inde par Kuldip et al. (2011) réussit à faire la distinction entre les eaux de recharge s'étant infiltrées avant la mousson, dont la composition est contrôlée par l'évaporation, et après la mousson, dont la composition est contrôlée par les échanges ioniques. Bien que le phénomène d'évaporation affecte de nombreux aquifères à travers le monde, le climat continental et plutôt nordique sous lequel évolue la Montérégie Est y est peu propice.

Contexte régional spécifique: aquifère saumâtre ou salin

Le caractère côtier de certains aquifères étudiés ou encore la présence d'halite (NaCl) peut contribuer à la compréhension des mécanismes s'opérant en Montérégie Est, plus spécifiquement à l'évolution des eaux saumâtres du nord de la région. Dans une étude portant sur l'aquifère Morsott-El Aouinet en Algérie, Fehdi et al. (2009) souligne l'influence minéralogique de la formation rocheuse riche en halite sur la qualité d'eau. Yechieli et Sivan (2010) ont quant à eux étudié les propriétés d'aquifères côtiers en Israël, en lien avec le niveau de confinement des nappes. Dans chacun des cas étudiés, l'aquifère d'eau douce (et évoluée) en profondeur (plus de 100 m) était efficacement protégé de l'invasion des eaux marines (présentes dans les aquifères de surface) par des aquitards argileux d'épaisseurs variables. Les évidences d'une paléo-invasion marine dans un aquifère côtier du nord de la Chine ont été étudiées par Han et al. (2011) qui proposent l'utilisation des résultats isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ en fonction des concentrations en chlorures pour définir les différents types d'eau rencontrés (eau douce, saumâtre, saline, saumure et eau de mer). Des datations isotopiques en ^{14}C et ^3H viennent appuyer le modèle conceptuel proposé. Finalement, dans un tout autre contexte, le rapport Cl/Br, tel qu'utilisé dans la majorité des études précédemment citées, peut être utilisé non seulement pour déterminer l'origine marine d'une eau souterraine, mais également pour évaluer l'influence des fosses septiques sur la qualité des eaux souterraines (Katz et al., 2011). Bien que cette technique proposée ne se soit pas avérée utile dans la présente étude, elle demeure pertinente dans l'étude de la qualité des eaux, principalement en milieu rural.

Les conditions de salinité connues se rapprochant le plus du contexte de la présente étude demeurent celles des aquifères des Basses-Laurentides, au Québec (Cloutier, 2004). Géographiquement rapprochées, les Basses-Laurentides et la Montérégie ont toutes deux été influencées par la dernière période glaciaire et par l'invasion de la Mer de Champlain (Cloutier et al., 2006; Cloutier et al., 2010). L'époque de la Mer de Champlain est documentée par les travaux de Parent et Occhietti (1988). Quant aux sédiments déposés par celle-ci, leur minéralogie et la composition de l'eau interstitielle des argiles est documentée dans les travaux de Torrance (1988) ainsi que de Desaulniers et Cherry (1989).

2.2 Méthodologie de collecte des données

La planification des travaux a été réalisée conformément à l'expérience acquise par l'équipe de l'INRS-ETE et de la CGC-Québec dans le cadre d'études hydrogéologiques régionales antérieures (Benoit et al., 2011; Blanchette, 2006; Cloutier, 2004; Rivard et al., 2003; Rivard et al., 2008; Rivard et al., 2012). La campagne d'échantillonnage comprenant trois volets sera présentée en premier lieu. Elle comprend l'échantillonnage des puits, de l'eau interstitielle des argiles et de l'eau des précipitations. Chacun des sites d'échantillonnage est localisé sur la carte de la figure 2.2. Le programme analytique pour chacun des types d'échantillons sera ensuite présenté.

2.2.1 Campagne d'échantillonnage

Eaux souterraines

La campagne d'échantillonnage visait à prélever un maximum d'échantillons d'eau souterraine dans le but d'obtenir un portrait hydrogéochimique de la région. Il a d'abord été déterminé, selon le coût des analyses, le budget disponible et les objectifs du projet, que le nombre total d'échantillons à prélever serait de l'ordre de 230 unités pour l'analyse des paramètres standards. En considérant que 10 % de ce nombre serait utilisé pour la réalisation de duplicata et qu'un nombre alors incertain de puits d'observation serait aménagé et échantillonné, un maillage de base de 7 km par 7 km, servant à déterminer la localisation des échantillons à prélever, a été appliqué sur l'ensemble du territoire. Chacune des cases a été numérotée de 1 à 202. Il avait d'abord été prévu d'échantillonner un puits dans chacune des 202 cases, selon l'accessibilité aux puits. L'augmentation de la densité de la couverture spatiale des échantillons aux endroits d'intérêt a été réalisée dans un second temps.

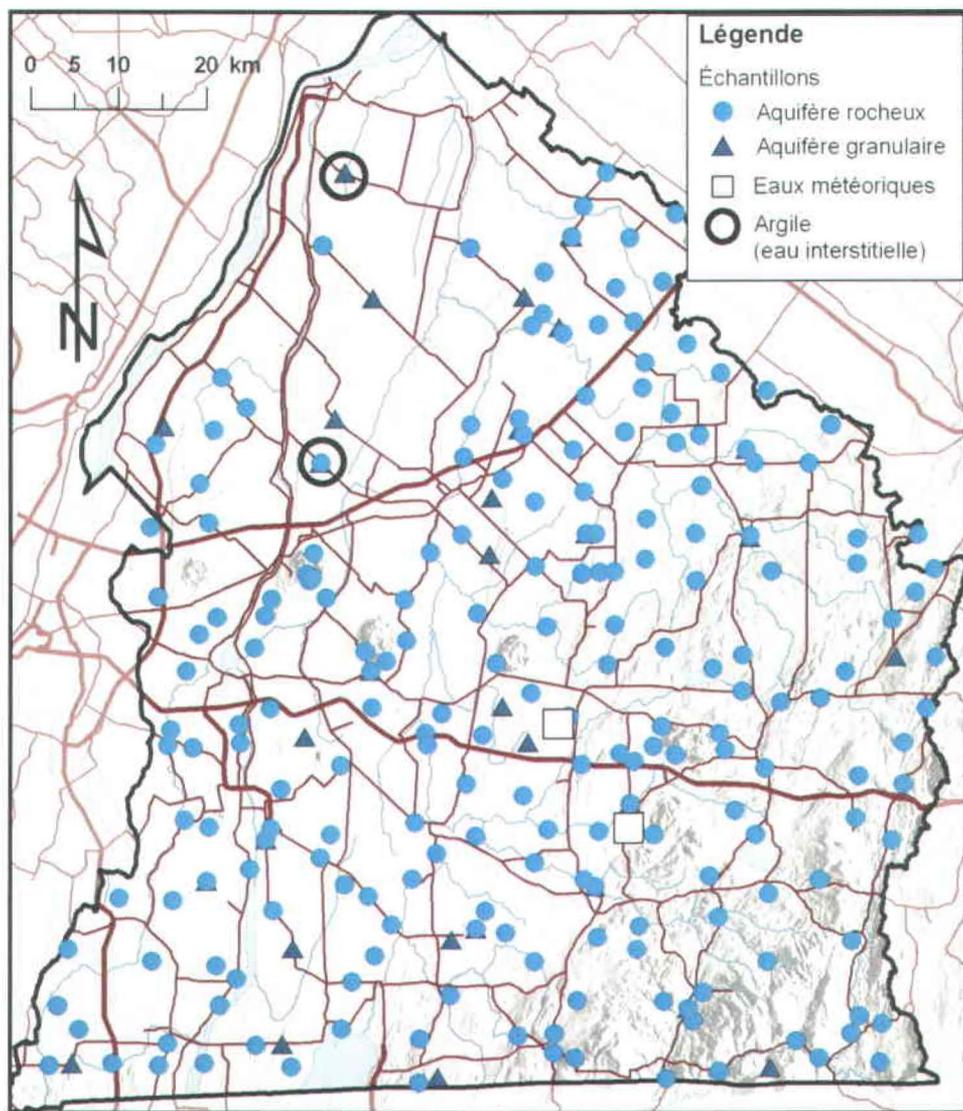


Figure 2.2: Localisation, sur fond topographique, hydrographique et routier, de chacun des échantillons prélevés dans le cadre de l'étude : la carte distingue les échantillons provenant de l'aquifère rocheux, de l'aquifère granulaire, des pluviomètres (eau météorique) ou d'échantillons d'argile (eau interstitielle).

Les différents moyens ayant été considérés pour accéder à l'eau souterraine sont les suivants :

- Les puits privés, source d'alimentation en eau potable principale pour les résidences en milieu rural ;
- Les puits d'observation forés et aménagés dans le cadre du projet PACES ;
- Les sources d'eau naturelle ;
- Les puits municipaux.

Étant donné que les puits privés sont nombreux sur le territoire et que les informations relatives aux puits construits depuis 1967 sont généralement répertoriées dans le Système d'information hydrogéologique (SIH) québécois du MDDEFP (2012b), un tri a d'abord été réalisé pour chacune des 202 cases en sélectionnant les puits pour lesquels certaines informations jugées nécessaires à l'interprétation subséquente (profondeur totale, profondeur au roc, niveau de la nappe) étaient disponibles. Ceux-ci étaient visités en priorité. Afin d'obtenir une couverture suffisamment dense et uniforme du territoire et à cause de leur facilité d'accès, les puits résidentiels ont été préférés aux puits municipaux. Par ailleurs, bien que plusieurs sources aient été répertoriées dans la région par le passé (McCormack, 1980), celles-ci se sont souvent situées dans des endroits difficilement accessibles, soit en forêt ou sur des terrains privés. Une seule source a pu être échantillonnée pour cette étude. Les puits d'observation aménagés dans le cadre du projet PACES ont permis de compléter la couverture spatiale de l'échantillonnage d'eau souterraine, à des endroits présentant des intérêts spécifiques ou encore dans des secteurs où la couverture par les puits d'alimentation privés est insuffisante.

Ainsi, plus de 86 % des puits échantillonnés sont des puits ouverts au roc, le reste étant constitué de puits munis d'une crépine, ou de puits-citernes dans l'aquifère granulaire. Le tableau 2.1 présente un bilan détaillé de la provenance des échantillons prélevés. Mentionnons que chacun des échantillons prélevés est considéré représentatif de l'ensemble de la colonne d'eau du puits duquel il provient. En effet, dans chacun des cas (puits privé d'alimentation ou puits d'observation), la pompe utilisée pour l'échantillonnage est généralement située près du fond du puits et la purge réalisée avant l'échantillonnage entraîne un mélange plus ou moins uniforme de la colonne d'eau, selon le contexte. Les photographies de la figure 2.3 montrent quelques-uns des types de puits rencontrés lors des travaux.

L'échantillonnage des puits a été réalisé conformément au protocole présenté à l'annexe B, qui est une adaptation du *Protocole officiel de prélèvement des eaux souterraines* (Blanchette et Cloutier, 2010) rédigé pour l'ensemble des projets du PACES. Ce dernier respecte les recommandations contenues dans le cahier 3 du Guide d'échantillonnage à des fins environnementales (MDDEFP, 2012a) ainsi que les recommandations du Centre d'expertise en

analyse environnementale du Québec (CEAEQ) pour le mode de conservation des échantillons d'eaux souterraines (CEAEQ, 2012).



Figure 2.3: Exemples des types de puits échantillonnés. De gauche à droite : puits d'alimentation privé, au roc; puits de surface de type "citerne", aménagé dans les sédiments; puits d'observation muni d'une crépine (1 po. de diamètre) dans les sédiments aménagé pour le projet PACES.

Tableau 2.1 : Détail de la provenance des échantillons d'eau souterraine.

Type de puits	Nombre échantillons (type d'aquifère)	Mode de sélection des puits	Mode d'échantillonnage
Puits privés	177 (roc) 10 (séd.)	Priorité aux puits du SIH avec adresse disponible. Si impossibilité, sélection d'un puits voisin.	Robinet extérieur. Eau non traitée. Purge requise.
Source naturelle	1 (roc)	Selon la disponibilité et l'accessibilité.	Directement de la source.
Puits d'observation (6 po.)	26 (roc)	Selon les besoins du projet.	Pompe électrique de type Redi-Flow. Purge requise.
Puits d'observation (2 po.)	2 (roc) 4 (séd.)	Selon les besoins du projet.	Pompe électrique de type Redi-Flow. Développement et purge requis.
Puits d'observation (1 po.)	17 (séd.)	Selon les besoins du projet.	Pompe électrique de type <i>Waterra</i> . Développement et purge requis.
Argile	5 (séd.)	Selon la disponibilité des échantillons de sols et l'intérêt géochimique.	Extraction de l'eau interstitielle en laboratoire par pression d'air.
Totaux :	242		

Eau interstitielle des argiles

La réalisation de forages non destructifs de type *Rotosonic* a permis la récupération d'échantillons de sols de 10 cm de diamètre, en continu, à quatre sites différents (Carrier et al., 2013). Deux d'entre eux, soient les forages RS01 et RS02, sont situés dans le secteur nord-ouest de la Montérégie Est où se trouve l'épaisse couche de silts et argiles de la Mer de Champlain. La localisation des deux forages visés est indiquée sur la carte de la figure 2.2. L'eau interstitielle a été prélevée en laboratoire à l'aide d'une presse hydraulique, à partir de cinq échantillons d'argile et silt de la Mer de Champlain provenant de différentes profondeurs, dans ces deux forages. Le protocole d'échantillonnage de l'eau interstitielle, inspiré des travaux de Cloutier (2004) est présenté en Annexe C.

Eaux de précipitations

Deux pluviomètres ont été aménagés sur le territoire, un à Granby et l'autre à Bromont, afin de recueillir mensuellement les précipitations. Le but de l'échantillonnage est de recueillir des données isotopiques en $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ pour la réalisation d'une droite des eaux météoriques locale (DEML) représentative de la région. Un suivi de 15 mois consécutifs, soit d'août 2010 à octobre 2011, a été réalisé conformément au protocole présenté en Annexe D. La localisation des pluviomètres est présentée sur la carte de la figure 2.2. La description des deux sites, des appareils utilisés pour récolter la pluie et la neige et des méthodes d'échantillonnage est fournie dans le mémoire de Rachel Thériault (Thériault, 2013).

2.2.2 Programme analytique

Paramètres in situ pour les eaux souterraines

Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés pour chacun des puits échantillonnés. Ces paramètres doivent être mesurés *in situ* au moment de l'échantillonnage afin d'éviter que le contact avec l'atmosphère et le temps ne viennent modifier les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau (Hounslow, 1995). À cet effet, une sonde multiparamètres de marque YSI, modèle 556 MPS, a été utilisée. Celle-ci comprend un premier capteur pour la mesure du pH et

du potentiel redox, un second pour l'oxygène dissous et un troisième pour la conductivité électrique et la température (YSI Environmental, 2009).

L'alcalinité est le seul paramètre physico-chimique à avoir été mesuré en laboratoire afin de simplifier les manipulations sur le terrain. Les paramètres physico-chimiques, ainsi que les unités dans lesquelles ils sont exprimés, sont résumés au tableau 2.2. Les valeurs de ces paramètres pour chacun des échantillons sont présentées au tableau E.3 à l'annexe E.

Tableau 2.2: Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* et en laboratoire.

PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES	
<i>In Situ</i>	En laboratoire
. pH	. Alcalinité totale (en CaCO ₃) pH 4.5 [mg/L] ¹
. Potentiel redox – ORP [mV]	
. Oxygène dissous [mg/L], [%]	
. Température [°C]	
. Conductivité électrique spécifique [µS/cm]	

¹ L'alcalinité totale a été mesurée par l'un des deux laboratoires suivants : Maxxam Analytique et INRS-ETE.

Paramètres chimiques pour les eaux souterraines

Pour les échantillons prélevés, un ensemble de paramètres chimiques pertinents ont été analysés par un laboratoire commercial accrédité par le MDDEFP et choisi par appel d'offres, soit *Maxxam* situé à Ville Saint-Laurent, Québec, ainsi que par le laboratoire de l'INRS-ETE pour certains paramètres seulement. Moins de la moitié des échantillons ont été sélectionnés pour en faire aussi l'analyse des isotopes stables de l'eau par le laboratoire *Delta Lab* du bureau de la CGC-Québec. Finalement, 41 échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse du tritium (³H) et 39 l'ont été pour la datation au carbone 14 (¹⁴C et δ¹³C); ceux-ci ont été envoyés aux laboratoires spécialisés *EIL Waterloo* (Université de Waterloo, Ontario, Canada) pour le tritium et *Beta Analytic* (Miami, É.-U.) pour le carbone 14. La sélection des échantillons analysés pour les isotopes stables et radioactifs a été effectuée de façon à obtenir une couverture spatiale uniforme du territoire ainsi qu'une bonne représentativité de chacun des contextes

hydrogéologiques régionaux. Les informations relatives à chacun des laboratoires ainsi que les méthodes analytiques utilisées et les résultats sont présentés en annexe E.

L'ensemble des paramètres analysés pour les échantillons d'eau souterraine, ainsi que le nombre d'analyses réalisées, sont énumérés au tableau 2.3 selon cinq catégories : métaux, anions, azote et carbone, autres composés inorganiques et isotopes. Mentionnons que les analyses en azote et carbone (CID, COD et N_{total}) ainsi qu'en isotopes de l'eau n'ont pas été réalisées sur tous les prélèvements étant donné qu'ils ont été ajoutés tardivement au programme analytique. L'isotope $\delta^{15}\text{N}$ n'a pas été analysé, contrairement à ce que prévoyait initialement le programme, étant donné que les concentrations mesurées en nitrite et nitrate étaient trop faibles. Les résultats analytiques bruts pour chacun des échantillons sont compilés au tableau E.4 de l'annexe E.

Tableau 2.3: Paramètres chimiques mesurés en laboratoire pour chacun des échantillons d'eau souterraine.

	Paramètres d'analyse						Nb. d'analyses (+ duplicata)
MÉTAUX	. Al . Sb . Ag . As . Ba	. Be . Bi . B . Ca . Cd	. Cr . Co . Cu . Sn . Fe	. Li . Mg . Mn . Mo . Ni	. Pb . K . Se . Si . Na	. Sr . Ti . U . V . Zn	237 (+16)
ANIONS	. Chlorures (Cl) . Fluorures (F ⁻) . Bromures (Br ⁻)		. Sulfates (SO ₄ ²⁻) . Nitrites (N) et nitrates (N) (N-NO ₃ ⁻ et N-NO ₂ ⁻)				237 (+16)
AZOTE ET CARBONE	. CID . COD		. N _{total}				166 (+15)
AUTRES COMPOSÉS INORGANIQUES	. Sulfures (S ²⁻) . P _{inorganique}		. NH ₄ ⁺				237 (+16)
ISOTOPES¹	. $\delta^{18}\text{O}$. $\delta^2\text{H}$				91 (+ 2)
	. $\delta^{15}\text{N}$						0
	. Tritium - ³ H						41
	. Radiocarbone - ¹⁴ C		. $\delta^{13}\text{C}$				39

¹ Cinquante-cinq (55) échantillons sont associés à un résultat pour le ³H ou le ¹⁴C. Vingt-cinq (25) échantillons sont associés à un résultat pour chacune de ces deux analyses.

Paramètres chimiques et physico-chimiques pour les eaux interstitielles des argiles

Une quantité limitée de paramètres a pu être analysée à partir des cinq échantillons d'eau interstitielle des argiles, compte tenu des faibles quantités d'eau pouvant être extraites à partir des échantillons d'argile. Ces échantillons ont été analysés pour les paramètres suivants au laboratoire de l'INRS-ETE ainsi qu'au *Delta-Lab* (isotopes seulement) :

- Cations majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Sr^{2+})
- Anions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-})
- Alcalinité, pH et conductivité électrique
- Isotopes $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$

Paramètres isotopiques pour les eaux de précipitations

Les échantillons d'eau de pluie et de neige fondue ont été analysés pour les isotopes stables de l'eau uniquement, soit $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$. Les analyses ont été réalisées au *Delta-Lab* de la CGC à Québec.

2.3 Méthodologie de traitement des données

Tous les résultats ont été compilés sous forme de chiffrier électronique dont les lignes correspondent aux échantillons et les colonnes correspondent aux paramètres d'analyse. Ce fichier a été utilisé pour le traitement des données dans le cadre de la présente étude et a ensuite été intégré dans la base de données officielle du PACES. Les résultats sont présentés en annexe E.

2.3.1 Validation des données

Dès la compilation des données terminée, trois étapes ont été réalisées afin de permettre l'interprétation préliminaire des données soit : l'attribution d'une valeur numérique aux résultats inférieurs à la limite de détection, le calcul de certains paramètres manquants et le calcul du bilan ionique.

Premièrement, chacun des résultats analytiques portant la mention « <LD », soit lorsque la concentration mesurée en laboratoire est inférieure à la limite de détection rapportée pour la méthode analytique, s'est vue attribuer une valeur de 50 % de cette limite de détection (Sanford et al., 1993). Par la suite, le calcul de quelques paramètres utiles à l'exploitation et l'interprétation des données a été réalisé. En effet, des paramètres tels que les concentrations en ions carbonates et bicarbonates, la dureté, les matières dissoutes totales (MDT) ainsi que le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et le potentiel de l'électron (pe), ne sont pas mesurés directement par analyse. Ces paramètres ont donc été calculés à l'aide d'un tableur, puis validés à l'aide du logiciel spécialisé en diffusion libre Diagrammes (Simler, 2012). Les calculs associés à chaque paramètre (Hounslow, 1995) sont présentés ci-après. L'abréviation *m.mol.* désigne la masse moléculaire et *m.atom.*, la masse atomique.

- Concentration des ions carbonate et bicarbonate, calculés à partir de l'alcalinité totale exprimée en CaCO₃ à pH 4.5 :

$$[HCO_3^-](mg/L) = \frac{[CaCO_3](mg/L)}{m.mol. CaCO_3} \times m.mol. HCO_3^- = \frac{[CaCO_3](mg/L)}{50.044} \times 61.061 \quad (\text{Éq. 2.1})$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{[HCO_3^-]}{2.0308} \quad (\text{Éq. 2.2})$$

- Dureté, calculée à l'aide des concentrations en calcium et magnésium, puis exprimée en mg/L de CaCO₃ :

$$Dureté(mg/L) = [Ca](mg/L) \times \frac{m.mol. CaCO_3}{m.atom. Ca} + [Mg](mg/L) \times \frac{m.mol. CaCO_3}{m.atom. Mg} \quad (\text{Éq. 2.3})$$

- MDT, calculé avec la somme des ions majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}) ainsi que SiO_2 .

$$\text{SiO}_2(\text{mg/L}) = \frac{[\text{Si}](\text{mg/L})}{m. \text{mol. Si}} \times m. \text{mol. SiO}_2 \quad (\text{Éq. 2.4})$$

$$\text{MDT}(\text{mg/L}) = \sum [\text{ions}](\text{mg/L}) + \text{SiO}_2(\text{mg/L}) - \frac{[\text{HCO}_3^-](\text{mg/L})}{m. \text{mol. HCO}_3^-} \times \frac{m. \text{mol. H}_2\text{CO}_3}{2} \quad (\text{Éq. 2.5})$$

- Eh et pe sont dérivés des mesures d'ORP et de température obtenues lors de l'échantillonnage avec la sonde multiparamètres. Le calcul de Eh est réalisé conformément à la formule de correction suggérée par le fabricant de la sonde (YSI Environmental, 2009). Le potentiel pe est proportionnel au Eh. La dérivation de sa valeur est considérée valide pour une température de 25°C.

$$\text{Eh}(\text{mV}) = \text{ORP}(\text{mV}) + \left(1000 * \left(0.231 + (0.0013 * (25 - T(^{\circ}\text{C}))) \right) \right) \quad (\text{Éq. 2.6})$$

$$\text{pe} = \text{Eh}(\text{mV})/59 \text{ (à } 25^{\circ}\text{C)} \quad (\text{Éq. 2.7})$$

Une fois tous les paramètres en main, un bilan ionique a été réalisé. Étant donné qu'il est présumé que la solution analysée soit électriquement neutre (Hounslow, 1995), la somme des concentrations en anions majeurs doit égaler la somme des cations majeurs, en meq/L pour chacun des échantillons. La transformation d'unités de mg/L à meq/L est réalisée en prenant en compte la masse de l'ion et sa valence:

$$\text{meq/L} = \frac{\text{mg/L} \times \text{valence}}{\text{masse de l'ion}} \quad (\text{Éq. 2.8})$$

Le bilan ionique s'obtient donc ainsi :

$$\text{Bilan ionique (\%)} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad (\text{Éq. 2.9})$$

Bien que la littérature suggère parfois que l'analyse peut être jugée bonne lorsque le bilan ionique présente une erreur inférieure à 5 % (Hounslow, 1995), la tolérance a été augmentée à 15% pour la présente étude (Sanford et al., 1993). Cette plus grande tolérance est justifiée par le fait que l'alcalinité a été mesurée en laboratoire et non sur le terrain, parfois plusieurs jours après le prélèvement. Ce paramètre étant sensible au contact de l'atmosphère et ayant tendance à varier avec le temps, il a été identifié comme étant la source de la plupart des mauvais bilans ioniques. Ainsi, les échantillons dont le bilan ionique est au-delà de cette marge d'erreur acceptable de $\pm 15\%$ sont jugés inadéquats et ont été rejetés pour certaines étapes de l'interprétation des données. Au total, 19 échantillons et un duplicata ont dû être rejetés aux fins de l'interprétation géochimique, mais ces échantillons ont tout de même été utilisés pour définir l'étendue des types d'eau souterraine (chapitre 3) ainsi que les zones de qualité d'eau (chapitre 4).

La détermination du bilan ionique permet d'attribuer un « type d'eau » à chaque échantillon, soit l'identification de l'anion et du cation dominant sa composition chimique. Il est également possible à ce stade de représenter le profil ionique de chaque échantillon à l'aide des diagrammes de Piper ou de Stiff par exemple, afin de visualiser le profil ionique des échantillons (Domenico et Schwartz, 1990). Le logiciel Diagrammes (Simler, 2012) permet de réaliser simplement et rapidement ces types de représentations.

2.3.4 Indice de saturation

L'évaluation du niveau de saturation d'une solution aqueuse, comme l'eau souterraine, par rapport à un minéral permet de prédire s'il y aura tendance à la dissolution ou à la précipitation d'un minéral dans la solution, ou si la solution est en équilibre avec le minéral. Une façon simple de quantifier ce processus est la détermination de l'indice de saturation (IS) à l'aide du logiciel PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999). Ainsi, lorsque la solution est sursaturée pour un minéral donné, l'indice de saturation sera positif (supérieur à zéro) et le minéral aura tendance à précipiter. L'état de sous-saturation indique une tendance à la dissolution du minéral et l'indice IS sera négatif. Lorsque IS est nul ($IS=0$) ou lorsqu'il est près de zéro ($-0.5 < IS < 0.5$), la solution est dite « à l'équilibre » avec le minéral. Les indices de saturation associés à une sélection de minéraux communs sont présentés au tableau E.5 de l'annexe E pour chacun des échantillons.

2.3.5 Analyse statistique

L'analyse statistique multivariée a été utilisée afin de rationaliser l'identification des ressemblances et des relations existant entre chacun des échantillons d'eau prélevés et analysés. Le traitement statistique a été réalisé à l'aide du logiciel *Statistica 6.1*®. Les étapes de l'analyse statistique multivariée sont les suivantes :

- Choix et préparation des données
- Analyse hiérarchique regroupée (*clustering*)
- Analyse en composantes principales (ACP)
- Statistiques descriptives

Choix des données

Le choix des paramètres et des échantillons a été réalisé dans le but d'obtenir une matrice de données la plus représentative possible de l'ensemble de la région. Ainsi, compte tenu du faible nombre et de l'hétérogénéité des résultats obtenus pour les aquifères granulaires, il a été choisi de ne conserver que les échantillons de l'aquifère rocheux pour l'analyse. Les puits pour lesquels le bilan ionique est au-delà de $\pm 15\%$ ont également été rejetés ainsi que les puits pour lesquels les résultats n'étaient pas disponibles pour les paramètres choisis. Un total de 190 échantillons a été retenu.

Les paramètres ont été choisis en fonction de leur pertinence, de leur disponibilité et de leur indépendance (non corrélés entre eux). Leur pertinence a été évaluée en se fiant à différentes références sur le sujet (Blanchette, 2006; Cloutier, 2004; Güler et al., 2002), par l'essai de différentes combinaisons (essais et erreurs) et selon le nombre de résultats situés sous la limite de détection analytique. En effet, les paramètres pour lesquels plus de 10 % des résultats se trouvaient sous la limite de détection ont été rejetés. Un total de 16 paramètres a ainsi été choisi : pH, MDT, pe, HCO₃, NH₄, Ba, B, Ca, Cl, Mg, Mn, K, Si, Na, S et SO₄. Les résultats constituant la matrice de 16 X 190 utilisée pour l'analyse statistique multivariée sont présentés au tableau F.1 de l'annexe F.

Correction des données

Afin d'obtenir une analyse cohérente et représentative, il a été nécessaire d'appliquer une correction sur les données des paramètres qui ne suivaient pas une distribution normale. Ainsi, à l'exception des valeurs de pH et de Si qui présentaient déjà une répartition normale, le logarithme des valeurs a dû être utilisé. La distribution statistique des valeurs de chacun des paramètres est donc normale ou log-normale. Après avoir effectué cette correction, toutes les données ont été standardisées, soit rapportées dans un même ordre de grandeur par rapport à la moyenne (μ) et l'écart type (σ) de leur distribution ($[(X-\mu)/\sigma]$). Cette étape est réalisée directement par le logiciel *Statistica 6.1*®.

Analyse hiérarchique regroupée

L'analyse hiérarchique regroupée a été réalisée à l'aide de l'outil « *Multivariate Exploratory techniques / Cluster Analysis* » du logiciel *Statistica 6.1*®. Les distances, de type euclésiennes, ont été évaluées pour les 190 échantillons. La méthode de calcul sélectionnée est celle de Ward. Une fois la classification des échantillons obtenue à partir du dendrogramme, la ligne définissant les groupes (*phenon line*) a été placée à une distance de 18, définissant ainsi huit groupes distincts. Ce choix a été fait de façon à obtenir un nombre de groupes qui ne soit pas trop grand, ni trop petit, afin de demeurer significatif. La répartition géographique de chacun des échantillons en fonction du groupe dont il fait partie a également validé la cohérence de ce choix. L'interprétation globale de l'hydrogéochimie de la Montérégie Est est donc basée sur les huit groupes d'eau ainsi définis (Chapitre 3).

Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale, ou ACP, a été réalisée à l'aide de l'outil « *Multivariate Exploratory techniques / Principal Components and Classification Analysis* » du logiciel *Statistica 6.1*®. La matrice de donnée utilisée pour cette analyse est la même que celle utilisée pour l'analyse hiérarchique regroupée. La méthode est détaillée au chapitre 3 et les résultats détaillés se trouvent au tableau F.2 de l'annexe F.

Statistiques descriptives

Une fois les groupes d'eau définis, les statistiques descriptives détaillées pour chaque groupe et chaque paramètre ont été calculées à l'aide du même logiciel. Les résultats pour une sélection de paramètres sont présentés au chapitre 3 et sont exprimés en quartiles 25^e, 50^e et 75^e pour chacun des huit groupes.

2.3.7 Isotopes de l'eau

La figure 2.4 présente l'ensemble des résultats obtenus pour les isotopes stables de l'eau des précipitations (pluviomètres de Granby et Bromont).

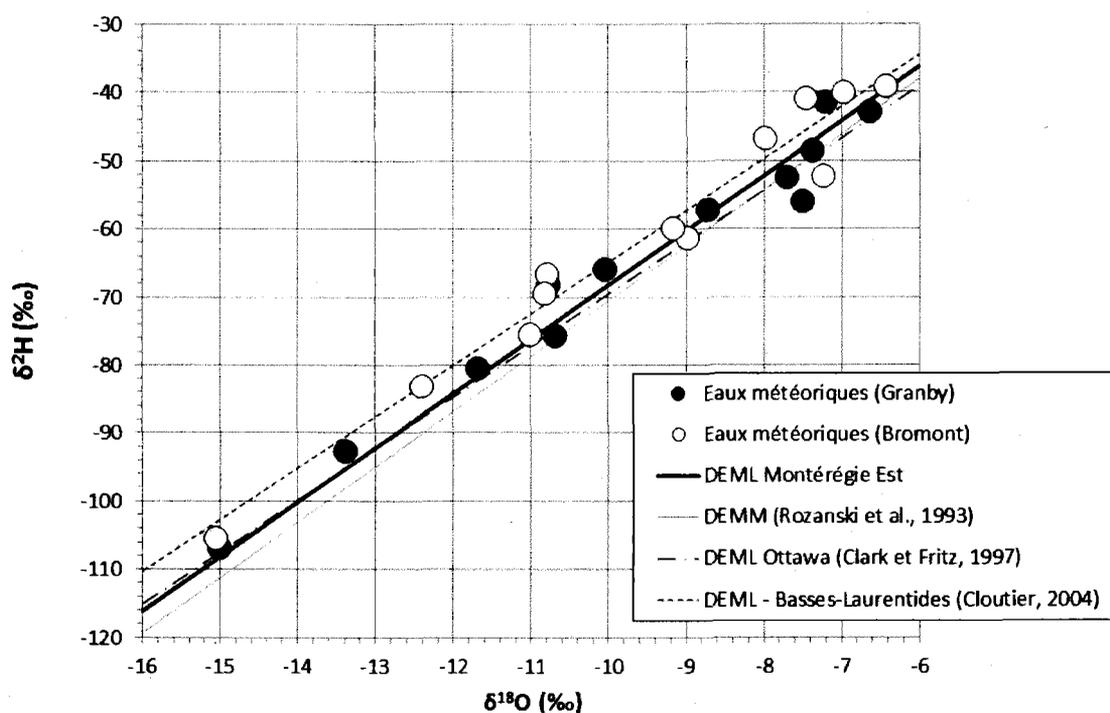


Figure 2.4: Résultats en $\delta^2\text{H}$ en fonction de $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de précipitation. Les trois droites des eaux météoriques locales (DEML) de la Montérégie Est, d'Ottawa et des Basses-Laurentides sont présentées, de même que la droite des eaux météoriques mondiale (DEMM) (en anglais: *Global Meteoric Water Line* ou GMWL) (Rozanski et al., 1993).

Les résultats isotopiques des échantillons de précipitations obtenus à la suite du suivi mensuel de 15 mois consécutifs, ont servi à estimer la droite des eaux météoriques locale (DEML) de la Montérégie Est. Cette droite sera interprétée avec prudence et sera jugée non représentative compte tenu de la courte durée du suivi et du temps particulièrement chaud et sec ayant sévi pour cette période. Ainsi, à titre comparatif, les droites locales d'Ottawa et des Basses-Laurentides ainsi que la droite des eaux météoriques mondiale (DEMM) ont été ajoutées à la figure 2.4.

**HYDROGÉOCHIMIE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX RÉGIONAL
EN MONTÉRÉGIE EST, QUÉBEC**

DEUXIÈME PARTIE : ARTICLE ET RAPPORT

CHAPITRE 3 : ARTICLE

HYDROGEOCHEMISTRY OF REGIONAL FRACTURED ROCK AQUIFER IN MONTÉRÉGIE EST, QUÉBEC, CANADA

Châtelaine Beaudry¹, René Lefebvre¹, Christine Rivard², Vincent Cloutier³

¹ Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE), Québec, Québec, Canada

² NRCan, Geological Survey of Canada, Québec, Québec, Canada

³ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Amos, Québec, Canada

ABSTRACT

The groundwater geochemistry of fractured rock aquifers of the Montérégie Est region, southern Quebec, Canada, was studied as part of a regional groundwater characterization project. The study area covers 9218 km², and includes three major watersheds that have been divided into five hydrogeological contexts, mainly based on geology. These contexts are: the St-Lawrence Lowlands, which has been separated into northern and southern parts since the former comprises an overlying thick continuous marine clay and silt deposit, the Appalachian Uplands that comprises glacial valleys and thin till deposits, the Appalachian Piedmont, which acts as a transition area between the Lowlands and the Uplands, and seven scattered, mainly mafic intrusions. The Lowlands and the Piedmont were affected by the Champlain Sea invasion about 11 000 years ago. The objectives of the study were to carry out a groundwater quality assessment of this vast area, to understand the mechanisms controlling groundwater composition, and to support the understanding of the regional groundwater flow system. Groundwater from 206 wells drilled into bedrock was sampled and analyzed for conventional parameters. Isotopic analyses were also done on selected samples, including stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) and radioactive isotopes (^{14}C and ^3H) for groundwater dating purposes. The interpretation of the geochemical results was based on a multivariate statistical analysis, which led to the identification of 8 water groups. Relations between water groups and the dominant mechanisms controlling water composition were interpreted using statistical methods, a selection of geochemical graphs, and isotopic dating results. The study allowed the delineation of a 2 200 km² zone containing brackish groundwater in the north-western part of the study area. This brackish water zone is surrounded by sodic and alkaline groundwater originating from Na^+ - Ca^{2+} ionic exchange. Young groundwater, and therefore recharge zones, was only encountered in the southern part of the Lowlands, in the northern part of the Piedmont and in the Appalachian Uplands, mainly in the south-east. Deep groundwater circulation was also presumed to occur from the Appalachian Uplands towards mixing zones mainly located to the west at the Appalachian frontal thrust faults. This geochemical dataset provided invaluable information on both recharge and discharge

zones, as well as groundwater flow, which could not be determined otherwise on the sole basis of on surficial and bedrock geology, potentiometric maps and topography. Even in many of the identified main recharge areas, notably in the southern part of Lowlands, recharge is presumed to be slow and water composition is often affected by the former presence of the Champlain Sea.

RÉSUMÉ

L'étude hydrogéochimique des aquifères rocheux de la Montérégie Est, au Québec, fait partie d'un projet intégré de caractérisation hydrogéologique régionale supporté par le gouvernement du Québec. Le territoire d'étude, d'une superficie de 9 218 km², est composé de trois bassins versants principaux. Il est également divisé en cinq contextes hydrogéologiques, définis selon la géologie. Parmi ces différents contextes se trouvent : celui des Basses-terres-du-Saint-Laurent, à l'intérieur duquel se distinguent les parties nord (recouverte d'importants dépôts marins d'argile silteuse) et sud ; du Piémont appalachien, zone transitoire; des Hautes-terres des Appalaches, caractérisées par des vallées de type glaciaire et des dépôts de till mince; ainsi que celui des Collines montréalaises composées de sept collines correspondant à des massifs intrusifs de composition généralement mafique. Les aquifères des Basses-terres et du Piémont ont été envahis par les eaux salées de la Mer de Champlain il y a environ 11 000 ans, à la suite de la fonte des glaciers. L'étude a comme objectifs de dresser un portrait de la qualité des eaux souterraines pour l'ensemble du territoire, d'identifier et de comprendre les principaux mécanismes contrôlant la composition de ces eaux ainsi que de supporter la compréhension du système d'écoulement régional. L'étude est basée sur les résultats physicochimiques de 206 échantillons d'eau recueillis dans des puits aménagés dans les aquifères rocheux. Une sélection de ces échantillons a été analysée également pour les isotopes stables ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) et les isotopes radioactifs aux fins de datation (^{14}C et ^3H). Huit différents groupes d'eau ont été définis par des méthodes d'analyse statistique multivariée, soit l'analyse hiérarchique regroupée pour la définition des groupes ainsi que l'analyse en composantes principales pour l'interprétation partielle de l'interaction entre les groupes et l'identification des mécanismes dominants. Différentes analyses graphiques ont ensuite permis de compléter l'interprétation. L'étude a permis de confirmer la présence d'eau saumâtre en milieu confiné sur une superficie de 2200 km² dans la partie nord des Basses-terres. Ces eaux sont entourées par des eaux fortement alcalines et sodiques, dont la composition est contrôlée par le mécanisme d'échange ionique des minéraux argileux entre les cations Na^+ et Ca^{2+} , résultant du lessivage de l'eau marine par des eaux douces. Des eaux jeunes, associées aux zones de recharge des aquifères, sont rencontrées dans le sud des Basses-terres, dans le nord du Piémont ainsi dans les Hautes-terres appalachiennes, principalement au sud-est. Des eaux plus évoluées possiblement associées à une circulation plus profonde des eaux souterraines, sont rencontrées en zones de mélange au front des Hautes-terres, soit dans leur partie ouest. Les conclusions de l'étude permettent l'identification des zones de recharge et d'émergence des aquifères, ainsi qu'une meilleure compréhension du système d'écoulement régional, complémentaire aux connaissances obtenues traditionnellement par la géologie du roc, les cartes piézométriques ainsi que les cartes topographiques. À l'endroit des zones de recharge identifiées par l'étude hydrogéochimique, la recharge est présumée lente, principalement dans le sud des Basses-terres, et la chimie régionale des eaux souterraines est largement influencée par l'ancienne Mer de Champlain.

3.1 Introduction

Montréal Est is a 9218 km² area located in southern Quebec, Canada, to the east of Montreal (Figure 3.1). The aquifer system was studied as part of a systematic aquifer characterization program launched by the province of Quebec in 2008. This region was prioritized due to its variety of geographical, geological and hydrogeological contexts, and also due to the importance of groundwater for this intensive farming but also highly populated area.

This specific study on geochemistry was carried out in an effort to develop an efficient integrated approach using, besides conventional hydrogeological techniques and geochemical datasets, other information sources, such as water levels, hydraulic testing and drilling, geotechnical soundings, borehole geophysics and surface seismic. Initial available data were sparse and most data were more than 30 years old. There was a need to significantly increase the geochemical dataset, so as to be able to contribute to the regional groundwater quality assessment and to the general understanding of the groundwater flow system. The specific objectives of the study are to:

- Define groundwater groups and identify their origins, their relations, and the main mechanisms controlling their physical and chemical characteristics;
- Use groundwater groups to support the interpretation of groundwater regional circulation and the identification of recharge and discharge zones.

3.2 Study area

Montréal Est is located east of Montreal, in southern Quebec, Canada (Figure 3.1). This area is bordered by the St. Lawrence River to the northwest and by the states of Vermont and New York (U.S.A.) to the south. It covers three major watersheds: those of the Richelieu River and Missisquoi Bay, which are sub-watersheds of the Lake Champlain watershed, and that of the Yamaska River. The territory includes 108 municipalities and ~790 000 inhabitants. Agriculture is one of the major economic drivers of this region.

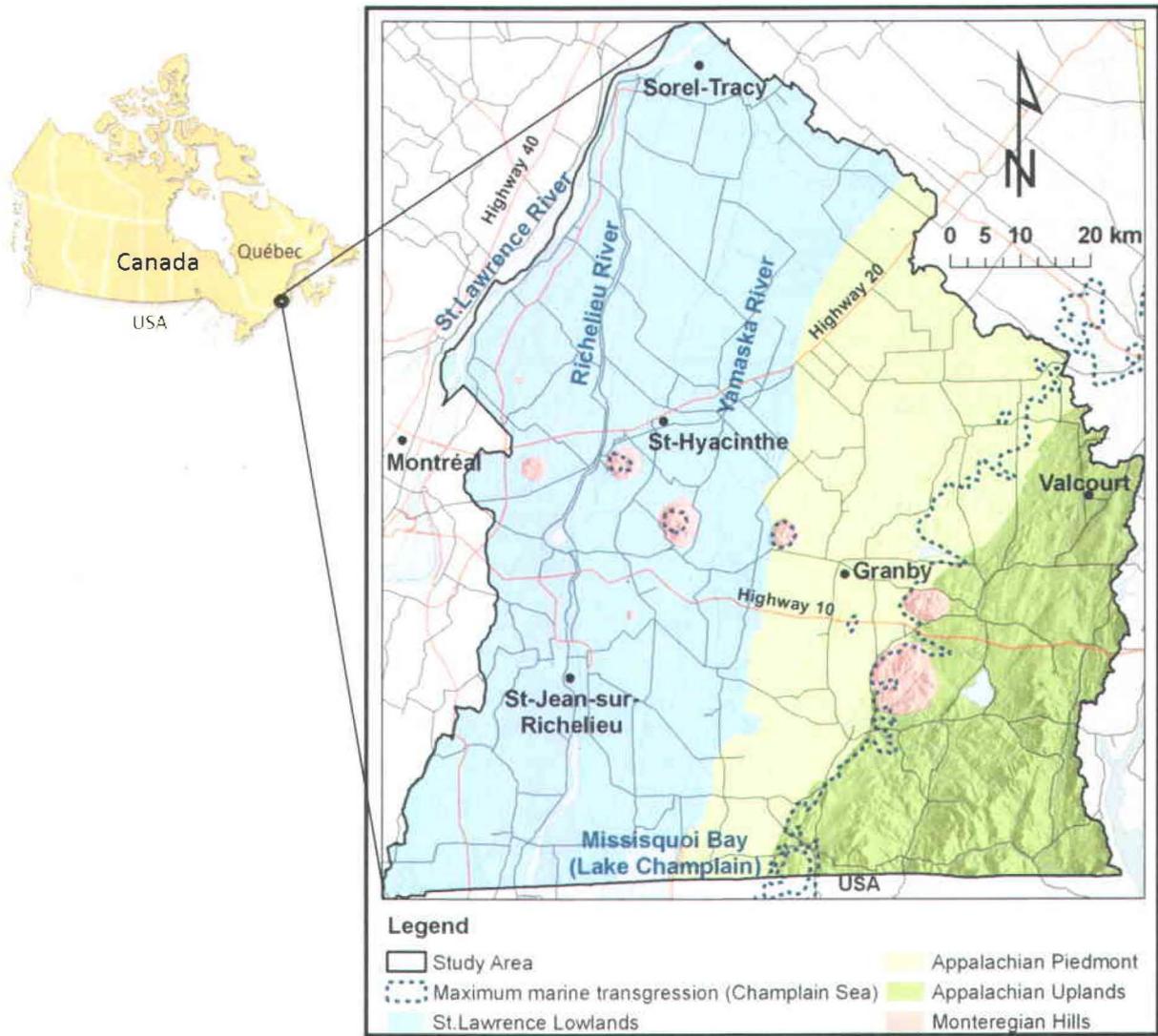


Figure 3.1: Montérégie Est location and physiographic contexts. Map also shows topography, main roads and maximum marine transgression, ~11K years ago.

Five distinct physiographic contexts characterize Montérégie Est (Figure 3.1). The St. Lawrence Lowlands correspond to a Cambrian and Ordovician low deformation sedimentary platform composed of black and red shales, dolostones and limestones (Clark et al., 1979; Globensky, 1985). The northern part of the Lowlands is covered by thick marine clay and silt deposits left by the Champlain Sea. The maximum extension of the Champlain Sea basin, as shown on Figure 3.1, was established around 10 800 years ago (Parent et Occhietti, 1988). Fractured rock aquifers underlying these marine deposits that exceed ~10 m thick contain brackish water. This area of

non-potable confined groundwater extends over $\sim 2\,200\text{ km}^2$ (Beaudry and al., 2011; McCormack, 1980), as defined on Figure 3.2. The southern part of the Lowlands is covered by variable thicknesses and discontinuous units of marine clay and till (Gaucher, 1984; Prichonnet, 1984) causing discontinuous and variable groundwater confinement contexts (Figure 3.2). The Appalachian Uplands corresponds to a Devonian ridge formed by continental margin rocks highly deformed with low-grade metamorphism (Slivitzky and St-Julien, 1987; Brisebois, 2003). Maximum elevation is approximately 500 m above sea level. The last glaciations, from up to 16 000 years ago, eroded the summits and left behind glacial valleys having variable thickness and discontinuous till layers (Gaucher, 1984; Prichonnet, 1984). Groundwater is generally in unconfined conditions in high elevation and semi-confined down the valleys (Figure 3.2). Apart from the northern part of the Lowlands, the surficial cover is usually less than 10 m thick, except in the valleys. The Appalachian Piedmont is located in between the Uplands and Lowlands. Its bedrock is similar to that of the Uplands, but surface sediments are similar to the southern part of the Lowlands. At the time of the last glacial maximum, the Piedmont corresponded to the Champlain Sea shore as illustrated in Figure 3.1. The fifth physiographic context corresponds to the Monteregian Hills, which are seven Cretaceous, mainly mafic, intrusives puncturing the other contexts along a northwest-southeast axis. Erosion uncovered these plutons and geophysics revealed the presence of several buried dykes around these hills (Feininger and Goodacre, 1995). The Champlain Sea level did not reach the summit of most of the hills.

Lands of Lowlands and Piedmont are widely used by agricultural activities, including a few major cities. Monteregian Hills and Uplands are less populated, activities are rural, and the forest cover is more important. Average annual total precipitations for Montérégie Est is approximately 1 100 mm/year and average temperature is 5.9 °C, based on 16 weather stations, from 1970 to 1999 (information from database of MDDEFP). For the Uplands, the average precipitation is generally higher and average temperature is generally lower. Evapotranspiration is relatively constant for the entire region and is equivalent to 53% of the total precipitation.

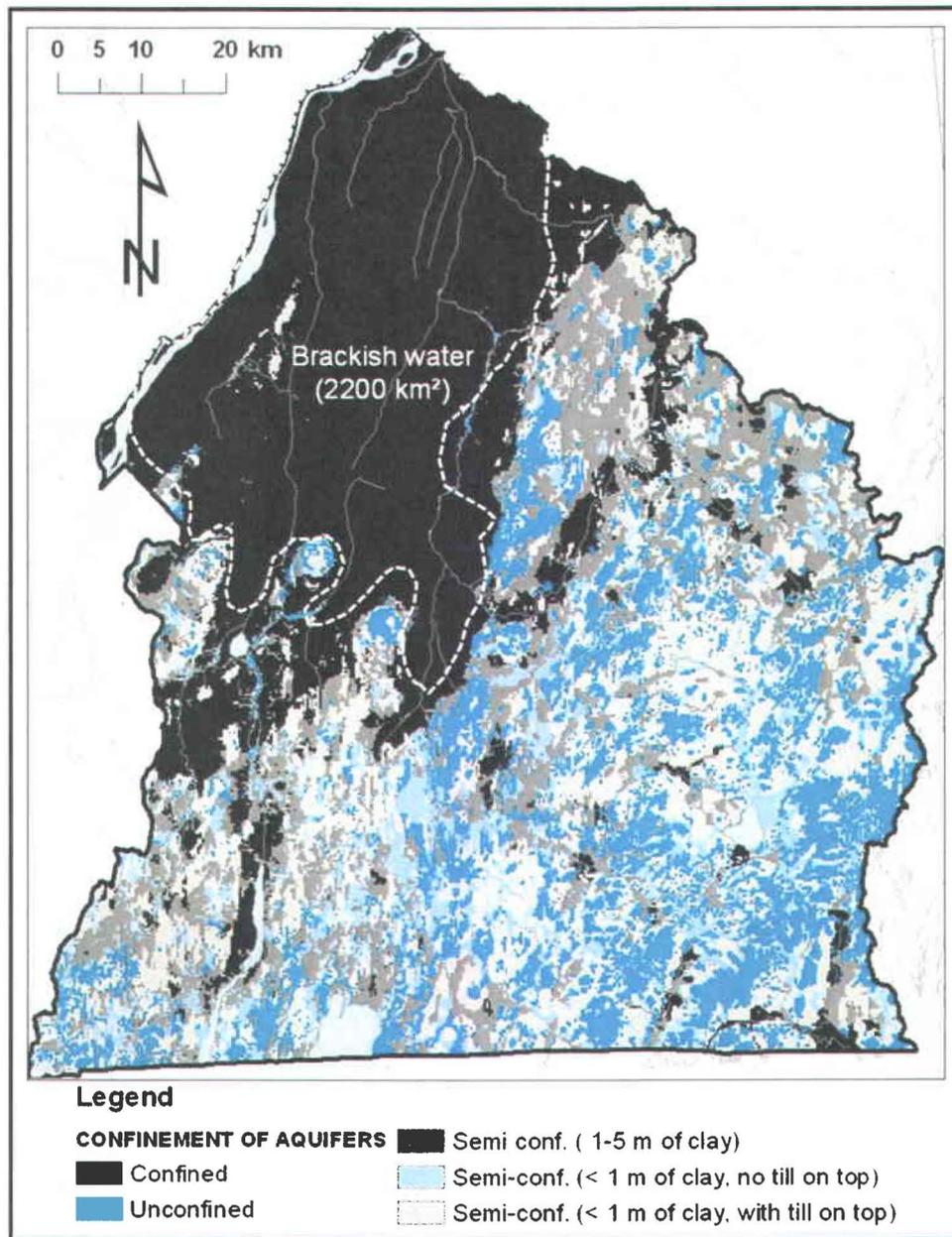


Figure 3.2: Confinement level of aquifers of Montérégie Est and location of the brackish area, in the North.

3.3 Materials and methods

3.3.1 Data collection

Groundwater from 206 wells drilled into rock aquifers, was sampled in 2010 and 2011 throughout the study area. Most of them are private wells (178) or observation wells (28) drilled for the regional study. Each sample is representative of the complete water column of the well and was sampled according to a standard sampling procedure, as described in Appendix B. The analytical program for each sample includes physicochemical parameters and major, minor, and traces inorganic elements such as alkalinity, 30 metals, nutrients and sulfur. Stable isotopes in water ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) were analyzed for a subset of 90 samples. Tritium (^3H) and radiocarbon (^{14}C) were analyzed for dating purposes on 40 samples each. The selection of samples for isotope analyses was based on a need to cover the different hydrogeological contexts, as well as on knowledge of the area.

3.3.2 Data management

Geochemical results were compiled into a database, including the site geographic location, well ID that refers to the full well description in the hydrogeological database, and analytical method used. Concentration of carbonate and bicarbonate ions, TDS, hardness, and ionic balance (in meq/L) were determined using simple equations in a spreadsheet (see chapter 2 for details). The ionic balance acceptance limit was fixed at $\pm 15\%$. A total of 19 samples exceeded that limit; they were therefore rejected at first, then treated separately and integrated into the interpretation. All results reported as “undetected” (below the detection limit imposed by the analytical method) were replaced by 50% of the detection limit value (Sanford et al., 1993).

3.3.3 Data interpretation techniques

A statistical method was first used to sort all results due to the large amount of data to interpret. As suggested by Güler et al. (2002), the multivariate statistical techniques were combined with graphical hydrogeochemical interpretation to meet the objectives of the study.

Multivariate Statistical Analysis (MSA) can be done with a combination of physical and chemical parameters. Parameters considered in the present study were selected based on three types of criteria:

- Parameters available for as many samples as possible;
- A maximum of 10% of a parameter with undetected concentrations;
- Independence of parameters (for example, Eh and pe are dependent).

The 16 parameters selected were *pH*, *TDS*, *pe*, *HCO₃*, *NH₄*, *Ba*, *B*, *Ca*, *Cl*, *Mg*, *Mn*, *K*, *Si*, *Na*, *S* and *SO₄*. Then, the selection of samples for the MSA was also based on two types of criteria:

- Availability of the values for all 16 selected parameters;
- Acceptability of the ionic balance (within $\pm 15\%$);

Results for 190 specific samples from bedrock wells having each 16 specific parameters, constituted the input file for the MSA (190 x 16 matrix). The data matrix is presented in Appendix F.

Hierarchical Cluster Analysis (HCA), an MSA method, was initially carried out with *Statistica 6.1*® to group data into families having common characteristics. To do so, Ward's method was selected as a linkage rule, with Euclidian distances as similarity measurement. The result of the analysis is a tree diagram representing the linkage distance between each sample. This diagram starts with a single cluster including all samples with zero loss of information. When two clusters are joined, information is lost since differences within a given cluster are disregarded. A phenon line, determined by visual inspection, is used to find the right compromise between loss of information and a manageable number of groups.

Then, a Principal Components Analysis (PCA), a second MSA method, was carried out with the same data matrix. PCA is a statistical method for observing trends in a multivariate dataset and simplifies the understanding of the significance of the 16 parameters by creating new components (called principal components) that better explain the variability of the chemical

composition between samples. PCA also helps identify relations between water groups. Results of the PCA are presented in terms of loading values. Only the most significant components are conserved for the interpretation.

3.4 Results

3.4.1 Multivariate Statistical Analysis

At a linkage distance (*phenon line*) of 18, the cluster analysis defined 8 water groups (Figure 3.3 A). It was determined that spatial distribution was coherent with those groups, according to the knowledge of the region: brackish area (already defined) and physiographic contexts (Figure 3.3 B). Numbers assigned to water groups provide indications of their nature or spatial distribution: A1 (light blue), A2 (blue) and A3 (purple) are water groups associated with the Appalachians (Uplands and Piedmont); M1 (red), M2 (orange) and M3 (yellow) are Monteregian or “Mixed” types of water groups; the CS (light green) water group is close to the original Champlain Sea water; and the LL (green) water group mostly occupies the Southern part of the Lowlands. Colors assigned to water groups will be the same throughout the interpretation.

As mentioned before, results of the PCA are presented in terms of loading values. Table 3.1 presents loading values of each parameter for the first 5 components. Components 1 and 2 explain together more than 61% of the variance. The third component only adds 8% and was therefore neglected. The principal component scores for these first two components from each sample (associated to one of the 8 water groups by a color) are illustrated in Figure 3.3 C.

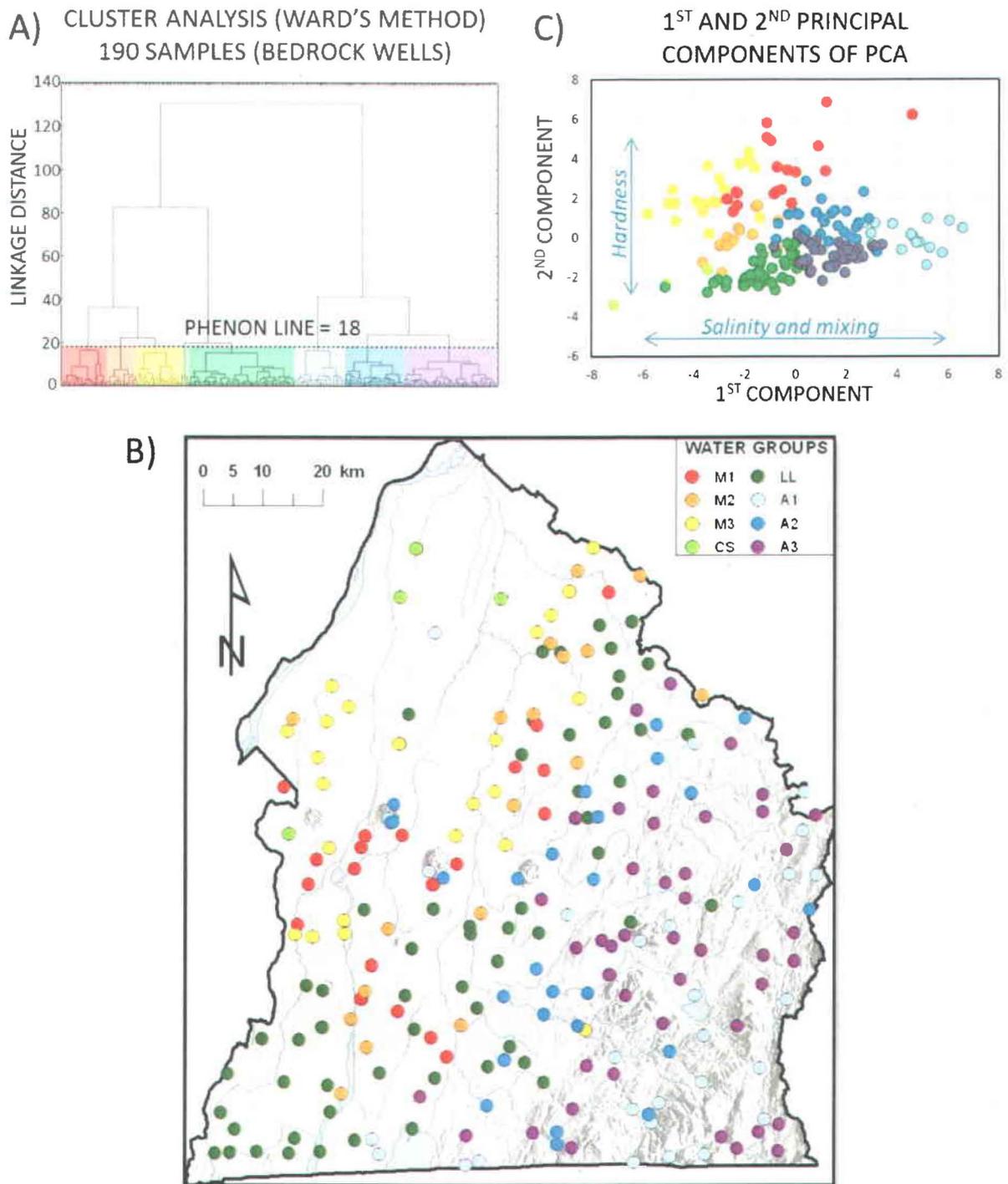


Figure 3.3: Results of the MSA. A) Tree diagram resulting from the Cluster Analysis and defining the 8 water groups, with 8 different colors, below a phenon line of 18. B) Spatial distribution of the 190 samples. C) 1st and 2nd component of the PCA for the 190 samples identified with the color of their group.

Table 3.1: Loading value of each of the 16 parameters for the first 5 components of the PCA.

Parameters	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5
pH	-0.384	0.535	0.117	0.594	-0.054
pe	0.549	0.044	-0.381	-0.475	-0.156
TDS	-0.899	0.065	-0.332	-0.075	0.110
HCO3	-0.834	0.181	-0.015	-0.164	0.172
NH4	-0.831	0.145	0.191	-0.069	-0.019
Ba	-0.693	-0.100	0.489	-0.141	-0.199
B	-0.808	0.439	-0.052	-0.020	-0.099
Ca	-0.162	-0.937	-0.058	-0.063	-0.164
Cl	-0.733	0.017	-0.393	-0.167	0.141
Mg	-0.422	-0.802	0.043	-0.015	-0.221
Mn	-0.286	-0.629	0.123	0.250	0.221
K	-0.793	-0.059	-0.006	-0.224	-0.093
Si	-0.182	-0.525	0.290	-0.135	0.665
Na	-0.803	0.4223	-0.268	0.083	0.061
Sr	-0.603	-0.570	0.002	0.158	-0.356
SO4	0.0164	-0.545	-0.648	0.365	0.103
% total variance	39.180	22.159	8.115	6.028	5.339

Bold values: dominant parameters for each component.

Cluster analysis and PCA provide together a first basis for data interpretation. By considering the important loading values of TDS and other salinity parameters, the first component can be interpreted as a combination of both fresh and saline water. The second component seems to be associated with hardness (variations of calcium (Ca) and magnesium (Mg) concentrations, the most common source of water hardness).

To complete the data interpretation methodology, descriptive statistics were calculated for each of the 8 water groups (table 3.2). Then, the production of several hydrogeochemical graphs (featuring the data identified per group) helped understand the mechanisms responsible for the evolution of groundwater.

3.4.2 Geochemical characteristics of water groups

Based on the water groups defined by the HCA, average geochemical characteristics of water samples from each group have been determined. The average concentrations, calculated for each major ion, provide an indication of the geochemical profile of each water group. To help visualize differences between these groups, Figure 3.4 shows major ion concentrations on a Piper diagram for each sample (Figure 3.4 A), and Stiff diagrams with average concentrations of each group (Figure 3.4 B).

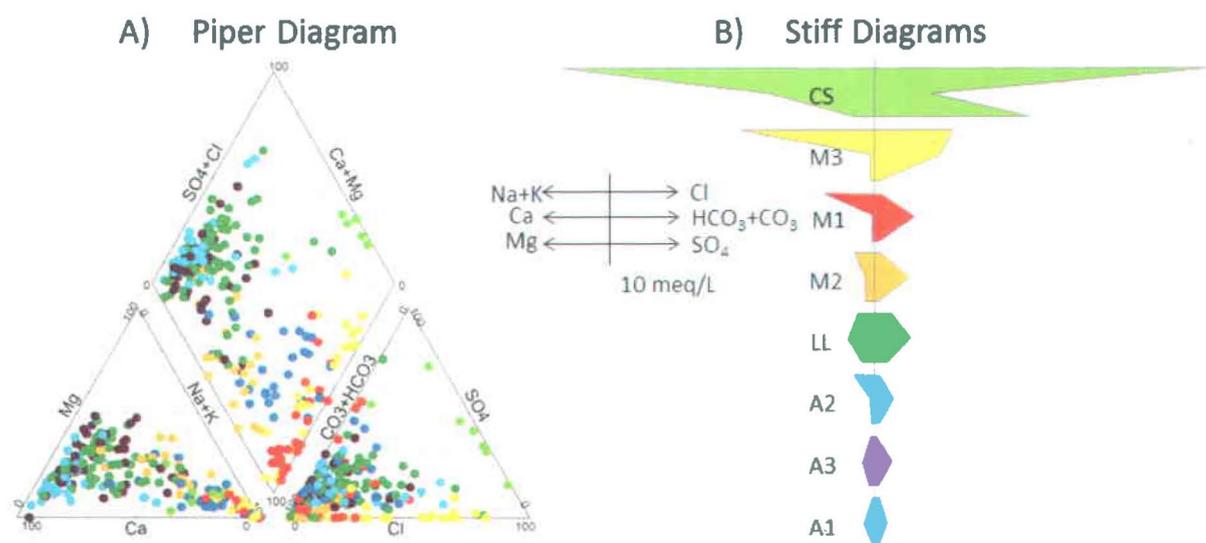


Figure 3.4: Composition in major ions. A) Each samples, associated with his water group (color), represented on a Piper diagram. B) Average ionic composition displayed for each water group represented by a Stiff diagrams. Definition of scales and concentrations of the diagram are displayed on left side of Figure B.

Table 3.2 shows the 25th, 50th and 75th centiles of geochemical parameters for each group. Maximum average values are identified in bold character and minimum average values are underlined.

Table 3.2: Descriptive statistics (25, 50 and 75th centiles) for groundwater geochemical parameters for water groups. Values are expressed in mg/L, except for pH and pe (no unit).

	Parameter	Centile	CS	M3	M1	M2	LL	A2	A3	A1
			N=3	N=19	N=19	N=14	N=46	N=26	N=41	N=22
Physical parameters	pH	25	7.56	7.82	8.19	7.69	7.1	7.48	7.28	5.7
		50	7.59	8.26	8.69	7.805	7.235	7.855	7.83	6.405
		75	7.65	8.79	9.16	8.02	7.52	8.58	8	7.02
	TDS	25	2435	1019	484	425	473	214	239	118
		50	2961	1340	723	517	673	321	283	168
		75	13837	2604	900	658	798	437	348	308
	D.O.	25	0.07	0.2	0.21	0.26	0.3	0.3	0.32	2.09
		50	0.17	0.34	0.32	0.49	0.37	0.525	0.38	5.745
		75	0.37	0.65	1.07	1.18	0.55	1.68	0.79	9.28
	pe	25	-1.02	1.37	0.99	1.12	2.81	3.49	2.26	5.81
		50	-0.41	3.15	2.35	2.09	3.29	5.39	3.55	6.49
		75	1.55	4.27	5.27	2.73	4.53	6.51	6.11	8.01
Major constituents	Na	25	380	260	120	48	22	36	6.4	1.9
		50	630	380	190	74	34	60.5	9.7	4
		75	3900	730	240	97	58	98	19	8.8
	Ca	25	180	4.4	0.98	20	55	8.7	25	21
		50	310	9.2	3.8	30	85.5	12.5	35	28
		75	1200	15	6.8	42	120	18	50	57
	Mg	25	17	3.6	0.22	12	17	3.2	8.8	2.5
		50	110	11	1.5	17.5	28	4.45	11	4.25
		75	220	13	2.7	25	34	6.7	14	8.2
	Cl	25	87	84	9.5	16	21	7.6	1.6	0.93
		50	340	260	39	25.5	38	14	7.9	6.3
		75	6600	920	64	37	80	45	15	16
	SO ₄	25	860	0.2	6.2	0.4	46	17	15	8.1
		50	1500	0.5	13	2.2	66.5	27.5	18	13
		75	1700	7.7	51	14	100	39	26	21
	HCO ₃	25	145.9	526.6	253.9	287.1	243.7	133.9	145.1	68.4
		50	158.0	642.1	351.5	355.6	329.0	180.4	158.4	89.0
		75	778.6	752.4	513.8	412.8	402.2	236.2	218.1	146.0
Minor constituents	K	25	8.6	3.3	1	3.6	2.2	0.44	0.55	0.38
		50	23	5.6	1.7	4.95	3.05	0.835	0.8	0.74
		75	48	11	2.5	5.6	4.8	1.4	1.1	1.2
	Sr	25	5.7	0.44	0.084	1.6	0.99	0.3	0.38	0.12
		50	9.1	0.83	0.19	2.85	1.85	0.905	0.6	0.2
		75	26	1.9	0.41	4.4	2.8	1.5	0.8	0.28
	Fe	25	0.36	0.067	0.015	0.015	0.071	0.015	0.046	0.015
		50	1.2	0.14	0.015	0.17	0.36	0.024	0.11	0.015
		75	8.1	0.27	0.055	0.29	1.4	0.12	0.26	0.015
	F	25	0.4	0.6	0.6	0.3	0.1	0.2	0.05	0.05
		50	0.5	1.2	1	0.5	0.1	0.45	0.1	0.05
		75	0.8	2	2.3	0.9	0.2	0.6	0.2	0.05
CO ₃	25	0.174	1.368	2.488	0.505	0.147	0.150	0.148	0.001	
	50	0.219	2.665	6.821	0.716	0.190	0.576	0.266	0.009	
	75	0.892	10.719	12.621	1.363	0.299	2.645	0.566	0.042	
N-NO ₂ + N-NO ₃	25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.14	
	50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.43	
	75	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	0.01	0.01	1.3	
NH ₄	25	0.9	0.71	0.27	0.79	0.16	0.03	0.04	0.01	
	50	2.8	1.5	0.47	0.96	0.26	0.045	0.06	0.03	
	75	5.3	1.8	0.71	1.1	0.43	0.12	0.1	0.05	
Trace constituents	Ba	25	0.0048	0.25	0.027	0.39	0.094	0.012	0.051	0.0042
		50	0.016	0.6	0.074	1.15	0.15	0.033	0.074	0.0115
		75	0.023	1.6	0.19	1.5	0.24	0.072	0.13	0.041
	B	25	0.57	0.46	0.24	0.18	0.03	0.014	0.005	0.0025
		50	1.2	0.51	0.36	0.225	0.0505	0.038	0.009	0.0025
		75	1.6	0.75	0.5	0.3	0.088	0.065	0.016	0.014
	Br	25	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
		50	0.5	0.5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
		75	32	2.5	0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Mn	25	0.24	0.0034	0.0023	0.014	0.035	0.011	0.03	0.00069
		50	0.36	0.011	0.0055	0.023	0.0785	0.0265	0.071	0.00225
		75	2.1	0.033	0.012	0.079	0.36	0.049	0.13	0.0096

Note: **Bold values**: Maximum median value for a parameter. / Underlined values: Minimum median value for a parameter.

Variations of pH (log of hydrogen activity) and pe (log of the electron activity) are good indicators of groundwater evolution. Figure 3.5 shows the average values of pe and pH for each water group, as well as the main range of values (“error bars” indicate the values of the 25th and 75th percentiles).

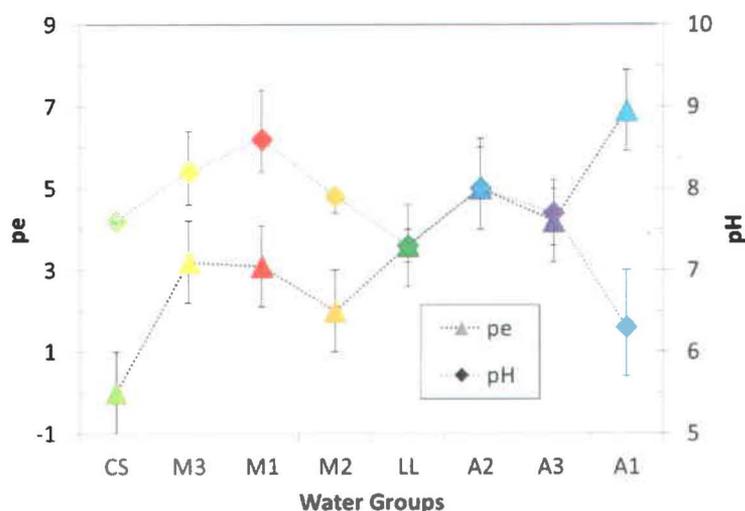


Figure 3.5: Average pe and pH values for each of the eight water groups. The presentation order of water groups is based on the spatial relations between groups. The two main end-members (CS and A1) were placed at each ends of the graph.

Each water group identified in Montérégie Est shows pe values from mildly to strongly reducing waters (Hounslow, 1995). The A1 water group shows the most oxidant conditions with the highest dissolved oxygen concentration (average values between 2.1 and 9.3 mg/L), which are consistent with a Ca-HCO₃ recharge water type. On the other hand, the CS water group has strongly reducing conditions, with the lowest dissolved oxygen concentration (average concentration of 0.2 mg/L).

In terms of pH, Figure 3.5 shows that waters from the A1 group are moderately acidic, waters from the CS, LL and A3 groups are nearly neutral (slightly alkaline), and waters from the M1, M2, M3 and A2 groups are moderately alkaline (Hounslow, 1995), with M1 being the most alkaline water group. The relatively high alkalinity of the “M” family groups and the A2 group is interpreted to result from ionic exchange, as will be discussed later. The highest pH is associated with the M1 water group, which has the highest extent of Na-Ca ionic exchange.

3.4.3 Spatial distribution of water groups

The geographic distribution of each group is represented on Figure 3.6. Extend of each polygon was extrapolated considering each of the 190 rock aquifer samples (location and water group), but also by considering the topography and the potentiometric map (Carrier et al., in prep.).

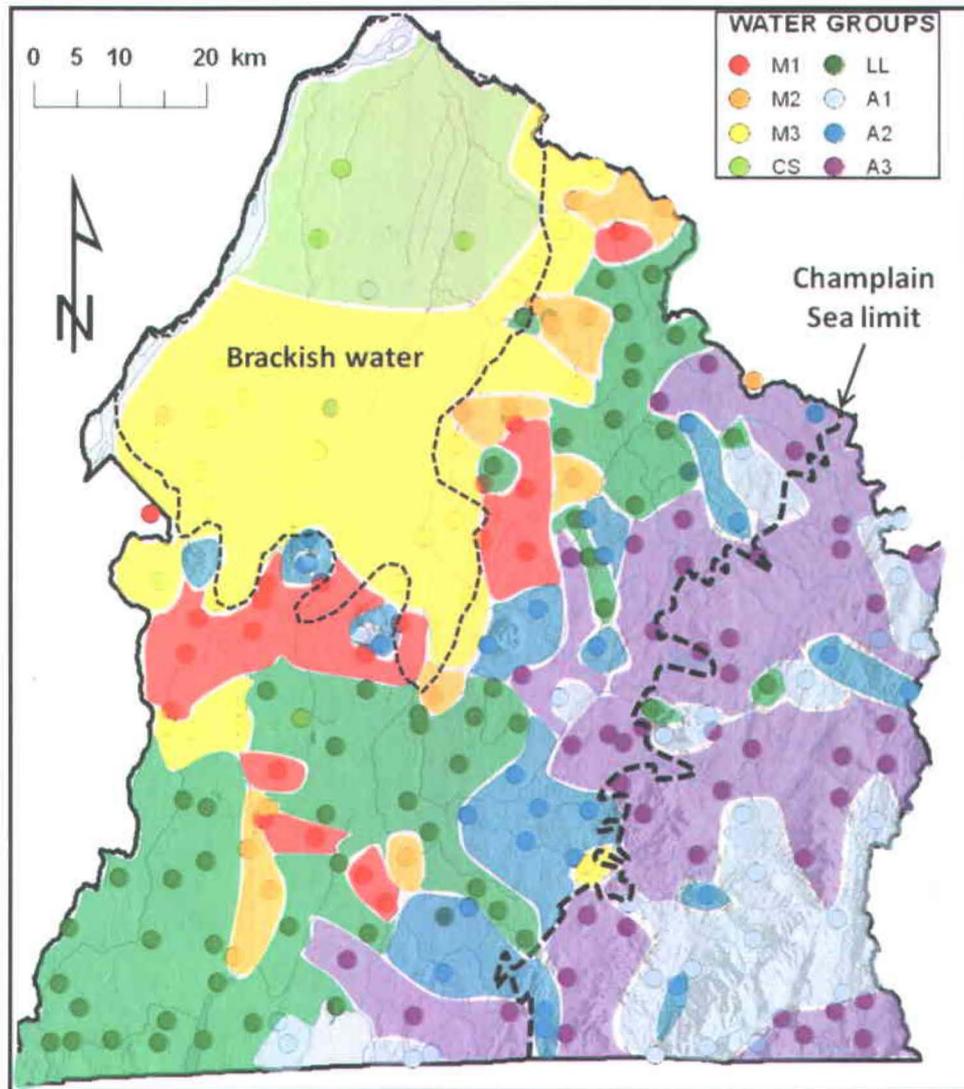


Figure 3.6: Geographical distribution of the eight water groups in Montérégie Est. Champlain Sea maximum limit is represented by a dashed line. Lands located on the left side of the limit were under the sea level ~11 000 years ago.

Brackish water groups CS and M3

The brackish groundwater area, located in the Northern Lowlands, is associated with water groups CS (Champlain Sea) and M3 that are characterized by significant concentrations of Na^+ and Cl^- in areas under confined conditions (Figure 3.2). CS waters are found at the northern extremity of the study area, whereas M3 waters are found in the southern part and eastern fringe of the brackish groundwater area. The CS group is dominated by the Na^+ , Cl^- , and SO_4^{2-} ions, and has the highest concentrations of total dissolved solids (TDS) as well as reducing conditions. The M3 group is dominated by Na^+ , HCO_3^- and Cl^- ions and is less concentrated in TDS than the CS group, but it is quite alkaline. M3 has the highest HCO_3^- concentrations. CS waters show significant concentrations of Sr, Fe, As, S, B and Mn, in decreasing order of importance relative to concentrations found in the study area. M3 waters have relatively high concentrations of F, Ba, B and As. CS and M3 waters are undrinkable.

Monteregian and mixed water groups (fresh and saline) M1, M2 and LL

The area containing brackish groundwater is surrounded by water groups M1 and M2 and, further south and east by LL water group in the Southern Lowland and north-western part of the Piedmont. M1 and M2 waters are found in areas that are confined or semi-confined, whereas LL waters are found under semi-confined and unconfined conditions. The M1 group has the most alkaline waters of the study area and is dominated by Na^+ and HCO_3^- ions. M1 waters have extremely low concentrations of Ca^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , but have relatively high concentrations of F and S. The M2 group is of Na- HCO_3^- water type, with very low sulfate concentrations, but relatively high concentrations of Ba, F, S and Sr. LL water group is of Ca^{2+} - HCO_3^- water type, which is common for recently recharged groundwater, as indicated by the relatively low residence time of these waters. LL waters have a relatively high TDS average concentration that is indicative of a remnant of Champlain Sea water signature. LL waters have relatively high concentrations of SO_4 , Fe, Mn, Si and Ba and variable concentrations of Cl. The Si concentration of LL waters are actually the highest of the water groups found in the study area, which are inferred to be related to a slow water infiltration rate through thick till deposits.

Appalachian water groups A1, A3 and A2

The Appalachian groups (A) have quite distinctive geochemical conditions relative to other water groups. Group A1 waters are of Ca-HCO₃ water type, which is consistent with recent recharge as shown by tritium and ¹⁴C data. A1 waters are found mostly in the south-east of the Appalachian Uplands and in Monteregian Hills that are mostly under unconfined to semi-confined conditions. The low pH and high pe of A1 indicate oxidizing and acidic conditions. Water groups A3 and A2 are relatively more evolved waters, compared to A1, although A3 is still a Ca-HCO₃ water type, whereas A2 is a Na-HCO₃ water type. A3 waters are dominant in the Appalachian Uplands and in the north-east part of the Piedmont, which are under semi-confined or unconfined conditions. A2 waters have relatively high concentrations of Mn, Fe, S and As. Water group A2 is found mostly at the western fringe of the southern half of the Piedmont, as well as on Monteregian Hills. A2 waters are mostly found within the limit of the Champlain Sea maximum transgression (Figure 3.6). A2 waters have relatively high concentrations of F, S, Mn and U.

3.4.4 Groundwater dating

Tritium and radiocarbon can provide indications of groundwater residence time that can support the interpretation of groundwater geochemical evolution and relations between the water groups found in Montérégie Est. Overall, 41 samples were analyzed for tritium and 39 for radiocarbon. Figure 3.7 A relates tritium and uncorrected radiocarbon ages. Samples analyzed for only one of those two parameters are also represented, in the left and bottom margins of the graph. Descriptive statistics for tritium and radiocarbon data are displayed in Table 3.3.

Water groups LL and A1 have Ca-HCO₃ water types that can be indicative of non-evolved recent recharge groundwater (Clark and Fritz, 1997; Cloutier and al., 2010). Data from these water types plot on the top-left corner of the graph in Figure 3.7A, with results over 10 tritium units (TU) and uncorrected ¹⁴C ages under 4000 years before present, which confirm they are young groundwaters in recharge areas or that have had relatively short duration flow paths from recharge areas. At the other end of the age spectrum, Champlain Sea water group CS indicates 2 results (radiocarbon only) of uncorrected ¹⁴C ages near 14 000 years, which are quite consistent

with the Champlain Sea period, thus showing that uncorrected ^{14}C ages may provide relatively representative residence times for that water group. Intermediate tritium and ^{14}C ages for water groups M2, A3, M1 and A2 indicate the importance of young and old water mixing. Overall, the residence time increases from A1 to A3 and A2, which would lead to more evolved waters and is consistent with results shown later for Appalachian water groups. The increase in residence time from LL to M2, to M3 and to CS is consistent with groundwater evolution and mixing with old Champlain Sea water. The M1 water group has relatively long residence times, despite the presence of tritium showing some mixing with young groundwater. As discussed in Section 3.6, an uncertainty remains about the actual origin of the M1 water group and the reason for its long residence time despite its location near some preferential recharge areas of the Monteregian Hills.

Table 3.3: Descriptive statistics (25, 50, and 75th centiles) for tritium and radiocarbon data.

Parameter	(Units)	Centile	M1 N=3	M2 N=3	M3 N=3	CS N=1	LL N=6	A1 N=1	A2 N=8	A3 N=11
^3H	(T.U.)	25	3.2	1.0	0.0	6.6	10.4	12.5	0.4	6.3
		50	3.9	7.3	<u>0.0</u>	6.6	12.1	12.5	2.7	7.4
		75	4.9	9.6	0.0	6.6	12.6	12.5	4.2	9.7
Parameter	(Units)	Centile	M1 N=4	M2 N=5	M3 N=4	CS N=3	LL N=4	A1 N=1	A2 N=6	A2 N=7
^{14}C ages	(yB.P.) ¹	25	7515	3100	6555	2140	175	3070	8960	4390
		50	8825	4020	10190	13840	<u>910</u>	3070	10605	8820
		75	11155	5370	13800	14390	3275	3070	12570	10120
$a^{14}\text{C}$	(fmC) ²	25	0.0016	0.0023	0.0015	0.0016	0.0028	0.0033	0.0015	0.0017
		50	<u>0.0018</u>	0.0025	0.0019	0.0023	0.0033	0.0033	<u>0.0018</u>	0.0025
		75	0.0019	0.0028	0.0021	0.0038	0.0036	0.0033	0.002	0.0028
$\delta^{13}\text{C}$	(‰)	25	-16.25	-18.80	-22.50	-24.60	-16.25	-14.60	-17.70	-18.00
		50	<u>-14.15</u>	-18.00	-19.50	-22.70	-14.45	-14.60	-16.55	-15.90
		75	-12.85	-16.00	-16.35	-17.70	-12.90	-14.60	-15.50	-15.30

Note: **Bold values:** Maximum median value for a parameter. / Underlined values: Minimum median value for a parameter.

¹ The uncorrected ^{14}C ages are expressed in years before present (B.P.).

² The ^{14}C activity ($a^{14}\text{C}$) is expressed as a fraction of modern carbon (fmC).

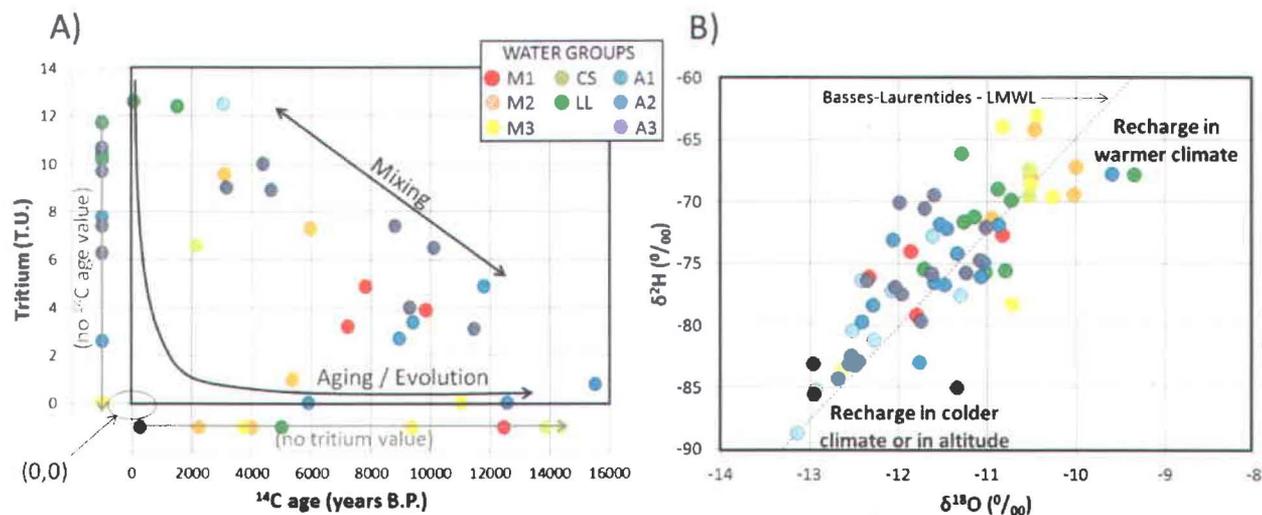


Figure 3.7: A) Water groups dating with tritium (³H is in tritium units (T.U.)) and radiocarbon (¹⁴C is in years before present (BP)). Samples analyzed for only one of those two parameters are still represented, in the left and bottom margins of the graph. B) Groundwater isotopic composition illustrated by groups and compared to the Basses-Laurentides meteoric water line.

3.4.5 Water origins

As a part of the water cycle, groundwater can be characterized according to its isotopic composition ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) (Clark and Fritz, 1997). A comparison with local meteoric water lines (LMWL) can help understand water origin in terms of climate or altitude. The most representative LMWL found for Montérégie Est is the one created by Cloutier (2004) for the Basses-Laurentides region, located some 80 km to the west. The Basses-Laurentides meteoric water line and isotopic composition of samples from the eight water groups of Montérégie Est are displayed in Figure 3.7B.

As discussed previously, Champlain Sea water is composed of a mixture of sea water (34%) and fresh water from precipitation and melting glaciers (66%). So, considering that the world average sea water composition is close to 0 ‰ as concentration for both isotopes (VSMOW reference: $\delta^2\text{H}=0\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O}=0\text{‰}$), it is expected that the CS water group will be a mixture of low isotope fractionation water (sea water) and high isotope fractionation water (melting glaciers and precipitation at high latitude). According to Figure 3.7 B, the CS water group, as well as the

Lowlands related water groups as M2, M3 and LL, plot on the top of the graph, with the lowest isotopic ($\delta^2\text{H}$) fractionation.

On the other hand, water groups associated with topographic highs (Monteregian Hills, Piedmont and Uplands), plot on the low section of the graph. This is representative of a recharge in cold conditions or at high altitude. The M1 water group plots with A1 to A3 water groups. This information supports the hypothesis that the M1 water group is the result of a mixing between fresh water originating from the Uplands and saline water from the Lowlands.

3.5 Interpretation of geochemical processes

The geochemical processes discussed here are the mixing of brackish water with fresher waters, carbonate dissolution and ionic exchanges between Na^+ and Ca^{2+} ions. Since the former presence of the Champlain Sea over the study area exerts an important control over groundwater geochemistry in Montérégie Est, the origin of groundwater salinity will first be discussed.

3.5.1 Origin of groundwater salinity

The study area was partly covered by the Champlain Sea from approximately 9 500 to 11 000 years ago. As demonstrated by Cloutier and al. (2010) for an area located 80 km west of Montérégie Est, the Champlain Sea water could have invaded the fractured rock aquifer and impart an important geochemical signature on groundwater. Cloutier and al. (2010) show that the Champlain Sea water was 34% sea water mixed with 66% of fresh water from melting glaciers and precipitation. Their calculation was based on the Br/Cl ratio that remained constant in the sea water, with original concentrations of 0.8385 mmol/L of Br for 535.92 mmol/L of Cl. Figure 3.8 shows the Br versus Cl concentrations (in mmol/L) for groundwater sampled in the study area. Samples are identified by the colors of their respective group. The black cross represents the global sea water composition (Hem, 1985), the white circle represents sample S77 found in the Cloutier and al. (2010) study area that is considered representative of the Champlain Sea water composition. Samples from water groups CS and M3 plot close to the dashed dilution line: between Champlain Sea water and fresh water. This means that the brackish area in the north of Montérégie Est originated from the Champlain Sea invasion. The CS group composition is

similar to the Champlain Sea composition and the M3 group is diluted sea water with fresh water. So, the CS water group is considered to be an end-member representing the original input of brackish Champlain Sea water into the regional rock aquifer in the areas formerly covered by the sea (Figure 3.6).

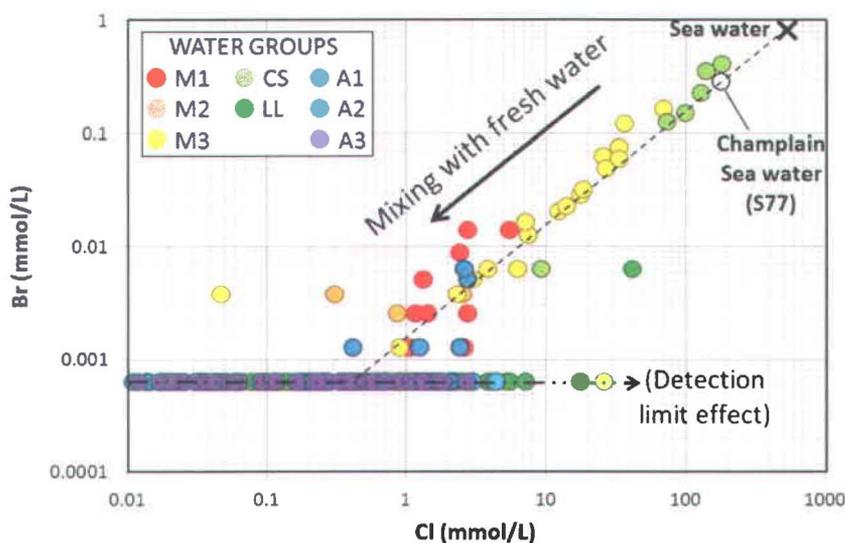


Figure 3.8: Sea water mixing. Typical Br / Cl ratio illustrates dilution of seawater by fresh water. Champlain Sea water is composed of 34% of seawater diluted by fresh water. Montréal Est samples form group CS and M3 plots on the mixing water line (Colors of water types shown on Figure 3.6).

Carbonate dissolution

Limestones and dolomites contain Ca and Mg minerals (responsible for the water hardness) that dissolve relatively easily in groundwater, especially in recharge areas, where low pH rainwater infiltrates in the aquifer (Appelo and Postma, 2005). Figure 3.9A shows the saturation indexes of dolomite and calcite (both carbonates) for samples from all water groups. Group A1 (light blue) is especially under-saturated with respect to carbonates, which means that if carbonates are present in the aquifer, they will potentially dissolve. Group LL seems to be more in equilibrium with dolomite and somewhat under-saturated with respect to calcite.

The chemical equation of calcite (CaCO_3) dissolution is the following:



This reaction explains why the type of water associated with recharge is generally $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$. Water groups LL (green) and A1 (light blue) are good examples of the carbonate dissolution mechanism as shown by the Ca versus HCO_3^- graph of Figure 3.9 B. Water groups A3 (purple) and M2 (orange) also seem to be affected by calcite dissolution, but with less intensity than A1 and LL groups.

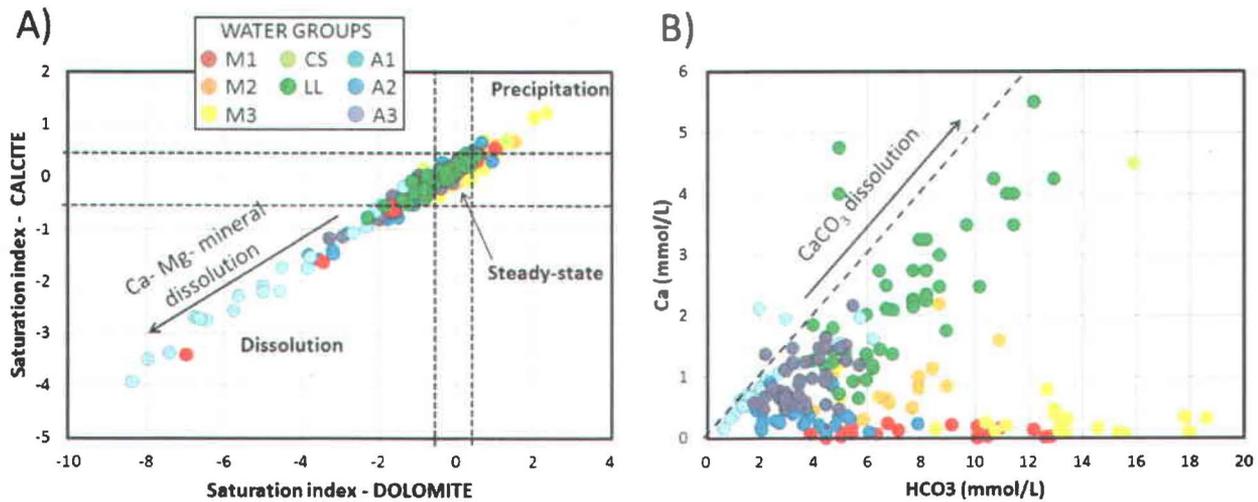


Figure 3.9: Carbonate dissolution mechanism dominant for water groups A1 and LL. A) Saturation index of calcite and dolomite shows the high dissolution potential of Ca- and Mg- minerals mainly for groups A1. Groups LL seem to be close to saturation. B) Ca / HCO_3^- ratio (in mmol/L) with the 1:2 dissolution line (dashed line). Water groups A1, LL and, with less intensity A3 and M2 follow the line.

The mechanism of carbonate dissolution controls Ca and HCO_3^- concentrations for water group A1, while other processes may influence these concentrations for water group LL. Both groups are located in unconfined to semi-confined conditions in areas contributing to the regional aquifer recharge (Carrier and al., in prep.). Water groups A1 and LL are thus both considered as end-members representing fresh recharge water input into regional rock aquifers.

3.5.2 Freshening / Ion exchange

Gibbs (1970) explained mechanisms controlling world water chemistry with a graph similar to Figure 3.10 A, showing precipitations, groundwater and sea water relative to TDS concentrations and Na/(Na+Ca) ratios. Figure 3.10 A shows the progressive increase of TDS between rain infiltration that evolves up to groundwater with geologic influence in the case of water groups A1 and A3. The calcium concentration, relative to sodium, increases due to carbonate dissolution as discussed previously. On the other hand, sources of sodium are limited to sea water (characterized by halite dissolution, NaCl), some silicates and a few rarer minerals (Hounslow, 1995). Water group CS represents sea water with a significant TDS and sodium (Na) concentrations (TDS scale is logarithmic). Water group LL is partly the result of mixing between fresh water with geologic influence and sea water. However, a different mechanism seems to be responsible for the radical increase of sodium relative to calcium, with constant TDS concentration, especially for water groups M1 and A2. The mechanism identified is freshening due to Na-Ca ion exchange.

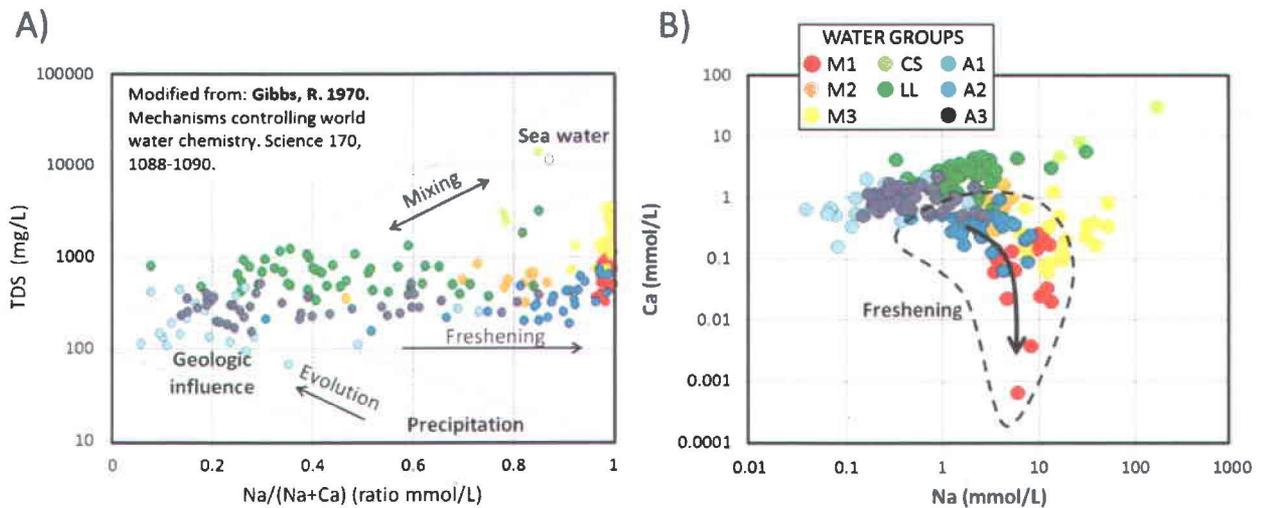


Figure 3.10: Evidence of freshening due to Na-Ca ion exchange. A) Gibbs' representation of the mechanism controlling world water chemistry. Na/(Na+Ca) ratio generally varies with the geologic influence or the mixing with sea water, but, in the present case, variation is affected by freshening: ionic exchange between Na and Ca. B) Ca versus Na concentrations in mmol/L (logarithmic scales) featuring the drastic decrease of Ca, typical for a freshening mechanism.

Some of the aquifer materials such as clay minerals (abundant in shales of the Lowlands (Globensky, 1985)), organic matter, and metal oxy-hydroxides have the property to sorb ions (Appelo and Postma, 2005). An adherence is created between cations and the solid surface of the material. This is called the adsorption phenomenon. Under steady-state chemical conditions, the exchanger (site of adsorption) is occupied by the dominant cations. In fresh aquifers, Ca^{2+} is often dominant. When sea water infiltrates the aquifer, Na^+ becomes a dominant cation and gets adsorbed. When freshening occurred, after the Champlain Sea had receded, Ca^{2+} moved Na^+ out of the exchanger to get re-adsorbed. The consequence of this ionic exchange, called freshening, is a rise in the amount of sodium found in solution, accompanied by a drop in calcium concentration as shown by Figures 3.10, A and B. Those Na- water groups (M1, M2, M3 and A2) are generally associated with confined to semi-confined conditions, in bedrock containing clay minerals, inside the Champlain Sea transgression line (Figure 3.6). The M1 group has the higher freshening level and although it is not an end-member representing a provenance of groundwater, it represents the ultimate state of groundwater evolution following Na-Ca ion exchange.

3.5.3 Mixing

As discussed in the previous section, the graph in Figure 3.3C features water groups according to the 1st and 2nd components of the PCA. Figure 3.11A shows the same graph as the previous one, but in order to explain the mechanism of mixing. This graph also identifies the groundwater end-members recognized in the study area, as suggested in (Valder and al., 2012).

By associating the first component of Figure 3.11A with salinity and TDS, we can observe the mixing process. TDS, or salinity, decreases from the left side of the graph to the right: between brackish compositions of the CS end-member (Champlain Sea water), to the fresh water of the A1 end-member (recharge in the Appalachians). The A1 group is characterized by the lowest TDS concentrations among water groups. The LL end-member is found between the A1 and the CS groups. The LL water group features similar characteristics as A1 (recharge water with low pH and calcite dissolution mechanism) but with much higher TDS, representative of diluted sea water. The mixing with residual Champlain Sea water (which is trapped in the aquifers and the

overlying till) and the presumed slow flow where topography is nearly flat, could explain the high TDS concentrations of the LL group that still bear the geochemical signature of the Champlain Sea water.

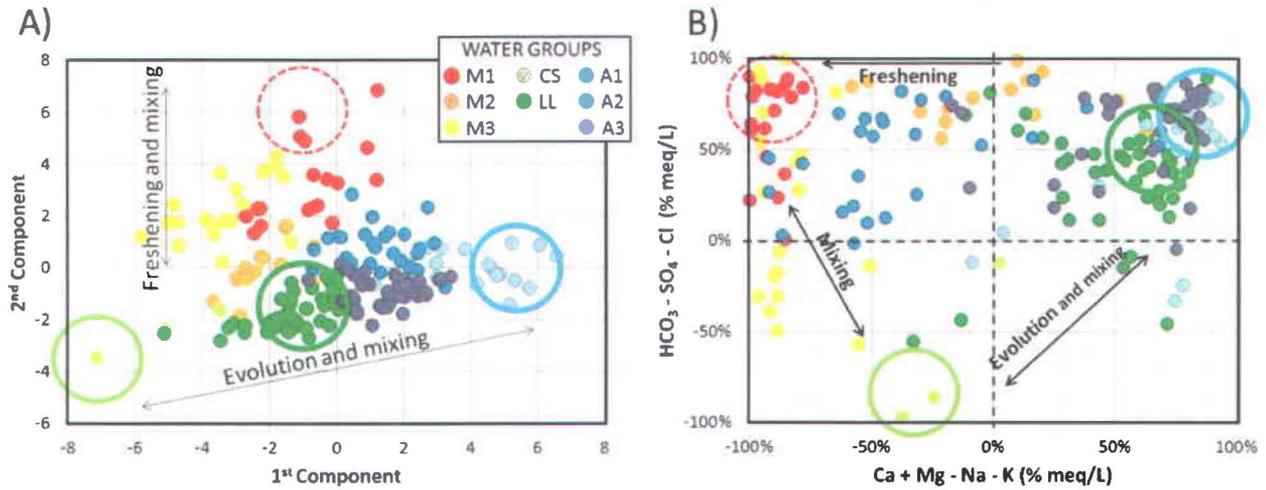


Figure 3.11: Mixing mechanisms explained with end-members. A) 1st and 2nd components of PCA showing the end-members and illustrating the mixing between water groups. B) Relative concentrations of major cations (X axis) and major anions (Y axis), similar to a Piper plot, supporting the explanation based on PCA.

The same reasoning can be applied to major ions shown in Figure 3.11 B. Similar to the traditional Piper diagram, the X axis shows relative concentrations in major cations and the Y axis shows the relative concentrations of major anions (in percent and calculated in meq/L). Three circles (with a continuous line) identify the 3 end-members, A1, LL, and CS. Based on the ionic composition of these groups, the LL water group plots between the two others, supporting the mixing hypothesis introduced earlier.

The 2nd component of PCA of Figure 3.11A has been associated to hardness. The figure shows how M1 (red), M2 (orange), M3 (yellow), and A2 (dark blue) groups have important differences in their hardness, which have been identified by freshening mechanisms compared to the other groups. The M1 group is associated with the highest level of Ca-Na ion exchange; it is identified as a water evolution end-member, with a dashed-line circle. The freshening is also clearly identified in Figure 3.11B where sodium-rich waters are found in the top left corner of the graph.

Based on the fact that the highest concentration of sulfates and chlorides are associated with the CS water type, we can presume that vertical variations on that graph are mainly explained by its mixture with sea water (brackish or residual).

Therefore, water group M3 is probably a mixture, or an overlap of groups M1 and CS. For the same reasons, M2 is probably a mixture of groups M1 and LL. Geographically, such mixing makes sense. Due to the geographic distance between A2 and M1, A2 is not a mixture between A1 and M1. These relations will later be reviewed in the conceptual model section.

3.5.4 Other mechanisms

Due to the heterogeneity of the aquifer system environment, many more secondary mechanisms control the chemical composition of groundwater. Two of them were studied due to their consequences on the quality of water: the presence of high concentrations of barite and fluorite.

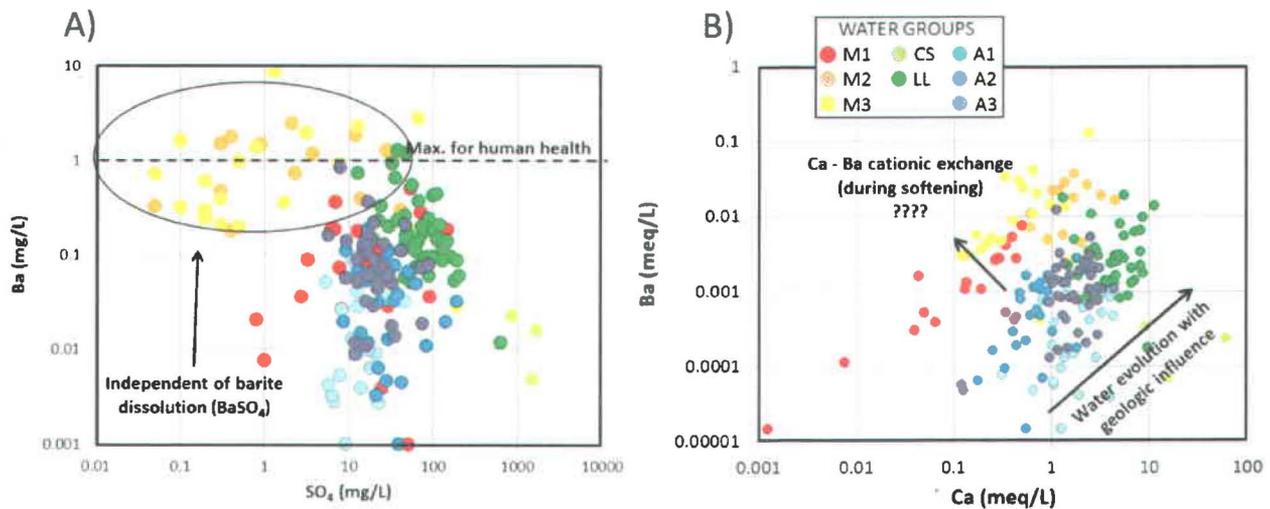


Figure 3.12: Hypothesis for barium ionic exchange. A) The variations in Ba concentrations are independent of barite (BaSO₄) dissolution for water groups M2, M3, and LL. B) Ionic exchange effects on Ba and Ca concentrations.

Ionic exchange of barium

Problematic concentrations of barium in groundwater are observed in the Lowland and the Piedmont. Those concentrations are in association with water groups M2, M3, and LL. According to the provincial government regulation, concentrations of barium that are above 1.0 mg/L are considered a health risk (Gouvernement du Québec, 2012).

Desorption of fluoride

Water groups M1, M2, M3, and A2 are associated with high concentrations of fluoride that are sometimes beyond the acceptable limit for drinking water of 1.5 mg/L (Gouvernement du Québec, 2012). A common sink of fluoride is adsorption by kaolinite (Hounslow, 1995). The formula for kaolinite clays is $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Due to the similarities between OH^- and F^- anions, a substitution can occur under relatively low pH conditions (Hem, 1985). Desorption of fluoride can generally occur when pH is above 7.5, which is found to occur in the study area (Figure 3.13). Water groups affected by fluoride desorption are all affected by Ca-Na ionic exchange.

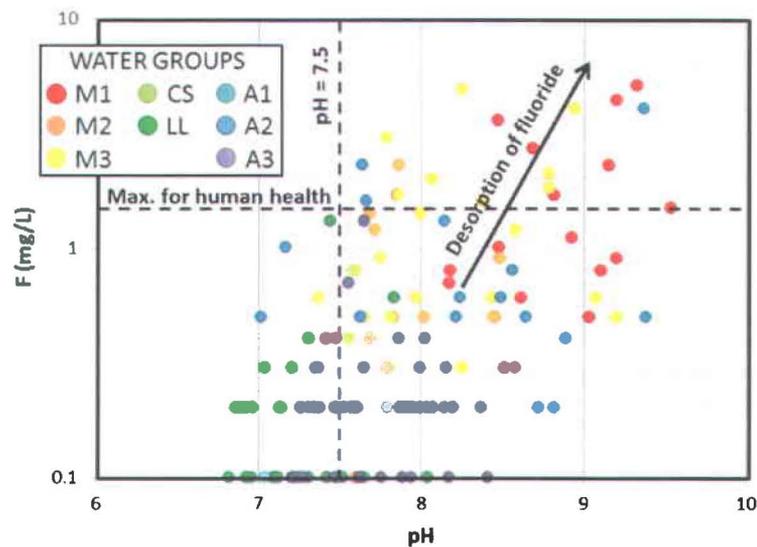


Figure 3.13: Desorption of fluoride from kaolinite when pH > 7.5.

3.6 Conceptual model and discussion

The integration of all available geochemical data and their interpretation provides the basis for the development of a conceptual model of regional groundwater geochemical evolution in the study area. Figure 3.14 summarizes the relations between all water groups and represents the main mechanisms responsible for groundwater evolution.

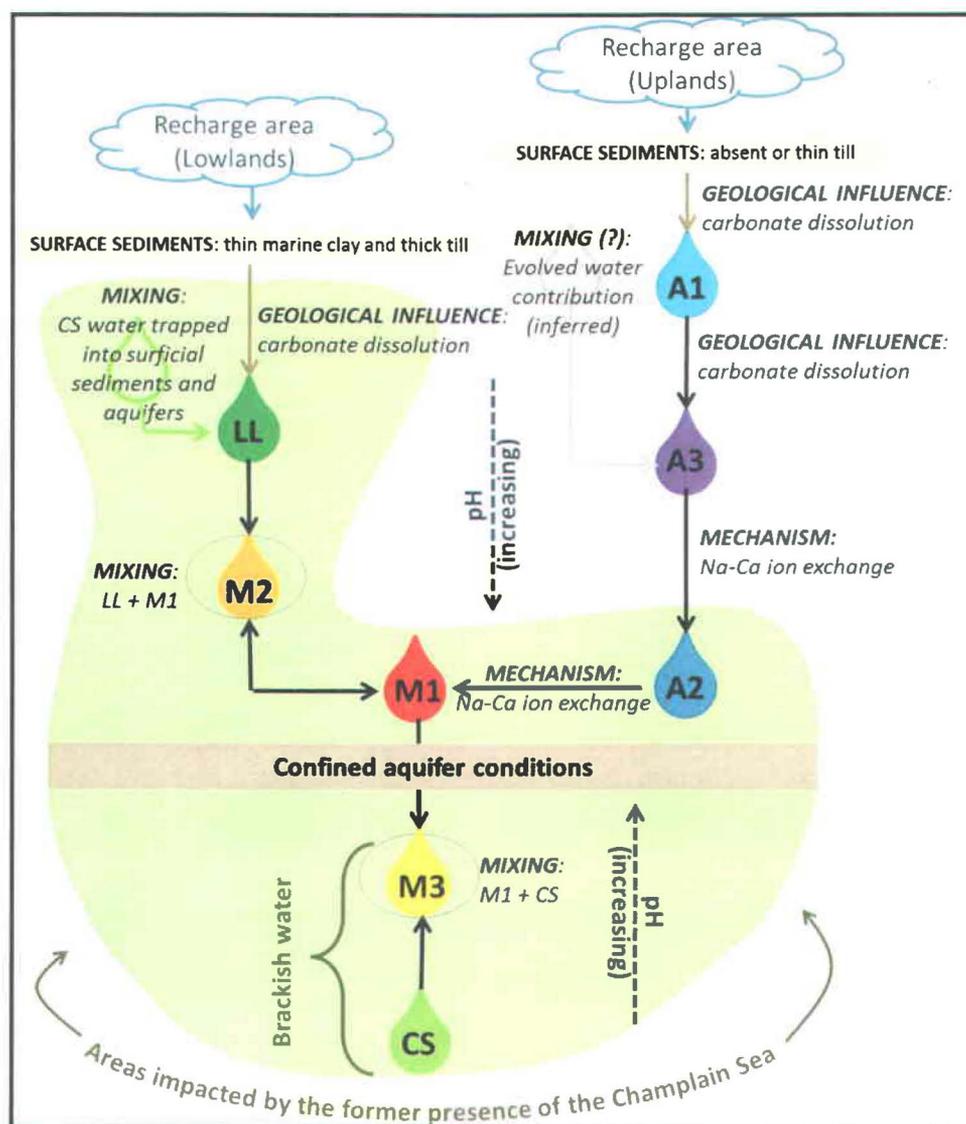


Figure 3.14: Conceptual model of groundwater geochemical evolution in Montérégie Est. Each one of the 8 water groups is represented with the direction of evolution (arrows) and the main mechanisms involved (mixing, geological influence, ion exchange).

Figure 3.15 is a schematic representation of the Montérégie Est regional flow system interpreted with the hydrogeochemical knowledge provided by this study. The cross-section starts from the Appalachian Uplands to the east, goes through the Rougemont Monteregian Hill and then branches northward through the brackish groundwater zone, towards the St. Lawrence River. Black arrows are a schematic representation of groundwater flow. Aquifer recharge geochemical characteristics are mainly related to altitude or the physiographic context.

Champlain Sea invasion area (CS, M1, M2, M3, LL, A2)

The area of the aquifer system at lower altitude is affected by the Champlain Sea invasion (Northern and Southern Lowlands, Piedmont) and by a slower groundwater flow due to generally flat topography. This area also has relatively low aquifer recharge, especially in the northern part of the Lowlands. Furthermore, important groundwater discharge seems to occur at the western edge of the Piedmont, either due to a topographic effect of the presence of thrust faults, so the low-lying area does not receive a major contribution of groundwater originating from the Uplands. The Champlain Sea environment is mostly characterized by brackish groundwater (well preserved in confined conditions - CS water group - or "residual" in semi- to unconfined conditions - LL water group) and by important concentrations of sodium (and other residual components) in solution or adsorbed by the clay minerals of the rock aquifer made up in large part of shales and mudstones. Freshening occurs when fresh water mixes with brackish water in aquifers containing clay minerals (water groups M1 and A2). When bedrock does not contain clay minerals, or when freshening has already been completed, the mixing of trapped or residual brackish water with fresh water occurs more as a simple dilution (LL water group). Water groups M2 and M3 represent transition zones (or mixing zones) between those three contexts: well preserved brackish water (CS), freshening contexts (M1 and A2) and brackish water simply diluted by the local recharge of fresh water with geologic influence (LL). The local recharge is easily identified by young and fresh Ca-HCO₃ water, with relatively low pH and with a composition controlled by carbonate dissolution (LL). But, according to the geochemical characteristics, the LL water group do not seem to be the fresh water source responsible for the water freshening mechanism. The fresh water origin will be discussed next.

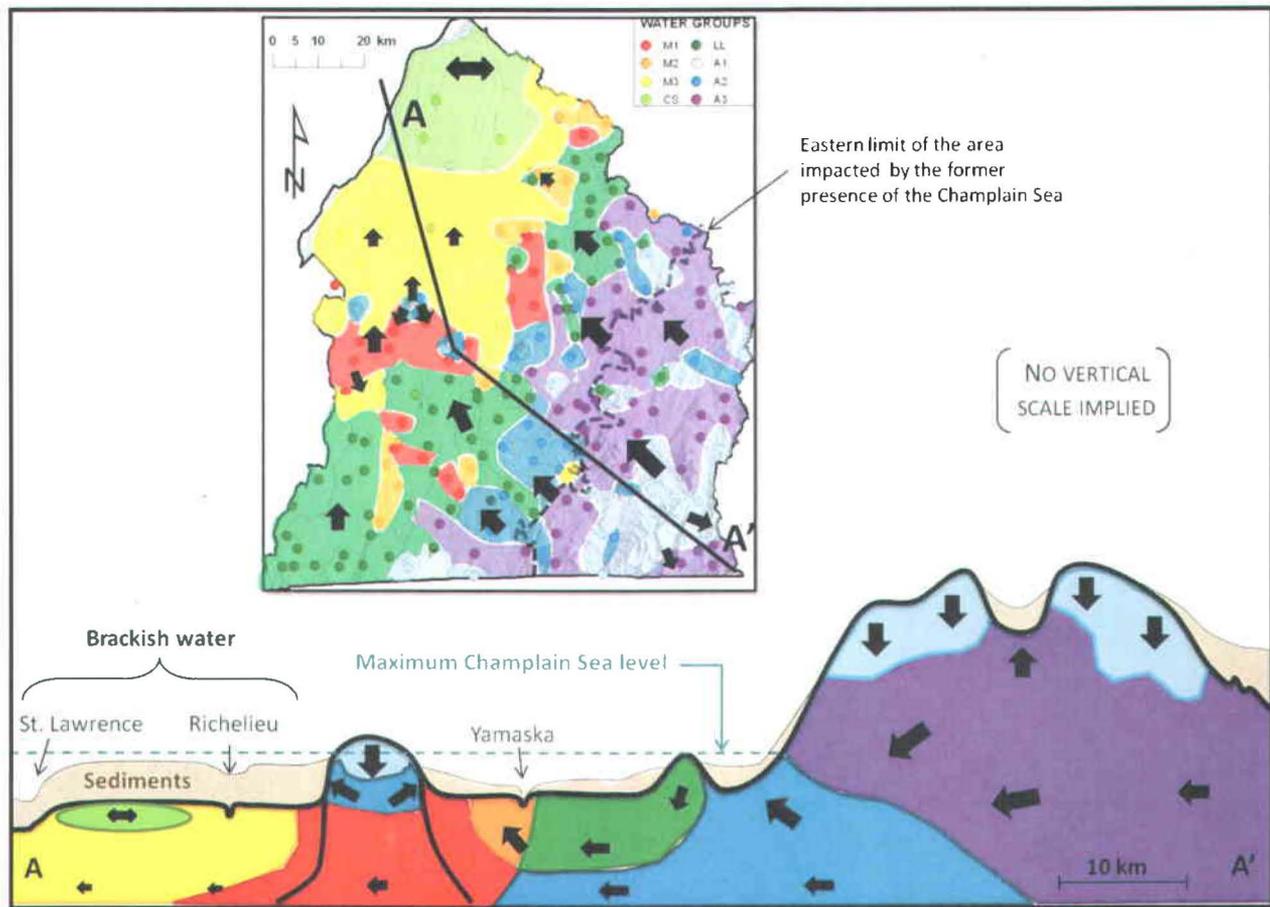


Figure 3.15: Geochemical conceptual model represented by a schematic cross-section from the Appalachian Uplands to the St. Lawrence River. Water group locations are illustrated with associated colors and flow directions are represented by arrows. The limit of the former Champlain Sea environment is indicated by dashed lines on the map and section.

High altitude areas (A1, A3)

High altitude recharge is affected by geologic influence, which is not overshadowed by the high TDS concentrations of sea water as in the low altitude recharge areas. The physiographic contexts associated with altitude recharge are the Appalachian Uplands (mainly south-east), the eastern and southern parts of the Piedmont and some of the Monteregian Hills. The recharge water is associated with the presence of tritium (typical of young water), a Ca-HCO₃ water-type with relatively low pH and with a composition controlled by carbonate dissolution (A1). For water group A1, it is presumed that total dissolved solids increase due to the relatively fast flow under unconfined to semi-confined conditions and the high topographic relief. On the other hand, A3 water group, which is more evolved, with higher TDS, is dominant in the Upland and the north-east of the Piedmont, in semi-confined conditions as well as under unconfined conditions.

As expected, the TDS increase is caused by the dissolution of common minerals, generating a moderate increase in the concentrations of major ion (Gibbs, 1970). The pH is also increasing along flow paths, accompanied by the decrease of dissolved oxygen and pe. But two assumptions remain to be verified relative to the origin of the A3 water group, considering the relatively long residence time of that group as indicated by radiocarbon data:

1. The presence of a long and deep flow path in the Appalachians, originating in part from the A1 water group, would lead to the evolution of the A3 water group and its long residence time, or either ;
2. The A3 water group represents the mixing between modern water with evolved groundwater from another source (eg.: continuous upward release of deep recharge of ice melting water from the last glaciation).

Hydraulic link between high altitude and Champlain Sea areas

The link between the high and low altitude systems, or the fresh water contribution, is presumed to be made by the A2 and the M1 water groups, which, as discussed previously, probably originate from high altitude zones (A3 water group) and emerge into the former Champlain Sea environment. The regional flow extends roughly from the east (A3) to the west (A2). A2 and M1 water groups are observed in the Piedmont, locally in the Southern Lowlands and around some Monteregian Hills. The confluence of fresh water (A3) into the former Champlain Sea environment involves ionic exchange mechanisms. The resulting water type is characterized by an alkaline Na-HCO₃ water-type, with high sodium concentrations and low calcium concentrations. The A2 water type is associated with a lower level of ionic exchange and the M1 water type represents the highest level of effects from ionic exchange which makes the M1 water type appear as an end-member among water groups (figure 3.11, A & B).

Overall, the groundwater composition in Montérégie Est is largely related to the flow conditions (confined, semi-confined or unconfined) and to the Champlain Sea influence (associated with topographic lows). This conceptual model of the groundwater flow system (Figure 3.15), necessitated a revision of the initial conceptual model that was based on hydrogeological data

alone. For instance, the Piedmont is not a preferential recharge area, as presumed initially at the onset of the project. Also, in the Appalachian Uplands, due to relatively low hydraulic conductivity and the limited depth of fracturing, it was initially presumed that groundwater flow was of a limited extent and therefore strictly associated to young recharge groundwater, whereas the geochemical data show that relatively evolved groundwater with long residence times are found in the uplands, even though the origin of this water is not yet well understood.

The residence time (evaluated with tritium and ^{14}C ages) increases from A1 to A3 and A2, which would lead to more evolved waters. The increase in residence time from LL to M2, to M3 and to CS is consistent with groundwater evolution and mixing with old Champlain Sea water. The M1 water group has relatively long residence times, despite the presence of tritium showing some mixing with young groundwater. As discussed in Section 3.6, an uncertainty still remains about the actual origin of the M1 water group and the reason for its long residence time despite its location near some preferential recharge areas of the Montereian Hills. One potential hypothesis is that deep waters upflowing along fractured Montereian dykes could impart the apparent long radiocarbon residence times to this water types, even though the presence of tritium also shows the contribution of recent recharge to this water type. Other geochemical data, such as dissolved gas, would be needed to further evaluate the origin of the water type.

3.7 Conclusions

The multivariate statistical analysis of geochemical parameters from groundwater samples in the study area helped to define water groups and to understand mechanisms controlling groundwater quality in Montérégie Est. The identification of three end members (two recharge waters and brackish water), the aquifer confinement levels and the limits of the Champlain Sea paleo-environment appear to be the main elements controlling groundwater geochemical evolution. Even if only a few mechanisms were identified and discussed, it was demonstrated that ionic exchange and mixing have a dominant influence on the overall groundwater composition. Isotopic data were useful to support hydrogeochemical hypothesis. Indications of residence times from radiocarbon and tritium also provided evidences of groundwater mixing.

Considering the previous discussion, the hydrogeochemical investigation in Montérégie Est also significantly contributes to the understanding of the regional flow system. The most important contributions that can be attributed to the interpretation of the geochemical results are:

- Identifying the areas of aquifer recharge, which are characterized by young and fresh Ca-HCO₃ water, with relatively low pH and with a composition controlled by carbonate dissolution;
- Delineation of brackish (non-potable) water found under fully confined conditions and without significant groundwater flow;
- Identification of a potentially regional freshwater flow path, originating from the Uplands and emerging into the Piedmont and locally in the Lowlands (around Monteregian Hills), which would be responsible for the freshening mechanism;
- Evidences that the Piedmont is not a preferential recharge area as presumed initially at the onset of the project;
- Definition of a conceptual model of the groundwater flow system, based on geochemical interpretation, which gives rise to a revision of the original model, solely based on hydrogeological data.

Overall, the data and understanding gained from the hydrogeochemical study significantly improved the general understanding of the dynamics of the regional aquifer system.

Due to the wide range of hydrogeological contexts found in the study area, it would be interesting to investigate further some of the mechanisms, especially those related to the Appalachian Uplands environment. Such an additional investigation is currently in progress, with the sampling and the analysis of more than 40 dissolved gas samples. Analyses of noble gases (He, Ne, Ar, Rn), CFC and SF₆, and few hydrocarbons (methane, ethane, propane) will probably contribute to a better understanding of the hydrogeological system of Montérégie Est.

CHAPITRE 4 : QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE

4.1 Introduction

4.1.1 Problématique

La qualité de l'eau souterraine est définie en fonction de sa composition chimique. Le projet PACES a été l'occasion de construire une base de données hydrogéochimique récente et détaillée comprenant des résultats analytiques pour plusieurs paramètres chimiques, principalement inorganiques, pour plus de 237 points d'échantillonnage répartis sur l'ensemble de la Montérégie Est. Ces échantillons sont représentatifs des aquifères rocheux et granulaires de la région, mais l'emphase a été mise sur les aquifères rocheux qui sont le plus exploités régionalement, tant par les puits municipaux que résidentiels.

La qualité des eaux souterraines peut être altérée par différentes causes ou processus, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Parmi les processus naturels, mentionnons le type d'environnement minéral, le temps de résidence des eaux, le niveau de confinement (échange avec l'atmosphère) ainsi que le mélange avec des eaux d'origines distinctes. Quant aux causes anthropiques, celles-ci peuvent être très variées, mais demeurent généralement à une échelle locale en ce qui concerne les sources dites « ponctuelles », tandis que les sources dites « diffuses » peuvent affecter de plus grandes étendues. Mentionnons notamment quelques causes potentielles de contamination dans une région contenant à la fois des zones rurales et urbaines : les activités agricoles, les fosses septiques, les contaminations industrielles, les sites d'enfouissements. À l'exception des nitrates, ce sont généralement les paramètres de la chimie organique et bactériologique qui permettent de décrire ces contaminations. Ceux-ci ne sont toutefois pas abordés dans le cadre de la présente étude, car ils nécessitent des analyses ciblées et coûteuses. Cependant, étant donné que l'agriculture constitue une activité économique majeure en Montérégie Est, l'impact de ces activités est tout de même abordé par le biais de l'étude des nitrates, dont l'apport résulte de la fertilisation des cultures.

4.1.2 Objectifs et méthodologie

La base de données hydrogéochimiques brute ne peut servir directement d'outil aux différents intervenants du milieu, soit les administrateurs et décideurs locaux et régionaux, sans qu'elle soit préalablement interprétée et mise en contexte. Ce chapitre présentera ainsi une synthèse de l'interprétation géochimique élaborée dans le chapitre précédent et établira les liens requis pour expliquer la qualité de ces eaux. Plus spécifiquement, les objectifs sont les suivants :

- Comparer les résultats analytiques obtenus pour chacun des puits aux critères de qualité applicables et identifier les valeurs qui ne respectent pas ces critères ;
- Décrire la qualité des eaux de chacun des huit groupes d'eau issus de l'étude hydrogéochimique régionale sur les aquifères rocheux (chapitre 3) ;
- Expliquer la qualité des eaux pour chacun des groupes, soit l'origine et la cause des caractéristiques spécifiques à ces groupes ;
- Délimiter des zones de qualité d'eau à l'aide de trois classes, afin d'identifier la qualité des eaux attendues pour un secteur donné.

La qualité de l'eau souterraine sera définie en fonction des concentrations maximales acceptables déterminées pour les différents paramètres selon les :

- *Règlement sur la qualité de l'eau potable* c. Q-2, r. 40 (Gouvernement du Québec, 2012)
- *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Tableau sommaire* (Santé Canada, 2012).

4.2 Qualité d'eau des puits

Le tableau 4.1 présente le détail des dépassements, soit pour les critères québécois et pour les recommandations canadiennes, en fonction du type d'aquifère qui alimente chacun des puits (rocheux ou granulaire). La répartition spatiale de l'ensemble des dépassements rencontrés est illustrée à la figure 4.1

La comparaison entre les résultats analytiques obtenus et les concentrations maximales acceptables définies par le *Règlement sur la qualité de l'eau potable* c. Q-2, r. 40 (Gouvernement du Québec, 2012) a permis d'identifier, pour l'ensemble de la région, des dépassements pour 5 composés inorganiques. Quatre (4) de ces composés ont des dépassements par rapport à des normes pour l'eau potable relatives à la santé : l'arsenic (As), le baryum (Ba), le fluor (F), les nitrites (N) et nitrates (N) (N-NO₂ et N-NO₃), ainsi que l'uranium (U). L'autre paramètre est le pH qui a des dépassements de normes esthétiques n'ayant pas d'incidence sur la santé. Soulignons que les propriétaires des puits privés échantillonnés pour lesquels la qualité de l'eau ne respectait pas les critères de qualité du gouvernement du Québec pour la santé (à l'exception des dépassements pour le pH) ont tous été contactés, et que le Bureau régional de la Santé publique du Québec a aussi été avisé.

La comparaison des résultats analytiques avec les objectifs d'ordre esthétiques définis dans les *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* (Santé Canada, 2012) implique des dépassements cette fois pour les 9 paramètres suivants : les chlorures (Cl), le sodium (Na), les sulfates (SO₄), la dureté, les sulfures, l'aluminium (Al), les matières dissoutes totales (MDT), le manganèse (Mn) et le fer (Fe).

Tableau 4.1: Nombre de puits dépassant les critères applicables, pour chacun des paramètres, en fonction du type d'aquifère.

Paramètres	Unités	CMA ¹	OE ²	Puits dans l'aquifère rocheux		Puits dans l'aquifère sédimentaire		Tous les puits	
				Nb dépassements	% dépassements	Nb dépassements	% dépassements	Nb dépassements	% dépassements
Règlement sur la qualité de l'eau potable c. Q-2, r. 40 (Gouvernement du Québec, 2012)									
Antimoine (Sb)	mg/L	0.006	--	-	0%	-	0%	-	0%
Arsenic (As)	mg/L	0.025	--	1	0%	1	3%	2	1%
Baryum (Ba)	mg/L	1	--	17	8%	-	0%	17	7%
Bore (B)	mg/L	5	--	-	0%	-	0%	-	0%
Cadmium (Cd)	mg/L	0.005	--	-	0%	-	0%	-	0%
Chrome total (Cr)	mg/L	0.05	--	-	0%	-	0%	-	0%
Cuivre (Cu)	mg/L	--	≤ 1	-	0%	-	0%	-	0%
Fluorures (F)	mg/L	1.5	--	19	9%	-	0%	19	8%
Nitrites - nitrates (NO ₂ -NO ₃)	mg N/L	10	--	-	0%	1	3%	1	0%
pH	--	--	6.5-8.5	42	21%	6	20%	48	21%
Plomb (Pb)	mg/L	0.01	--	-	0%	-	0%	-	0%
Selenium (Se)	mg/L	0.01	--	-	0%	-	0%	-	0%
Uranium (U)	mg/L	0.02	--	1	0%	1	3%	2	1%
Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2012)									
Aluminium (Al)	mg/L	--	≤ 0.1	1	0%	1	3%	2	1%
Chlorures (Cl)	mg/L	--	≤ 250	16	8%	3	10%	19	8%
Dureté totale	mg CaCO ₃ /L	--	médiocre < 200	14	7%	2	7%	16	7%
			intolérable > 500	41	22%	12	40%	53	24%
Fer (Fe)	mg/L	--	≤ 0.3	47	23%	8	26%	55	23%
Manganèse (Mn)	mg/L	--	≤ 0.05	4	2%	3	10%	7	3%
Matière dissoute totale (MDT)	mg/L	--	≤ 500	80	42%	14	47%	94	43%
Sodium (Na)	mg/L	--	≤ 200	28	14%	3	10%	31	13%
Sulfures comme H ₂ S	mg/L	--	≤ 0.05	23	11%	-	0%	23	10%
Sulfates (SO ₄)	mg/L	--	≤ 500	4	2%	1	3%	5	2%
Zinc (Zn)	mg/L	--	≤ 5	-	0%	-	0%	-	0%

¹CMA: Concentrations maximales acceptables (CMA) établies en fonction de critères de santé.

²OE: Objectifs d'ordre esthétique (OE) établies en fonction de considérations esthétiques.

Règlement sur la qualité de l'eau potable
c. Q-2, r. 40 (Gouvernement du Québec, 2012)

Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada
(Santé Canada, 2012)

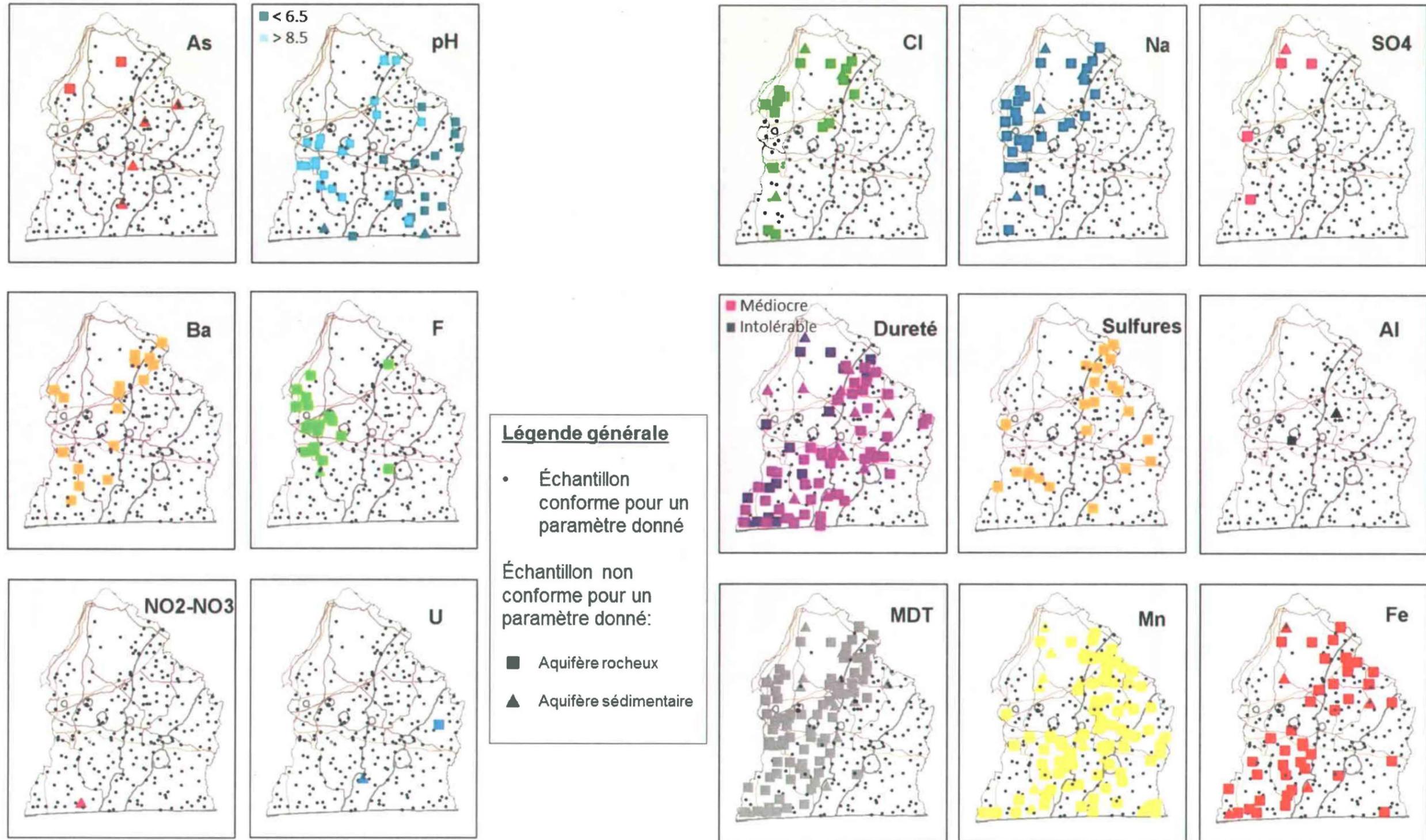


Figure 4.1: Localisation des dépassements des critères de qualité d'eau pour chacun des 237 puits étudiés. Tous les échantillons prélevés y sont représentés, mais seuls les dépassements analytiques y sont représentés par de plus larges marqueurs colorés.



4.3 Qualité d'eau des groupes

4.3.1 Définition des huit groupes d'eau régionaux

Dans le but de mieux définir spatialement et chimiquement la qualité des eaux souterraines à l'échelle régionale, les huit groupes d'eau identifiés au chapitre précédent seront exploités. En effet, l'étude hydrogéochimique réalisée à l'aide d'analyses statistiques et graphiques a permis de définir huit groupes d'eau dans les aquifères rocheux, regroupant ainsi les puits étudiés selon les caractéristiques physiques et chimiques de leur eau. Ces groupes d'eau sont répartis spatialement selon la carte de la figure 4.2. Les groupes dont le nom commence par M sont associés à des eaux de mélange ou dites typiquement « Montérégiennes ». Les groupes dont le nom commence par « A » sont associées principalement aux Hautes-terres des Appalaches, tandis que les eaux « MC » sont associées aux vestiges de la Mer de Champlain et les eaux « BT » aux Basses-terres.

La définition des groupes a été réalisée par analyse hiérarchique regroupée (*clustering*), permettant de déterminer le niveau de ressemblance entre l'eau des différents puits, sur un dendrogramme, en fonction de 16 paramètres géochimiques choisis : *pH*, *TDS*, *pe*, *HCO₃*, *NH₄*, *Ba*, *B*, *Ca*, *Cl*, *Mg*, *Mn*, *K*, *Si*, *Na*, *Sr*, *SO₄*. Seuls les puits au roc ont été utilisés pour cette analyse, étant donné qu'ils exploitent l'aquifère régional. Un total de 190 puits a été utilisé pour l'analyse, soit les puits au roc dont la validité des résultats analytiques a été jugée acceptable (bilan ionique de $\pm 15\%$). Par la suite, les puits de l'aquifère granulaire ainsi que les puits au roc, rejetés à la première étape, ont été associés à un des huit groupes, en examinant une à une leurs caractéristiques chimiques et physiques. Le tableau 4.2 résume la répartition spatiale, le niveau de confinement ainsi que les caractéristiques chimiques (dont les éléments traces) et physiques qui distinguent chacun des huit groupes d'eau.

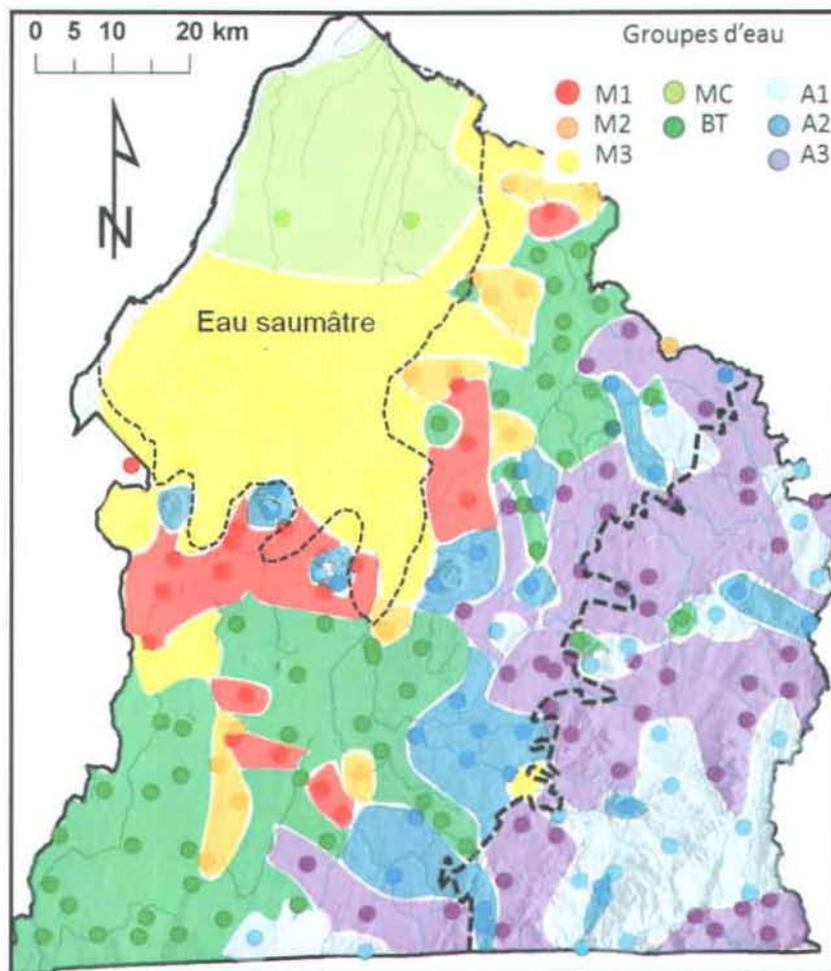


Figure 4.2 : Localisation spatiale des huit groupes d'eau définis avec, en arrière-plan, les 237 puits échantillonnés.

Tableau 4.2: Description sommaire des huit groupes d'eau identifiés en Montérégie Est.

Groupe	Distribution spatiale	Confinement ¹	Caractéristiques chimiques et physiques distinctives	Éléments traces ²	Qualité relative
M1 rouge	Principalement au pourtour de la zone saumâtre (au sud des Montérégiennes et à l'ouest du Piémont) et dans le sud des Basses-terres à l'est de la vallée du Richelieu.	C - SC ³	Eau évoluée et ancienne de type Na-HCO ₃ résultant du contact d'eau douce avec de l'eau marine. Très riche en sodium dû à l'échange ionique Ca-Na. Eaux les plus alcalines de la région (pH médian de 8.6).	F S	Passable
M2 orange	Distribution spatiale discontinue, surtout au pourtour, à l'est, de la zone saumâtre. Aussi dans une zone limitée du sud des Basses-terres dans la vallée du Richelieu.	C - SC	Eau évoluée de type Na-HCO ₃ représentant un mélange entre les eaux des groupes M1 et BT.	Ba, F S Sr	Passable
M3 jeune	Dans le nord des Basses-terres : soit dans le sud et l'est de la zone saumâtre. Au sud des Basses-terres : zone limitée à l'ouest de la vallée du Richelieu.	C	Eau évoluée de type Na-HCO ₃ -Cl représentant un mélange entre les eaux des groupes M1 et MC. Eau alcaline (pH médian de 8.2).	F, Ba B As	Non potable
MC vert pâle	Extrémité nord des Basses-terres, dans la zone saumâtre.	C	Eau saumâtre de type Na-SO ₄ et Na-Cl. Vestige de la Mer de Champlain. Conditions réductrices (pe médian de 0.0).	Sr, Fe As, S B, Mn	Non potable
BT vert	Sud des Basses-terres et nord-ouest du Piémont. Présent autant dans des zones de recharge que d'émergences.	SC - L	Eau de recharge de type Ca-HCO ₃ relativement jeune. Infiltration présumée lente. Riche en MDT dû à un mélange avec des eaux marines résiduelles.	SO ₄ Fe, Mn Si, Ba	Passable
A1 bleu pâle	En altitude et dans les vallées, surtout dans la partie sud-est des Hautes-terres appalachiennes et sur les Collines montérégiennes.	L - (SC)	Eau jeune de recharge en altitude de type Ca-HCO ₃ . Eau acide et oxydante (valeurs médianes de pH de 6.3 et de 6.9).	Mn	Acceptable
A2 bleu	Surtout à l'ouest des parties centrales et sud du Piémont et dans quelques vallées des Hautes-terres appalachiennes. Présent également sur les Collines montérégiennes.	SC - (L)	Eau évoluée, ancienne et de type Na-HCO ₃ . Présumée riche en sodium dû à l'échange ionique Ca-Na en milieu anciennement marin (Piémont).	F, S Mn U	Acceptable
A3 mauve	Type d'eau dominant dans les Hautes-terres appalachiennes et au nord-est du Piémont. Se trouve en élévation et dans les vallées.	SC - L	Eau un peu plus évoluée et plus ancienne que A1, de type Ca-HCO ₃ ou Mg-HCO ₃ . Peu de MDT et de Cl. Apport potentiel d'eau ancienne d'origine indéterminée.	Mn Fe S, As	Acceptable

¹ Niveau de confinement des aquifères : Libre (L), semi captif (SC), captif (C).

² Éléments traces indiqués dans l'ordre du plus au moins commun.

³ Aussi retrouvé près de zones libres dans la partie ouest du Piémont et le sud des Basses-terres.

4.3.2 Description de la qualité de l'eau par groupe

Le tableau 4.3 présente le détail du nombre de puits dépassant les critères applicables, pour chacun des paramètres, en fonction des huit groupes d'eau. Les valeurs moyennes y ont été calculées pour chaque groupe. Soulignons que, dans certains cas, la valeur moyenne pour un groupe et un paramètre donné excède le critère applicable : ces dépassements apparaissent alors en caractère gras.

Groupe M1 (22 puits)

Critères pour la santé : Le groupe M1, en matière d'eau de consommation, présente d'importants problèmes pour la santé humaine. En effet, près du tiers des puits analysés, soit 7 puits sur 22, dépassent la concentration maximale acceptable en fluorures (F).

Critères de considérations esthétiques : Pour les paramètres esthétiques, notons le pH élevé de ces eaux, avec une moyenne de 8.7, ce qui dépasse légèrement le critère fixé à 8.5. Plus de la moitié des puits de ce groupe dépasse l'objectif esthétique en matières dissoutes totales (MDT). On y retrouve également des concentrations importantes en sulfures (S) et en sodium (Na). Finalement, des dépassements ponctuels en aluminium, fer et manganèse ont également été relevés.

Considérant la fréquence des dépassements de critères pour la santé et esthétiques du groupe M1, sa qualité a été qualifiée de « passable ».

Tableau 4.3: Proportion de puits (en pourcentage) dont l'eau dépasse les critères applicables, pour chacun des paramètres, en fonction des groupes d'eau.

QUALITÉ RELATIVE:				NON-POTABLE				PASSABLE						ACCEPTABLE					
Paramètres	Unités	CMA ¹	OE ²	MC / CS		M3		M1		M2		BT / LL		A2		A3		A1	
				N=4		N=24		N=22		N=19		N=62		N=27		N=45		N=33	
				Valeur moy.	% dépass.														
Règlement sur la qualité de l'eau potable c. Q-2, r. 40 (Gouvernement du Québec, 2012)																			
Atimoine (Sb)	mg/L	0.006	--	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%
Arsenic (As)	mg/L	0.025	--	0.008	25%	0.002	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.002	2%	0.002	0%	0.002	0%	0.001	0%
Baryum (Ba)	mg/L	1	--	0.020	0%	1.384	29%	0.150	1%	0.871	42%	0.249	3%	0.051	0%	0.106	0%	0.027	0%
Bore (B)	mg/L	5	--	1.368	0%	0.642	0%	0.383	2%	0.253	0%	0.058	0%	0.051	0%	0.014	0%	0.008	0%
Cadmium (Cd)	mg/L	0.005	--	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%
Chrome total (Cr)	mg/L	0.05	--	0.000	0%	0.000	0%	0.001	0%	0.000	0%	0.000	0%	0.000	0%	0.000	0%	0.000	0%
Cuivre (Cu)	mg/L	--	≤ 1	0.000	0%	0.001	0%	0.003	0%	0.011	0%	0.001	0%	0.037	0%	0.003	0%	0.021	0%
Fluorures (F)	mg/L	1.5	--	0.53	0%	1.34	33%	1.48	7%	0.61	5%	0.18	0%	0.65	11%	0.20	0%	0.08	0%
Nitrites - nitrates (NO ₂ -NO ₃)	mg N/L	10	--	0.13	0%	0.11	0%	0.05	0%	0.08	0%	0.18	0%	0.08	0%	0.12	0%	1.33	3%
pH	--	--	6.5-8.5	7.5	0%	8.2	25%	8.7	39%	7.9	0%	7.3	0%	8.0	33%	7.7	2%	6.6	55%
Plomb (Pb)	mg/L	0.01	--	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0001	0%	0.0003	0%
Sélénium (Se)	mg/L	0.01	--	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%
Uranium (U)	mg/L	0.02	--	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.001	0%	0.002	2%	0.003	4%	0.002	0%	0.001	0%
Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2012)																			
Aluminium (Al)	mg/L	--	≤ 0.1	0.003	0%	0.009	0%	0.049	0%	0.005	0%	0.004	0%	0.010	0%	0.005	0%	0.005	0%
Chlorures (Cl)	mg/L	--	≤ 250	2431.8	75%	538.7	54%	45.6	207%	28.1	0%	82.9	5%	30.5	0%	14.4	0%	17.8	0%
Dureté totale	mg CaCO ₃ /L	--	> 200	2032	100%	97	8%	22	98%	170	16%	357	76%	55	0%	147	13%	126	21%
Fer (Fe)	mg/L	--	≤ 0.3	4.515	100%	0.276	17%	0.068	0%	0.157	16%	1.392	53%	0.059	0%	0.223	18%	0.122	3%
Manganèse (Mn)	mg/L	--	≤ 0.05	0.738	100%	0.032	17%	0.012	0%	0.044	32%	0.359	19%	0.041	22%	0.754	60%	0.093	21%
Matière dissoute totale (MDT)	mg/L	--	≤ 500	7280	100%	1956	88%	685	3112%	570	63%	734	56%	363	19%	301	4%	227	0%
Sodium (Na)	mg/L	--	≤ 200	1778	100%	556	75%	173	786%	74	0%	52	3%	77	0%	15	0%	8	0%
Sulfures comme H ₂ S	mg/L	--	≤ 0.05	2.18	25%	0.02	4%	0.38	2%	0.65	26%	0.03	5%	0.03	15%	0.02	9%	0.01	0%
Sulfates (SO ₄)	mg/L	--	≤ 500	1890	100%	18	0%	34	156%	13	0%	79	2%	43	0%	24	0%	17	0%
Zinc (Zn)	mg/L	--	≤ 5	0.012	0%	0.010	0%	0.011	0%	0.010	0%	0.011	0%	0.008	0%	0.010	0%	0.037	0%

¹CMA: Concentrations maximales acceptables (CMA) établies en fonction de critères de santé.

²OE: Objectifs d'ordre esthétique (OE) établies en fonction de considérations esthétiques.

Groupe M2 (19 puits)

Critères pour la santé : C'est dans le groupe M2 que l'on retrouve le plus grand nombre de dépassements pour baryum (Ba). Environ 42% des puits de ce groupe dépasse le critère pour ce paramètre. Un dépassement en fluorure (F) a également été noté pour l'un des puits.

Critères de considérations esthétiques : Une quantité excessive de MDT par rapport à l'objectif esthétique affecte plus de 60 % des puits de ce groupe. Notons également quelques dépassements ponctuels pour la dureté et le fer (Fe) (16 % des puits), le manganèse (Mn) (32 %), et les sulfures (S) (26 %).

Considérant la fréquence des dépassements de critères pour la santé et esthétiques du groupe M2, sa qualité a été qualifiée de « passable ».

Groupe M3 (24 puits)

Critères pour la santé : Tout comme les groupes M1 et M2, ce groupe présente des dépassements au niveau du baryum (Ba) (7 puits sur 24) et des fluorures (F) (8 puits sur 24).

Critères de considérations esthétiques : Les concentrations élevées en chlorures (Cl), en sodium (Na) et en MDT affectent la majorité des puits étudiés. Notons également des problèmes ponctuels reliés au pH élevé, à la dureté, au fer (Fe), au manganèse (Mn) et aux sulfures (S).

Considérant que la majorité des puits du groupe M3 ont des dépassements de critères pour la santé ou esthétiques, sa qualité a été qualifiée de « non potable ».

Groupe MC (4 puits)

Critères pour la santé : Un dépassement a été noté pour l'arsenic (As) parmi les 4 puits analysés.

Critères de considérations esthétiques : Le groupe MC, dont l'eau est saumâtre, se démarque par la piètre qualité de ses eaux au niveau esthétique. Des dépassements notables et généralisés pour tous les puits ont été observés pour les chlorures (Cl), la dureté (classifiée comme intolérable), le fer (Fe), le manganèse (Mn), les MDT, le sodium (Na), les sulfures (S) et les sulfates (SO₄).

Considérant que tous les puits du groupe MC ont des dépassements de critères esthétiques, sa qualité a été qualifiée de « non potable », bien qu'un seul des 4 puits de ce groupe ait un dépassement de critère pour la santé.

Groupe BT (62 puits)

Critères pour la santé : Des dépassements ponctuels ont été observés pour l'arsenic (As) (1.6 % des puits), le baryum (Ba) (3 %) et l'uranium (U) (1.6 %). Le dépassement en uranium correspond à un puits d'observation aménagé dans l'aquifère granulaire, pour le projet du PACES.

Critères de considérations esthétiques : De nombreux dépassements d'ordre esthétiques ont été rencontrés pour la dureté (76 %), le fer (Fe) (53 %), le manganèse (Mn) (19 %) et les MDT (57 %). Quelques dépassements ponctuels en chlorures (Cl) et sulfures (S) (5 %), sodium (Na) (3 %) et sulfates (SO₄) (1.6 %) ont également été observés.

Considérant la fréquence des dépassements de critères, surtout au niveau esthétique, pour la majorité des puits du groupe M2, sa qualité a été qualifiée de « passable ».

Groupe A1 (33 puits)

Critères pour la santé : Un seul dépassement a été observé pour ce groupe. Il s'agit d'un dépassement pour les nitrites (N) et nitrates (N) (N-NO₂ et N-NO₃) dans un puits d'observation aménagé dans l'aquifère granulaire, pour le projet du PACES.

Critères de considérations esthétiques : Plus de 50 % des puits de ce groupe présentent un pH relativement acide, sous l'objectif fixé à un pH de 6.5. La dureté et le manganèse (Mn) (21 %) ainsi que le fer (Fe) (3 %) comptent parmi les caractéristiques indésirables de ce groupe.

Considérant l'absence de dépassements de critères pour la santé pour les composés naturels, le nitrate étant présumé d'origine anthropique, la qualité de l'eau du groupe A1 a été qualifiée « acceptable », même si l'eau est généralement acide et a des dépassements esthétiques.

Groupe A2 (27 puits)

Critères pour la santé : Tout comme les groupes montérégiens « M », le groupe A2 est associé à des dépassements en fluorures (F) (11 % des puits). Un dépassement ponctuel est à noter en uranium (U), pour un puits aménagé dans l'aquifère rocheux.

Critères de considérations esthétiques : Les sulfures (S), les MDT et le manganèse (Mn) présentent des dépassements d'ordre esthétique dans respectivement 4, 5 et 6 des 27 puits étudiés, soit 15 à 22% des puits.

Considérant la proportion modérée de dépassements de critères pour la santé ou esthétiques, la qualité de l'eau du groupe A3 a été qualifiée « acceptable ».

Groupe A3 (45 puits)

Critères pour la santé : Le groupe A3 est le seul à ne présenter aucun dépassement des critères pour la santé humaine.

Critères de considérations esthétiques : Au niveau des paramètres affectant la qualité esthétique de l'eau, de nombreux dépassements ont été notés pour le manganèse (Mn) (60 %), quelques-uns pour la dureté totale (13 %), le fer (Fe) (18 %), les MDT (4 %) et les sulfures (S) (9 %).

Considérant l'absence de dépassements de critères pour la santé, la qualité de l'eau du groupe A2 a été qualifiée « acceptable », malgré la proportion assez élevée de dépassements esthétiques.

4.3.3 Provenance des composés affectant la qualité

Composés d'origine marine

L'épisode postglaciaire qu'a connu la région il y a près de 11 000 ans a été déterminant pour la qualité des eaux de plusieurs des groupes identifiés. L'invasion du territoire par la Mer de Champlain, à la suite du retrait des glaciers, a affecté les aquifères jusqu'au pied des Hautes-terres appalachiennes (figure 4.2), épargnant le sommet de quelques collines montérégiennes.

Les aquifères du Piémont et des Basses-terres sont donc affectés par :

- des eaux marines résiduelles en concentrations variables selon l'endroit ;
- des composés chimiques d'origine marine encore présents, adsorbés dans les aquifères, principalement sur les minéraux argileux des shales et certains sédiments de surface ;
- des dépôts d'argile marine d'épaisseurs variables, venant confiner les aquifères et ainsi limiter leur recharge et le mélange de l'eau marine avec l'eau douce des précipitations (lessivage), principalement dans le nord des Basses-terres.

Selon notre interprétation, cet événement marin explique à lui seul la plupart des dépassements observés pour les critères d'ordre esthétique en chlorures, sodium et MDT. Les eaux des groupes M3 et MC sont situées à l'intérieur de la zone dite saumâtre, présentent des concentrations en MDT qui sont, en moyenne, supérieures à 1000 mg/L. Selon la définition proposée par Freeze et Cherry (1979), une eau dont les MDT se situent entre 1000 et 10 000 mg/L est dite saumâtre. Selon l'étude de Cloutier et al. (2010) réalisée sur le territoire des Basses-Laurentides, au nord-ouest de Montréal, la Mer de Champlain n'avait pas la composition normale d'une eau de mer telle que définie par Hem (1985), mais plutôt d'une eau de mer diluée par 66% d'eau douce provenant de la fonte des glaciers et des précipitations.

Quant aux chlorures (Cl) et au sodium (Na), ils se retrouvent en grandes concentrations dans l'eau de mer. Étant peu réactifs, les chlorures demeurent présents en solution et seule leur dilution par de l'eau douce permet de diminuer leur concentration. Le sodium réagit cependant différemment. Contrairement aux chlorures, sa concentration varie non seulement par dilution, mais est également influencée par les phénomènes d'échanges ioniques avec les minéraux argileux des aquifères.

Ainsi, selon notre interprétation, les dépassements en sodium (Na), tout comme les dépassements en baryum (Ba) et fluorures (F) s'expliquent principalement par les propriétés du milieu, liées à la présence de minéraux argileux dans le roc. En effet, la présence des argiles favorise le phénomène d'adsorption selon lequel certains ions se fixent à une paroi solide (particules argileuses, présentes dans les shales). Les ions Na^+ , F^- et Ba^{2+} , qui sont des ions présents dans l'eau de mer en différentes proportions, possèdent tous des affinités avec les argiles (Hounslow, 1995). Ils se retrouvent donc adsorbés, stockés dans l'aquifère, et peuvent y demeurer malgré la dilution d'autres composés marins en solution par de l'eau douce. Cependant, lorsque survient un changement de pH ou une variation importante dans la composition de l'eau, ceux-ci peuvent être libérés (désorption) et se retrouver en solution, pouvant ainsi modifier la qualité de l'eau. C'est le cas pour les eaux de type M1 et M2 notamment (voir chapitre 3).

Composés d'origine minérale

Quant aux dépassements en arsenic (As), uranium (U), sulfures (H_2S), sulfates (SO_4), fer (Fe) et manganèse (Mn), ils semblent davantage être reliés à la nature du socle rocheux. Mentionnons comme exemple la pyrolusite (MnO_2), un minéral qui, dès qu'il se retrouve en conditions légèrement réductrices, se dissout (Hounslow, 1995). Lorsque présent en trop grande quantité, il vient altérer la qualité de l'eau en augmentant la quantité de manganèse (Mn) en solution. Les sulfates en solution (SO_4) sont, quant à eux, couramment associés aux aquifères rocheux constitués de shales. En effet, les shales peuvent notamment contenir des minéraux tels la pyrite (FeS_2) qui, lorsqu'ils sont oxydés, contribuent à l'augmentation des sulfates, mais également du fer, en solution (Hem, 1985).

4.4 Zones de qualité d'eau

Afin de simplifier l'interprétation spatiale de la qualité des eaux, les huit groupes ont été classifiés en trois catégories afin d'illustrer des secteurs de caractéristiques similaires au niveau des critères qualitatifs. Les trois catégories identifiées sont : non potable, passable et acceptable (tableau 4.2 et section 4.3.2). Les zones de qualité d'eau ainsi obtenues sont présentées à la figure 4.3.

4.4.1 Zone d'eau « non potable »

La zone d'eau « non potable » identifiée sur la figure 4.3 s'avère être presque identique à la zone d'eau saumâtre ayant été documentée antérieurement (Beaudry et al., 2011; McCormack, 1980). Elle comprend les groupes M3 et MC et occupe tout le nord des Basses-terres ainsi qu'un petit territoire situé au nord de la municipalité de Saint-Jean-sur-Richelieu, dans le sud des Basses-terres. Les principales caractéristiques des eaux de cette zone sont les concentrations très élevées en chlorures, en sodium et en MDT, dépassant de plusieurs fois les concentrations recommandées. Les aquifères y sont complètement captifs, donc peu vulnérables.

4.4.2 Zone de qualité « passable »

Cette zone est composée de 3 groupes d'eau (M1, M2, BT), tous situés en milieu anciennement marin. Ils sont le résultat de divers mécanismes de lessivage des eaux marines par les eaux douces, contrairement à la zone non potable (qui est peu ou pas lessivée). Seul le groupe A2, également en milieu anciennement marin, a été exclu de cette zone compte tenu de son niveau de lessivage plus avancé et de sa meilleure qualité d'eau. Ainsi, la zone de qualité passable présente ponctuellement des concentrations en baryum et fluorures pouvant être nocives pour la santé. Au point de vue esthétique, les MDT sont en concentrations dépassant les recommandations un peu partout. Le pH est particulièrement élevé, sauf dans les secteurs à nappe libre. Il est également fréquent d'y retrouver des concentrations dépassant les recommandations d'ordre esthétiques pour plusieurs autres paramètres, de façon dispersée. En somme, il est possible de rencontrer des secteurs où la qualité de l'eau est acceptable à bonne, mais en règle générale, l'eau y est de qualité passable. Les aquifères associés aux groupes M1 et M2 sont peu vulnérables compte tenu de leur contexte captif à semi-captif. Toutefois, les aquifères associés au groupe LL, libres à semi-captifs, sont plus vulnérables aux contaminations.

4.4.3 Zone de qualité « acceptable »

Les eaux des groupes A1, A2 et A3, ont été regroupées sous la catégorie « acceptable ». À l'exception d'un dépassement isolé en nitrites et nitrates, tous les résultats obtenus respectent les concentrations maximales acceptables pour la santé. Cependant, la qualité esthétique de l'eau est souvent altérée par des concentrations élevées en manganèse. Le fer, la dureté et les sulfures sont également problématiques par endroit. Le pH est également acide dans les aquifères libres. C'est dans cette zone que l'on retrouve la meilleure qualité d'eau en Montérégie Est, mais aussi c'est dans cette zone que les aquifères sont les plus vulnérables aux contaminations. En effet, le niveau de confinement varie de captif à semi-captif selon l'endroit.

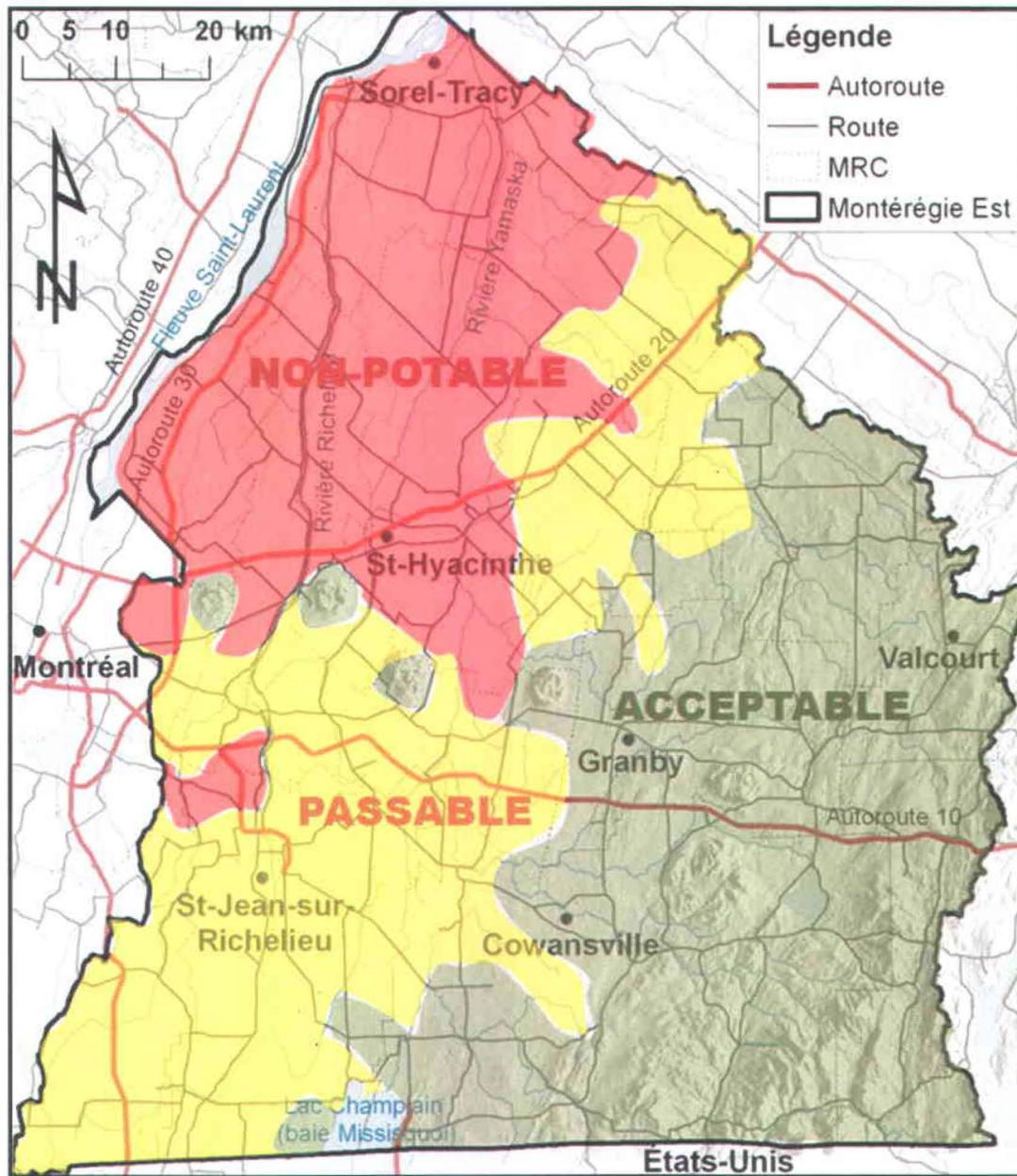


Figure 4.3: Délimitation des zones de qualité de l'eau souterraine à l'échelle régionale à l'aide de trois classes de qualité relative : « non potable », « passable » et « acceptable ».

4.5 Bilan régional

En considérant l'ensemble des normes de potabilité (MDDEFP, 2012) et des recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2012), sans égard aux propriétés hydrauliques des aquifères, la qualité des eaux souterraines en Montérégie Est présente généralement des problèmes. Les eaux souterraines y sont classifiées de « non potables » sur environ 2 200 km² et de « passables » sur environ 2 200 km², soit plus de la moitié des 9 000 km² composant le territoire. La qualité d'eau n'est qualifiée comme étant « acceptable » que dans les Hautes-terres et le Piémont appalachiens. Soulignons que ce bilan a été réalisé à l'échelle régionale et qu'il ne tient pas compte des particularités locales. La plupart des puits étudiés puisent leur eau dans le socle rocheux.

L'ensemble des Basses-terres et du Piémont appalachien, ayant été affecté par l'invasion de la Mer de Champlain, est caractérisé par des eaux riches en matières dissoutes totales (MDT). Plus spécifiquement, dans la partie nord des Basses-terres, l'eau est saumâtre et impropre à la consommation sur une superficie d'environ 2 200 km². Le pourtour de la zone saumâtre est affecté par des dépassements typiques en fluorures et baryum. Bien que la qualité des eaux souterraines s'améliore dans les Hautes-terres appalachiennes, la présence de manganèse y est significative. La présence de fer, de sulfures ainsi que l'acidité de l'eau peuvent également être problématiques, mais par endroits seulement.

Néanmoins, aucun dépassement des normes pour l'eau potable n'a été identifié quant aux concentrations en azote sous forme de nitrites et nitrates (N-NO₂ et N-NO₃) dans l'eau souterraine des puits aménagés dans l'aquifère rocheux régional, malgré le caractère agricole de la région. Cette problématique a été abordée spécifiquement par les travaux de Thériault (2013) portant sur de petits sous-bassins agricoles situés dans le centre-sud de la région (ruisseaux Ewing et Walbridge). Cette étude démontre que les nitrates provenant de la fertilisation des champs agricoles de ce territoire étaient davantage transférés aux eaux de surface, via les drains agricoles, préservant ainsi la qualité des eaux souterraines de l'aquifère rocheux. La figure 4.4 démontre également que les concentrations en N-NO₂ et N-NO₃ retrouvées dans l'aquifère

rocheux sont nettement inférieures aux concentrations retrouvées dans les aquifères granulaires et que la qualité de l'eau de l'aquifère rocheux régional n'est pas significativement dégradée par la présence de nitrates. Dans les Basses-terres du Saint-Laurent (nord et sud) les concentrations en nitrates sont absentes ou non significatives, ce qui reflète la plus faible vulnérabilité de ces contextes hydrogéologiques. Les concentrations retrouvées dans le Piémont et dans les Appalaches sont plus souvent significatives, reflétant la plus grande vulnérabilité de ces contextes hydrogéologiques. Certains endroits présentent des concentrations excédant 3 mg N/L qui exigeraient une évaluation plus détaillée de la situation. Au contraire de la situation observée pour l'aquifère régional au roc, les puits installés dans les dépôts meubles sont à risque d'avoir des concentrations en nitrites (N) et nitrates (N) excédant les normes de potabilité (10 mg N/L) ou exigeant des actions correctrices (3 mg N/L). Les puits approvisionnés par les dépôts meubles devraient donc être vérifiés systématiquement pour les concentrations en azote (nitrite et nitrate), même si on observe que dans plusieurs cas ces puits ne sont pas affectés par des concentrations significatives.

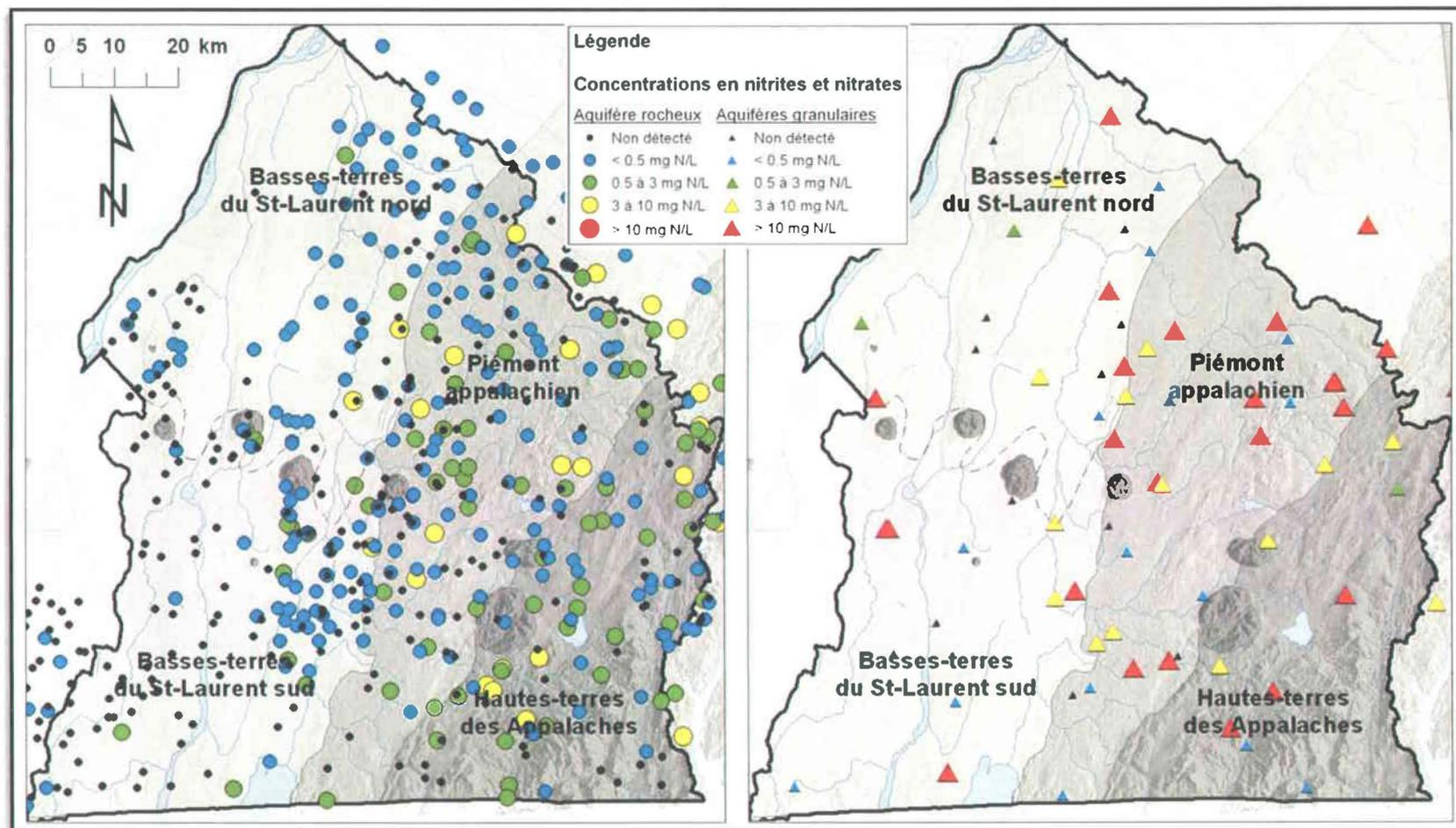


Figure 4.4 : Concentrations en azote (N) associées aux nitrites (NO_2) et nitrates (NO_3) pour les eaux souterraines de la Montérégie Est. La carte de gauche présente les résultats pour les puits installés dans l'aquifère rocheux tandis que la carte de droite présente les résultats pour les puits puisant à partir d'un aquifère granulaire. Les données utilisées proviennent d'une compilation réalisée dans le cadre du projet PACES. Elles regroupent les résultats de la présente étude, ceux du Système d'information hydrogéologique du MDDEFP (SIH) ainsi que des résultats issus de plusieurs rapports d'expertises (datant des années 1960 à aujourd'hui) recueillis après de municipalités, de MRC et du gouvernement du Québec. Les échantillons présentant une concentration supérieure à 10 mg N/L sont identifiés en rouge compte tenu qu'ils dépassent la concentration maximale acceptable définie par le Règlement sur la qualité de l'eau potable (Gouvernement du Québec, 2012). Quant aux échantillons en jaune (3 à 10 mg N/L), ils respectent le règlement, mais sont à un niveau exigeant la prise d'actions pour éviter l'augmentation de la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Les résultats en vert (0.5 à 3 mg N/L) représentent des concentrations significatives qui dépassent les valeurs naturelles et impliquent probablement des apports anthropiques d'azote. Les résultats en bleu (« non détecté » à 0.5 mg/L) et en noir (non détecté) représentent des concentrations faibles ou nulles qui sont non significatives.

CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS

Une caractérisation hydrogéochemique a été réalisée sur l'ensemble du territoire de la Montérégie Est (~9000 km²), situé dans le sud du Québec. Cette zone d'étude comprend cinq contextes hydrogéologiques distincts, dont la définition est principalement basée sur la géologie du socle rocheux : les Basses-terres du Saint-Laurent, divisées en parties nord et sud, qui ont été différenciés à cause de l'épaisse couche d'argile et silt de la Mer de Champlain retrouvée au nord des Collines montérégiennes, le piémont appalachien, les Hautes-Terres appalachiennes et les Collines montérégiennes. Au total, 243 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés et analysés, dont 86% de ces échantillons provient de puits au roc. Les analyses incluaient les ions majeurs et mineurs, les métaux, les paramètres physico-chimiques, les nitrates, les sulfates, ainsi que des isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et radioactifs (^3H et ^{14}C).

Les résultats de cette étude ont permis d'atteindre les objectifs initiaux qui étaient de construire une base de données hydrogéochemique représentative de la région (sections 2.2 et 2.3) et de dresser un portrait global de la qualité des eaux souterraines (chapitre 4). Ce portrait pourra servir de guide aux gestionnaires régionaux de la ressource en eau souterraine. Bien que cette étude ne permette pas une interprétation à l'échelle locale, elle permet d'avoir une idée de la qualité de l'eau souterraine circulant dans l'aquifère rocheux pour un contexte hydrogéologique ou une région donnée du territoire à l'étude. Dans son ensemble, la qualité de l'eau souterraine n'est pas très bonne pour plus de la moitié du territoire couvert par l'étude, soit principalement dans la partie ouest. Une partie de cette eau est non potable, dans les Basses-terres nord, sur une superficie d'environ 2 200 km². Il s'agit d'eau saumâtre, vestige de la Mer de Champlain ayant envahie le territoire il y a environ 11 000 ans. La qualité de l'eau est nettement meilleure en altitude, soit dans le sud du Piémont, dans les Hautes-terres appalachiennes ainsi que sur certaines Collines montérégiennes, soit principalement des zones épargnées par l'invasion de la Mer de Champlain ou encore, certaines zones (sud du Piémont) à travers lesquelles suffisamment d'eau douce a circulé pour permettre le lessivage des composantes marines présentes initialement dans les aquifères. L'eau des Basses-terres sud et du nord-est du Piémont est classifiée

« passable » à cause de plusieurs dépassements de critères pour l'eau potable, à la fois pour la santé et esthétiques.

Le traitement statistique des données par une analyse multivariée a permis l'intégration d'un grand nombre de paramètres géochimiques ainsi que la division des échantillons en groupes présentant des caractéristiques similaires. Inspirée principalement des travaux de Güler et al. (2002) et de Cloutier (2004), la technique de l'analyse hiérarchique regroupée (*clustering*) s'est avérée efficace pour la définition des groupes d'eau. Huit groupes d'eau ont été définis. Ceux-ci sont cohérents tant du point de vue physicochimique que de la répartition spatiale. L'interprétation des groupes d'eau par l'analyse en composantes principales (ACP) ainsi que par l'analyse d'une sélection de graphiques géochimiques a apporté une compréhension globale de l'évolution géochimique de l'eau souterraine, et, par le fait même, des informations pour mieux comprendre le système d'écoulement régional. Le niveau de vulnérabilité des eaux souterraines peut également être déduit en fonction des caractéristiques de chacun des groupes d'eau. En effet, les eaux relativement jeunes, situées en zones de recharge (Hautes-terres appalachiennes, sud et nord-est des Basses-terres), sont associées à un plus haut niveau de vulnérabilité. À l'inverse, les eaux des aquifères confinés ou les eaux plus évoluées en zone d'émergence (nord et nord-ouest des Basses-terres, Piémont ainsi que certaines vallées appalachiennes), sont associées à une plus faible vulnérabilité.

La contribution de cette étude géochimique à la compréhension globale du système d'écoulement des eaux souterraines de la Montérégie Est est significative. L'origine des eaux a été décrite selon trois pôles géochimiques distincts et l'identification des principaux mécanismes géochimiques d'évolution des eaux a permis d'établir les liens entre ces pôles d'origine et les groupes d'eau plus évolués, permettant ainsi de développer un modèle conceptuel de l'écoulement. Les groupes d'eau ont chacun été associés à des conditions de confinement précises (tableau 4.2), permettant l'identification des zones de recharge, d'émergence et de rencontre des eaux (mélange), ainsi que l'évaluation qualitative du temps de résidence de l'eau souterraine (zones stagnante, zones d'écoulement présumé lent) et des voies d'écoulement (écoulement régional ou local). Les patrons d'écoulement régionaux et les zones de

recharge/résurgence définis au tout début du projet du PACES, basés entre autres sur la géologie et la piézométrie, ont dû être revus sur la base des résultats géochimiques et à leur interprétation dans le cadre de cette étude.

Par exemple, le Piémont avait initialement été identifié comme étant la principale zone de recharge de la zone à l'étude, alors que la géochimie a démontré que seule la partie nord de ce contexte représente une zone de recharge significative. De plus, la géochimie a permis d'identifier d'autres zones de recharge, comme le sud des Basses-terres et, surtout, les Hautes-terres appalachiennes (principalement dans le sud-est).

Eaux de recharge

Les eaux de recharge, facilement reconnaissables géochimiquement par leur jeune âge (présence de tritium et proportion élevée de ^{14}C moderne), leur pH acide (plus proche de celui des précipitations) et leur facilité à dissoudre les minéraux carbonatés, ont été identifiées dans différents contextes hydrogéologiques : dans le sud des Basses-terres et le nord-ouest du Piémont (groupe d'eau BT : pour Basses-terres) et principalement dans le sud-est des Hautes-terres appalachiennes et le sommet des Montérégiennes (groupe d'eau A1 : « A » pour Appalaches). Pour le groupe BT, la recharge y est toutefois présumée relativement lente dû à la présence de dépôts de till épais et compte tenu de la plus faible topographie. Ainsi, l'infiltration et l'écoulement étant assez lents, les eaux de recharge se chargent en matières dissoutes totales (MDT) au contact de l'environnement minéral. Les eaux saumâtres de la Mer de Champlain étant toujours présentes dans l'aquifère, mais en proportions résiduelles, elles viennent également se mélanger à ces eaux jeunes, augmentant également le taux de MDT et diminuant du même coup la qualité de l'eau. Pour le groupe A1, la recharge des aquifères est présumée plus rapide dû à la plus grande perméabilité des dépôts appalachiens et au relief plus accentué ; d'ailleurs, de la modélisation 1D de la recharge avec le logiciel *HELP* a montré que c'était dans les Hautes-terres que la recharge était la plus élevée (Carrier et al., 2013). Les eaux y sont beaucoup moins chargées en matières dissoutes totales, ce qui entraîne des eaux de meilleure qualité. Ces deux groupes d'eau (BT et A1) sont indicateurs, outre de zones de recharge, de zones où les aquifères ont une plus grande vulnérabilité.

Lessivage des eaux saumâtres

Les eaux saumâtres retrouvées au nord-ouest de la région d'étude sont totalement confinées sous l'épaisse couche d'argile et silt de la Mer de Champlain (groupes d'eau MC, pour Mer de Champlain et groupe M3, « M » pour Montérégiennes ou pour mélange). La présence de cette zone d'eau saumâtre est due à la fois au faible gradient hydraulique, au taux de recharge très limité, voire nul, et à la présence d'une importante zone de résurgence le long d'une zone de failles au pied des Hautes-terres des Appalaches, qui limite l'écoulement à l'ouest de celle-ci. Elles sont facilement identifiables par leur importante quantité d'ions en solution et leur taux élevé de chlorures et de sodium. Elles sont bordées par des groupes d'eau sodiques et alcalins (groupes d'eau M1 et M2) résultants du mécanisme d'échange ionique, typique du processus de lessivage des eaux saumâtres par des eaux douces dans des aquifères composés notamment de minéraux argileux. Le processus semble également entraîner, selon notre compréhension du phénomène de désorption, la mise en solution de composés indésirables et nocifs pour la santé tels que le baryum et les fluorures. Bien que le processus de lessivage soit lent, les eaux de la Mer de Champlain sont tout de même graduellement chassées du territoire. Selon une méthode proposée par Appelo et Postma (2005), il serait possible, voire souhaitable, de poursuivre l'investigation en calculant le taux de lessivage des eaux saumâtres et ainsi estimer quantitativement le taux de progression du front d'eaux sodiques et alcalines. Une plus grande densité de données pour le secteur nord des Basses-terres serait toutefois nécessaire pour entreprendre ces calculs.

Évolution des eaux

Qu'elles se soient infiltrées au niveau du sud des Basses-terres (groupe BT), du nord-ouest du Piémont ou des Hautes-terres appalachiennes (groupe A1), les eaux douces de la Montérégie Est évoluent en suivant différents chemins selon les contextes géologiques et topographiques dans lesquels elles se trouvent. Les eaux de recharge des Basses-terres et du nord-ouest du Piémont évoluent lentement, selon un mécanisme de mélange ou encore de lessivage progressif des eaux saumâtres. Quant au processus évolutif des eaux douces associées aux zones de recharge plus rapides, principalement au sud-est des Hautes-terres appalachiennes et sur les Collines montérégiennes, ceux-ci ne sont pas encore tout à fait (ou totalement) compris. En effet, bien que

l'on retrouve des eaux jeunes à quelques endroits dans les Hautes-terres, des eaux bien distinctes présentant des âges ^{14}C élevés, se retrouvent à proximité (groupe A3), laissant place à deux hypothèses quant à l'origine de ces eaux évoluées : 1) présence d'un long patron d'écoulement permettant une évolution très lente des eaux de recharge ou 2) présence d'un apport sous-jacent d'eaux anciennes d'origine distincte (de l'eau de fonte des glaciers par exemple). Des études plus poussées de datation sur ces eaux permettraient d'identifier leur origine, qui pourrait d'ailleurs être un mélange des deux hypothèses présentées. Les caractéristiques géochimiques de ces eaux évoluées tendent à démontrer que les mêmes eaux évoluées que l'on retrouve sur une grande partie des Hautes-terres ainsi que dans le nord-est du Piémont (groupe d'eau A3) se retrouvent également dans le sud du Piémont, avec une composante sodique d'influence marine (groupe d'eau A2). Ceci suggère un écoulement régional en direction nord-ouest (approximativement) à partir des Hautes-terres et permet d'identifier quelques zones de rencontre entre ces eaux douces évoluées et les eaux saumâtres des Basses-terres (groupe A2).

Origine des eaux

Les analyses de certains échantillons donnant des informations sur le temps de résidence par la méthode du tritium et du carbone 14, ont contribué significativement à la compréhension du système d'écoulement. En effet, les résultats obtenus sont généralement en accord avec les autres résultats géochimiques et aident à expliquer la nature des types d'eau ainsi que l'implication de ceux-ci sur l'écoulement. Par exemple, les âges ^{14}C non corrigés sont de l'ordre de 14 000 ans pour les eaux de la zone saumâtre (groupes MC et M3), ce qui est cohérent avec l'invasion de la Mer de Champlain à $\pm 2\ 000$ ans. Ces âges permettent également d'affirmer que les eaux évoluées que l'on retrouve dans les Hautes-terres des Appalaches, dans le Piémont, ainsi qu'à certains endroits au pourtour des Collines montérégiennes (groupes A2 et A3) sont relativement anciennes, pouvant atteindre plus de 15 000 ans (âge ^{14}C non corrigé). La présence de concentrations significatives en tritium dans les eaux associées à la recharge des aquifères vient également confirmer leur jeune âge.

Quant à l'étude des isotopes stables de l'eau pouvant fournir des indices sur l'origine des eaux souterraines, les conclusions pouvant en être tirées sont indirectes, mais semblent toutefois

cohérentes avec les autres données géochimiques. Les groupes d'eau avec une composante d'eau de mer (groupes CS et M3) sont plus enrichis en isotopes $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, tandis que les groupes d'eau associés aux Hautes-terres ou à l'altitude (groupes A1, A2 et A3) sont plus appauvris en deutérium. La droite des eaux météoriques locale, basée sur un suivi de seulement 15 mois, n'a pu servir de comparatif. Les résultats ont été jugés non représentatifs compte tenu du temps particulièrement chaud et sec ayant sévi lors de la période du suivi. Il aurait été préférable de poursuivre le suivi pluviométrique à plus long terme, soit sur plusieurs années, afin d'obtenir une droite météorique locale plus représentative.

Travaux à venir

Mentionnons qu'une campagne d'échantillonnage des gaz dissous des eaux souterraines de la Montérégie Est a été menée à l'automne 2012, en collaboration avec l'Université du Québec à Montréal (UQÀM), l'Université de Rennes (France), l'INRS-ETE, l'Université Concordia, ainsi que la CGC. Près d'une quarantaine de puits ont été échantillonnés sur l'ensemble du territoire de la Montérégie Est pour l'analyse de l'un ou plusieurs des gaz suivants : les gaz rares (He, Ne, Ar, Rn), les chlorofluorocarbures (CFC), l'hexafluorure de soufre (SF_6) ainsi que certains hydrocarbures (méthane, éthane, propane). Ces résultats pourront venir préciser l'origine et l'âge de certaines eaux et apporter une meilleure compréhension du système d'écoulement, en particulier pour les Hautes-terres appalachiennes. Les questions en suspens à ce sujet sont notamment les suivantes :

- Les eaux évoluées des Hautes-terres appalachiennes sont-elles le résultat de l'évolution lente de la recharge moderne en altitude? Pourraient-elles correspondre à de l'eau sous-glaciaire, infiltrée lors de la dernière glaciation?
- Les eaux douces responsables du lessivage des eaux saumâtres proviennent-elles du système des Hautes-terres appalachiennes, notamment via les dykes montérégiens fracturés, ou sont-elles uniquement le résultat de l'écoulement de la faible recharge plus récente provenant du sud des Basses-terres et du nord du Piémont ?

Les résultats devraient être disponibles à l'hiver 2013, soit après la fin des présents travaux de maîtrise.

RÉFÉRENCES

- Al-Bassam, A.M., Khalil, A.R., 2012. DurovPwin: A new version to plot the expanded Durov diagram for hydro-chemical data analysis. *Computers & Geosciences*, 42: 1-6.
- Al-Charideh, A., 2011. Geochemical and isotopic characterization of groundwater from shallow and deep limestone aquifers system of Aleppo basin (north Syria). *Environmental Earth Sciences*, 65(4): 1157-1168.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC Press, Boca Raton (FL), USA, 649 pp.
- Beaudry, C., Malet, X., Lefebvre, R., Rivard, C., 2011. Délimitation des eaux souterraines saumâtres en Montérégie Est, Québec, Canada. In: Commission géologique du Canada (Ed.). *Ressources naturelles Canada, Québec*, pp. 31.
- Bédard, P., 2009. La province géologique montréalaise: l'état des connaissances. Communauté métropolitaine de Montréal, http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/montereгиennes/seance_1_pierre_bedard.pdf.
- Benoit, N. et al., 2011. Groundwater Geochemistry of the Lower Chaudière River Watershed, Québec, GeoHydro 2011. Commission géologique du Canada, UQAT, École Polytechnique de Montréal, Université Laval, Québec, pp. 8.
- Blanchette, D., 2006. Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada. Maîtrise Thesis, INRS, Québec, 185 pp.
- Blanchette, D., Cloutier, V., 2010. Protocole officiel de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine. Programme d'acquisition des Connaissances sur les Eaux Souterraines du Québec (PACES), Amos (Québec), pp. 41.
- Bourque, P.-A., 1997. Planète Terre. In: Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval (Ed.). Université Laval, Québec, pp. http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html.
- Brisebois, D., Nadeau, J., 2003. *Géologie de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent*. Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec. DV 2003-08, scale 1:250 000.
- Carrier, M.-A. et al., 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada, Réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA Québec.
- CEAEQ, 2012. Modes de conservation pour l'échantillonnage des eaux souterraines, DR-09-09. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, pp. 7.
- Chadha, D.K., 1999. A proposed new diagram for geotechnical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal*, 7: 431-440.
- Clark, I.D., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 328 pp.
- Clark, T.H., Globensky, Y., Hofmann, H., 1979. *Stratigraphie Paléozoïque des Basses-terres du Saint-Laurent du Québec*, Université Laval, Québec.

- 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, INRS - Centre Eau Terre Environnement, Québec, 402 pp.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Bourque, É., Therrien, R., 2006. Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 14(4): 573-590.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Therrien, R., 2010. Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 59(5): 977-994.
- COVABAR, 2012. <http://www.covabar.qc.ca/>.
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Sciences, New Series*, 133(3465): 1702-1703.
- CRÉ Montérégie Est, 2012. <http://www.monteregie-est.org/>.
- Criss, R.E., Farquhar, J., 2008. Abundance, notation, and fractionation of light stable isotopes. *Rev Mineral Geochem*, 68: 15-30.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 16: 436-468.
- Desaulniers, D.E., Cherry, J.A., 1989. Origin and movement of groundwater and major ions in a thick deposit of Champlain Sea clay near Montréal. *Canadian Geotechnical journal*, 26: 80-89.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- Dubé-Loubert, H., Parent, M., 2013. Géologie du quaternaire de la Montérégie Est. In: *Géologie Québec (Ed.)*, Québec.
- Fehdi, C., Rouabhia, A., Baali, F., Boudoukha, A., 2009. The hydrogeochemical characterization of Morsott-El Aouinet aquifer, Northeastern Algeria. *Environmental Geology*, 58(7): 1611-1620.
- Feininger, T., Goodacre, A.K., 1995. The eight classical Monteregian hills at depth and the mechanism of their intrusion. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(9): 1350-1364.
- Ferronsky, V.I., Polyakov, V.A., 2012. *Radiocarbon in Natural Waters Isotopes of the Earth's Hydrosphere*. Springer Netherlands, pp. 301-359.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Upper Saddle River, NJ, 609 pp.
- Freeze, R.A., Witherspoon, P.A., 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resources Research*, 3(2): 623.
- Gaofeng, Z., Yonghong, S., Chunlin, H., Qi, F., Zhiguang, L., 2009. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Heihe River Basin, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 60(1): 139-153.
- Gaucher, E., 1984. Compilation de la géologie du Quaternaire. In: *Ministère de l'énergie et des ressources - Service de la géoinformation (Ed.)*, Québec.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962): 1088-90.

- Globensky, Y., 1985. Géologie des Basses-terres du Saint-Laurent. In: Direction générale de l'Exploration géologique et minérale (Ed.), Carte no 1999 du rapport MM 85-02. Ministère de l'Énergie et des Ressources - Gouvernement du Québec,.
- Gosselin, J.-S., Rivard, C., Paniconi, C., Martel, R., 2012. Use of Three Recharge Assessment Methods in Southern Quebec. In: INRS-ETE (Ed.), AIH 2012, Niagara Falls, Canada.
- Gouvernement du Québec, 2012. Règlement sur la qualité de l'eau potable c.Q-2, r.40. In: Ministère du Développement durable, E., Faune et Parcs, (Ed.).
- Güler, C., Thyne, G., McCray, J., Turner, K., 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10(4): 455-474.
- Han, D., Kohfahl, C., Song, X., Xiao, G., Yang, J., 2011. Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, China. *Applied Geochemistry*, 26(5): 863-883.
- Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, USGS, Alexandria, VA.
- Hounslow, A.W., 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publisher, Boca Raton, Florida, USA, 397 pp.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 2012. Global Network of Isotopes in Precipitation, <http://www-naweb.iaea.org>.
- Johnson, C.M., Beard, B.L., Albarede, F., 2004. Overview and general concepts. *Geochemistry of Non-Traditional Stable Isotopes*, 55: 1-24.
- Katz, B.G., Eberts, S.M., Kauffman, L.J., 2011. Using Cl/Br ratios and other indicators to assess potential impacts on groundwater quality from septic systems: A review and examples from principal aquifers in the United States. *Journal of Hydrology*, 397(3-4): 151-166.
- Kazemi, G.A., Lehr, J.H., Perrochet, P., 2006. Groundwater Age. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 288 pp.
- Kuldip, S., Hundal, H.S., Dhanwinder, S., 2011. Geochemistry and assessment of hydrogeochemical processes in groundwater in the southern part of Bathinda district of Punjab, northwest India. *Environmental Earth Sciences*, 64(7): 1823-1833.
- Laurencelle, M., Lefebvre, R., Rivard, C., Ladeveze, P., Carrier, M.-A., 2012. Modeling the evolution of the Montérégie Est regional fractured-rock aquifer system. In: INRS-ETE (Ed.), AIH 2012, Niagara Falls, Canada.
- McCormack, R., 1980. Étude hydrogéologique du bassin versant de la Richelieu, Direction générale des inventaires et de la recherche, Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec, Québec.
- MDDEFP, 2012a. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Cahier 3: Échantillonnage des eaux souterraines. In: Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (Ed.), Québec, pp. 76.
- MDDEFP, 2012b. <http://www.mddefp.gouv.qc.ca>.
- Nystrom, E., 2004. Ground-Water Quality in the Lake Champlain Basin, New-York, 2004, USGS, Reston, Virginia.
- OBV de la baie Missisquoi, 2012. <http://www.obvbm.org/>.

- OBV Yamaska, 2012. <http://www.obv-yamaska.qc.ca/>.
- Paré, D., 1978. Étude hydrogéologique du bassin de la Yamaska, Direction générale des eaux, Ministère des Richesses Naturelles, Gouvernement du Québec, Québec.
- Parent, M., Occhietti, S., 1988. Late Wisconsinan Deglaciation and Champlain Sea Invasion in the St. Lawrence Valley, Québec. *Géographie physique et quaternaire*, 42(3): 215.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. PHREEQC for Windows, pp. A hydrogeochemical transport model.
- Pinti, D.L. et al., 2010. Fossil brines preserved in the St-Lawrence Lowlands, Québec, Canada as revealed by their chemistry and noble gas isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 4228-4242.
- Prichonnet, G., 1984. Dépôts quaternaires de la région de Granby, Québec. In: Commission géologique du Canada (Ed.), Ottawa, Canada.
- Révész, K.M., Breen, K.J., Baldassare, A.J., Burruss, R.C., 2012. Carbon and hydrogen isotopic evidence for the origin of combustible gases in water-supply wells in north-central Pennsylvania. *Applied Geochemistry*, 27: 361-375.
- Riggs, H.C., 1968. Hydrologic Analysis and Interpretation - Chapter A1: Some statistical tools in hydrology. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Chapter A1: 44.
- Rivard, C. et al., 2003. Hydrogeological characterisation of a representative area of the Maritimes carboniferous basin, Ressources Naturelles Canada.
- Rivard, C. et al., 2008. Canadian Groundwater Inventory: Regional Hydrogeological characterization of the South-central part of the Maritimes Carboniferous Basin.
- Rivard, C. et al., 2012. Canadian groundwater inventory: Regional hydrogeological characterization of the Annapolis-Cornwallis Valley aquifers.
- Rozanski, K., Araguàs-Araguàs, L., Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation, dans *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington DC.
- Sanford, R.F., Pierson, C.T., Crovelli, R.A., 1993. An Objective Replacement Method for Censored Geochemical Data. *Math Geol*, 25(1): 59-80.
- Santé Canada, 2012. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, Tableau sommaire. In: Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement (Ed.).
- Simler, R., 2012. DIAGRAMMES. Université d'Avignon, Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon, pp. Logiciel d'hydrogéochimie.
- Slivitzky, A., Saint-Julien, P., 1987. Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce. Direction générale de l'exploitation géologique et minière. Direction de la recherche géologique, Service de la géologie, Québec, Canada.
- TechnoRem, 2008. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des MRC Le Haut-Richelieu, Rouville et Brome-Missisquoi, Montérégie Est.
- Thériault, R., 2013. Identification des sources de nitrate et des facteurs contrôlant sa distribution dans les sols agricoles et les eaux souterraines des bassins versant Ewing et Walbridge (Montérégie Est), Institut national de recherche scientifique, Québec, 163 pp.

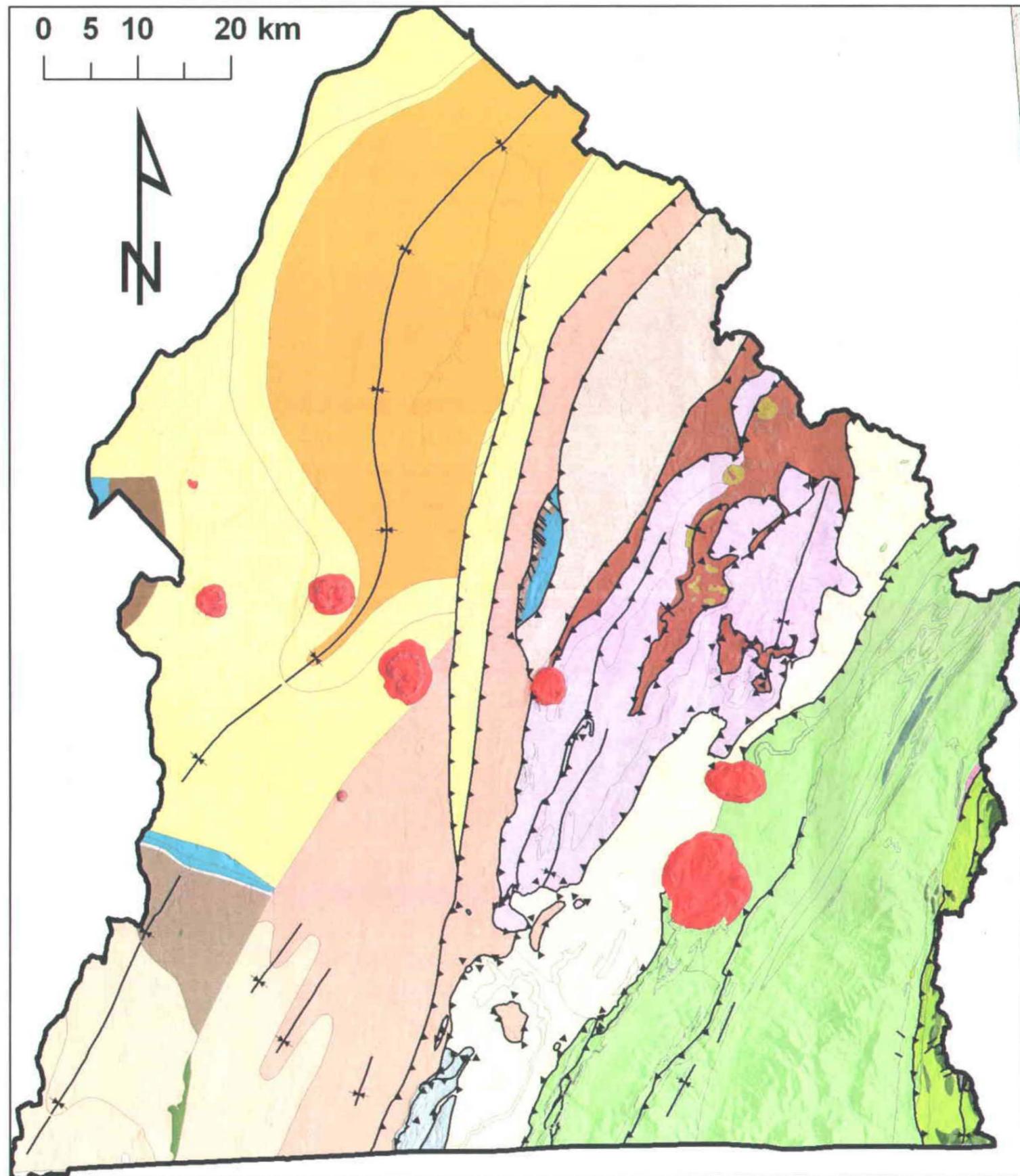
- Torrance, J.K., 1988. Mineralogy, Pore-water Chemistry, and Geochemical Behaviour of Champlain Sea and Related Sediments. The Late Quaternary Development of the Champlain Sea Basin: Geological Association of Canada, Special Paper 35(in Gadd, N.R., ed.): 259-275.
- Tòth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16): 4795-4812.
- Tòth, J., 1999. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, process, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7: 1-14.
- Valder, J.F., Long, A.J., Davis, A.D., Kenner, S.J., 2012. Multivariate statistical approach to estimate mixing proportions for unknown end members. *Journal of Hydrology*, 460-461: 65-76.
- Yechieli, Y., Sivan, O., 2010. The distribution of saline groundwater and its relation to the hydraulic conditions of aquifers and aquitards: examples from Israel. *Hydrogeology Journal*, 19(1): 71-81.
- Yin, L., Hou, G., Dou, Y., Tao, Z., Li, Y., 2009. Hydrogeochemical and isotopic study of groundwater in the Habor Lake Basin of the Ordos Plateau, NW China. *Environmental Earth Sciences*, 64(6): 1575-1584.
- YSI Environmental, 2009. Système multi paramètres YSI 556 MPS - Manuel de l'opérateur. In: Environmental, Y. (Ed.), Yellow Springs, OH, USA.

ANNEXES

ANNEXE A

CARTES GÉOLOGIQUES

1. Géologie du roc de la Montérégie Est : compilation des travaux de Globensky (1985), Slivitzky et St-Julien (1987) et de Brisebois (2003).
2. Géologie du Quaternaire de la Montérégie Est : compilation des travaux de Gaucher (1984) et de Prichonnet (1984), révisés par Dubé-Loubert et Parent (2013).



GÉOLOGIE DU ROC DE LA MONTÉRÉGIE EST VERSION SIMPLIFIÉE

Formation

- Formation de Bourret
- Formation de Story Point
- Formation de Saint-Daniel
- Formations de Bulstrode et de Melbourne

Groupe

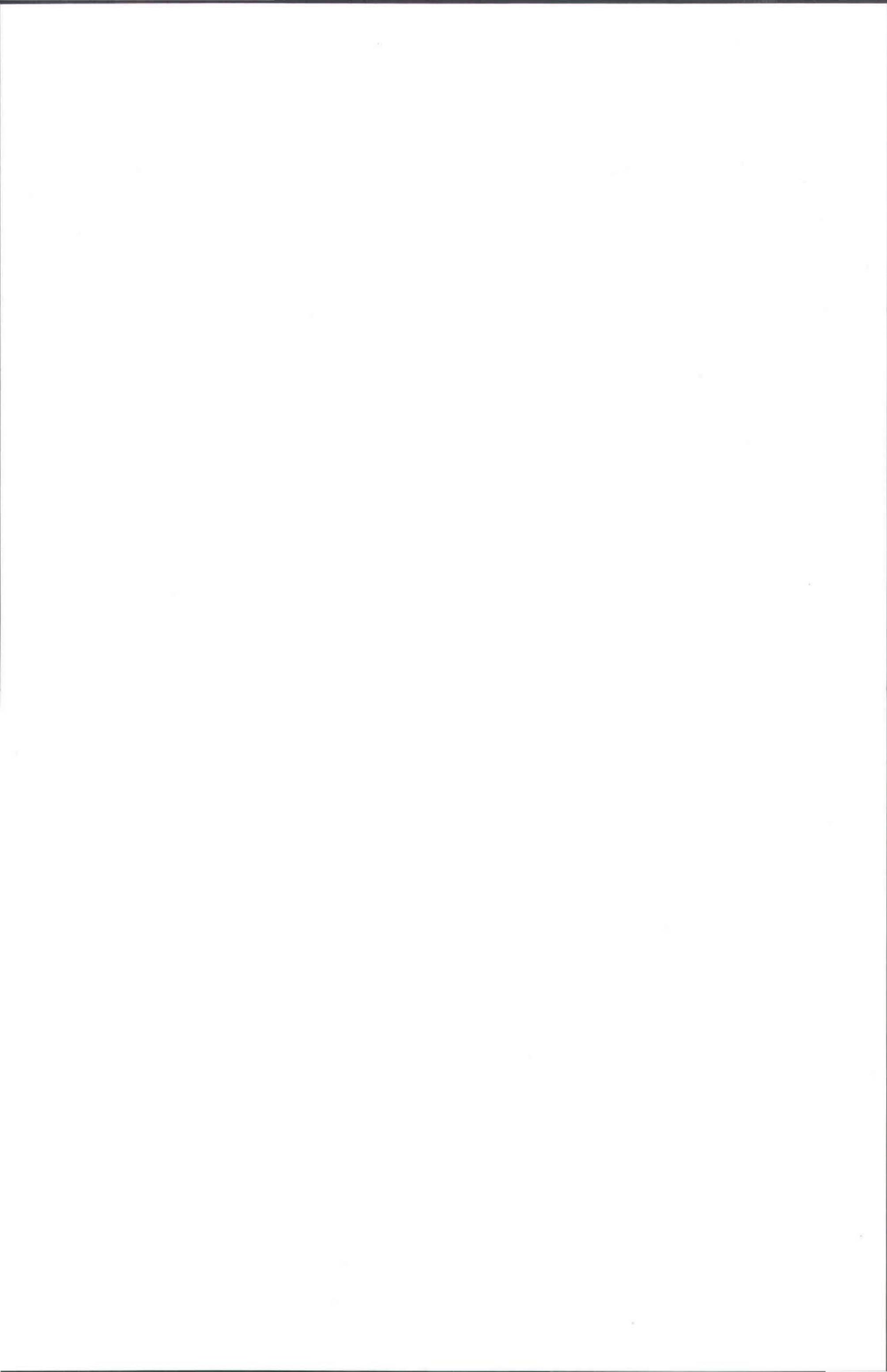
- Groupe de Stanbridge
- Groupe de Beekmantown
- Groupe de Chazy
- Groupe de Oak Hill
- Groupe de Lorraine
- Groupe de Queenston
- Groupe de Sainte-Rosalie
- Groupe de Caldwell
- Groupe de Shefford
- Groupe de Philipsburg
- Groupe de Trenton

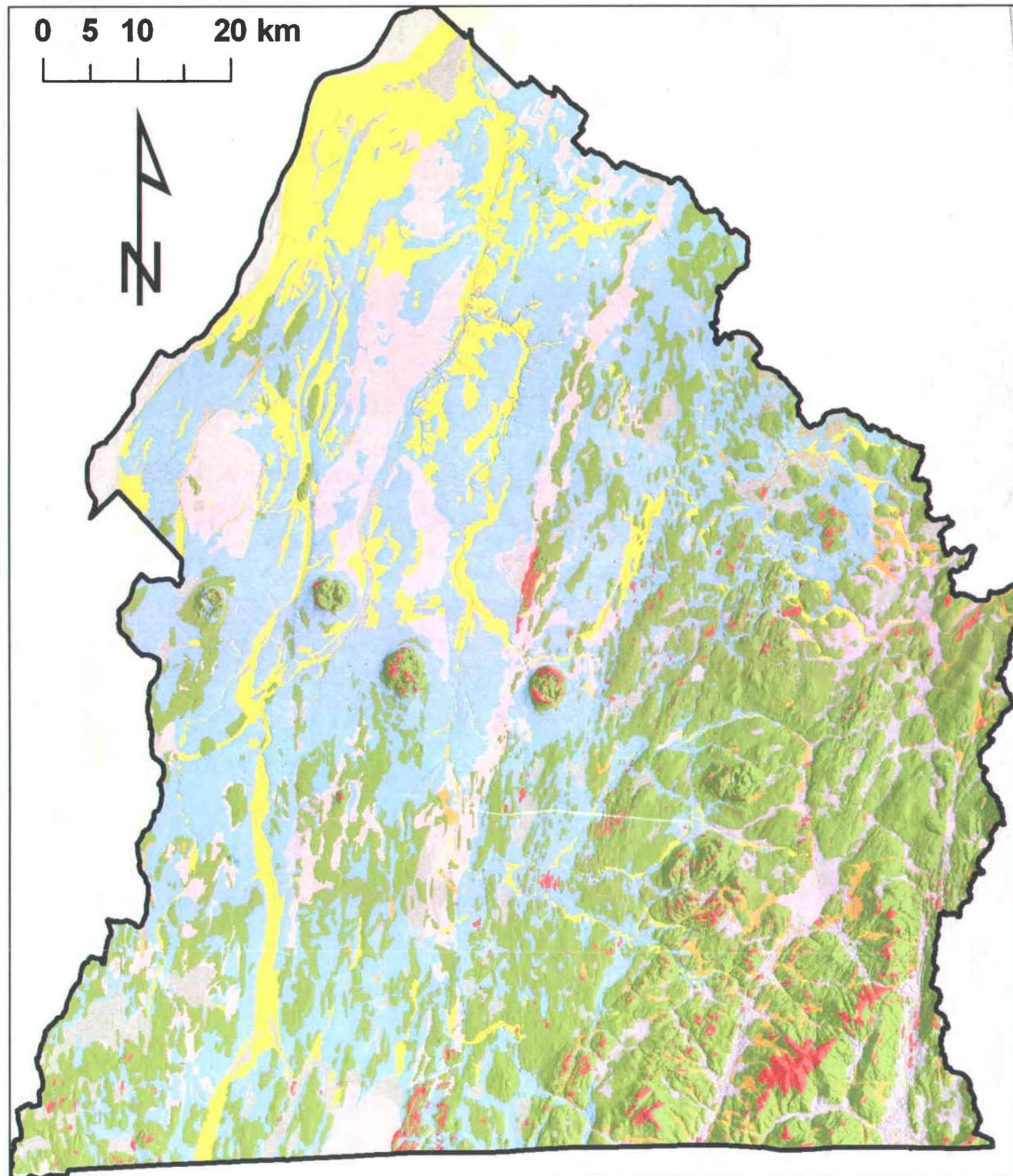
Autre

- Collines Montérégiennes
- Diorite
- Ophiolites et roches volcaniques
- Olistostrome de Drummondville
- Shale d'Utica

Lineament

- Discordance
- Faïlle indéterminé
- Faïlle inverse
- Faïlle inverse
- Trace axiale d'une synforme déversé
- Trace axiale d'une synforme





GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE DE LA MONTÉRÉGIE EST CARTE SIMPLIFIÉE

- Dépôts de varsant
- Sédiments organiques
- Dépôts éoliens
- Sédiments alluviaux
- Sédiments lacustres (sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques)
- Sédiments marins
- Sédiments glaciomarins
- Sédiments du lac proglaciaire
- Sédiments fluvioglaciaires
- Till
- Quaternaire ancien
- Roc affleurant

Cette carte est une simplification issue de la compilation des travaux suivants :

Gaucher, E. et al., 1984. Compilation de la géologie du Quaternaire. Échelle 1 : 50000. Ministère de l'énergie et des ressources, Service de la géoinformation, Québec.

Prichonnet, G., 1984. Dépôts quaternaires de la région de Granby, Québec. Commission géologique du Canada, Ottawa, Canada.

Dubé-Loubert, H., Parent, M., 2013. Géologie du Quaternaire de la Montérégie Est. Géologie Québec.



ANNEXE B

***RÉSUMÉ DU PROTOCOLE DE PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS D'EAU SOUTERRAINE DU
PROGRAMME D'ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LES EAUX SOUTERRAINES AU QUÉBEC***

Adapté de Blanchette et Cloutier (2010)

B.1 CHOIX D'UN PUIITS

En plus de répondre aux besoins spécifiques l'étude hydrogéochimique en Montérégie Est, soit la répartition spatiale uniforme et d'une densité adéquate, les puits sélectionnés doivent permettre l'échantillonnage de l'eau souterraine représentative. L'eau doit être à l'état naturel, soit sans traitement. L'autorisation du propriétaire du puits ou du terrain (selon le cas) est essentielle. Un maximum d'informations spécifiques au puits (listées à la section 1.1.2) doit également être disponible.

Autorisation des propriétaires

Lors de l'échantillonnage d'un puits privé, une autorisation verbale du propriétaire a été jugée suffisante. Un dépliant d'information sur le projet PACES est remis au propriétaire. Les résultats analytiques lui seront transmis par la poste quelques mois plus tard, accompagnés d'une lettre de remerciement et d'informations expliquant les critères et les recommandations gouvernementales applicables en matière d'eau potable.

Le processus est différent pour le forage et l'aménagement de puits d'observation. Un contrat écrit, signé par le propriétaire et l'INRS-ETE, est requis, établissant les engagements de chacun des partis. Les résultats analytiques seront également transmis au propriétaire du terrain, par la poste.

Acquisition d'information

L'équipe d'échantillonnage se doit d'être équipée d'un GPS, d'une sonde à niveau d'eau et d'un carnet permettant notamment la collecte d'informations sur le terrain et auprès du propriétaire du puits (si applicable). S'il s'agit d'un puits d'observation aménagé dans le cadre du PACES, une copie du log de forage est nécessaire. Voici une liste des principales informations à recueillir :

- Localisation exacte du puits : coordonnées GPS et adresse postale ;
- Coordonnées du propriétaire ;
- Construction générale du puits : profondeur totale, diamètre, présence ou non d'une crépine, longueur du tubage, hauteur de la margelle ;

- Aquifère pompé : roc ou sédiments ;
- Utilisation générale de l'eau : eau potable, alimentation de bétail, inutilisé ;
- Qualité générale de l'eau selon le propriétaire : quantité, transparence, goût, odeur, caractéristiques spécifiques ;
- Présence d'un système de traitement ;
- Année de construction du puits.

Cette liste étant non exhaustive, toute autre information jugée pertinente doit être notée. Afin d'uniformiser et assurer la qualité des informations recueillies, un carnet standardisé comprenant plusieurs copies d'un formulaire élaboré par la Commission Géologique du Canada (CGC) était fourni à chacune des équipes lors de l'échantillonnage en Montérégie Est.

Dans le cas où le propriétaire n'est pas en mesure de fournir les informations sur son puits et qu'aucun autre puits alternatif n'est disponible dans le secteur, il est possible retrouver la plupart des puits au roc, possédant un tubage en acier de 6 pouces de diamètres, dans la base de données du SIH. L'année de forage du puits, le nom du puisatier, les coordonnées géographiques exactes ainsi que l'adresse sont notamment des informations permettant de retrouver le puits dans le SIH. Si le puits ne peut être associé à aucun puits du SIH, il pourra être associé à la description géologique du puits le plus près répertorié dans le SIH. La profondeur totale du puits et la longueur du tubage d'acier sont alors mesurées à l'aide des sondes appropriées.

Pour chaque site d'échantillonnage, le niveau piézométrique statique est mesuré dans le puits à l'aide d'une sonde à niveau d'eau. Il est important de s'assurer que la pompe n'est pas en fonction lors de la prise de la mesure. Le niveau serait alors sous-estimé.

Il est important de consigner le plus d'informations possible afin de pouvoir retracer facilement la provenance et le contexte de chaque échantillon. Toutes les informations sont intégrées à la base de données hébergée par l'INRS-ETE.

B.2 PURGE DE L'EAU SOUTERRAINE DU PUIT

Il est essentiel de vidanger l'eau stagnante présente dans les puits et piézomètres afin d'obtenir des échantillons d'eau brute (non traitée) représentatifs du milieu aquifère (MDDEP, 2008). La purge sera réalisée directement au robinet dans le cas d'un puits privé en fonction tandis qu'elle sera réalisée à l'aide d'une pompe de grosseur appropriée dans le cas des puits d'observations et piézomètres du PACES. La procédure pour la purge est décrite en fonction du rythme de pompage de l'eau souterraine du puits par l'utilisateur.

Pompage régulier

L'eau souterraine des puits de particuliers ainsi que ceux associés à des édifices municipaux et industriels est généralement pompée de façon journalière, donc peu stagnante. Pour ces puits, l'eau souterraine doit être vidangée jusqu'à l'atteinte de la stabilité des paramètres physico-chimiques mesurés à l'aide d'une sonde appropriée (figure B.1), tels la température, le pH, la conductivité électrique spécifique, l'oxygène dissous et le potentiel d'oxydoréduction (ORP). La diminution de la turbidité de l'eau en cours de pompage peut également constituer un indice visuel utile.

Selon la précision des sondes utilisées (voir guide d'utilisation des sondes), les critères de stabilité pourront varier d'un instrument à l'autre pour un même paramètre. Les mesures sont prises dès le commencement de la purge et la stabilité est atteinte lorsque trois mesures consécutives, prises à des intervalles de cinq minutes, respectent les critères de stabilité fixés pour l'ensemble des paramètres. Lorsque la stabilité des paramètres est atteinte selon les critères, il est toutefois recommandé de prendre une ou deux lectures supplémentaires lorsque les mesures d'un ou plusieurs paramètres sont caractérisées individuellement par une tendance (augmentation constante, diminution constante) pour vérifier la stabilité. En effet, la différence entre deux mesures devrait diminuer avec le temps à l'approche de la stabilité. La figure B.1 montre en exemple, l'évolution du pH de l'eau lors de la purge d'un puits d'observation.

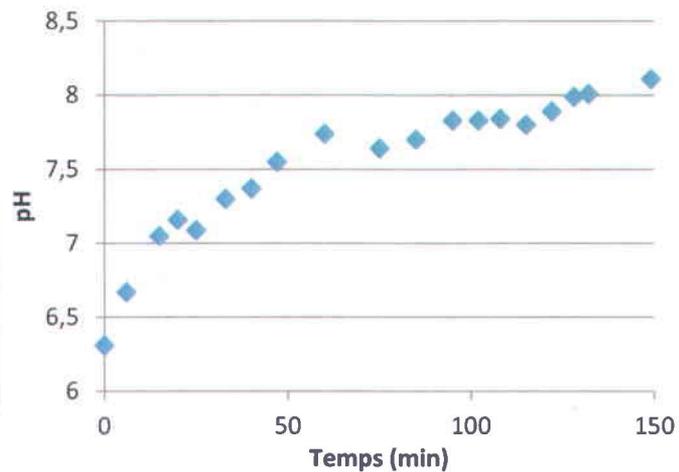


Figure B.1 : À gauche, sonde multi-paramètres de marque YSI, modèle 556 permettant de mesurer les paramètres physico-chimiques lors du pompage du puits. À droite, exemple d'évolution du pH de l'eau pompée en fonction du temps lors de la purge du puits d'observation nommé P02roc, en Montérégie Est.

Puits peu pompés ou abandonnés

Lorsque l'eau souterraine d'un puits est rarement ou jamais pompée, il est recommandé de purger un volume d'eau équivalent à plusieurs fois (normalement de 3 à 5 fois) le volume d'eau présent dans le puits (MDDEP, 2008). Le calcul du volume à purger nécessite de connaître les caractéristiques du puits ainsi que le niveau de l'eau souterraine dans celui-ci.

Pour le puits tubulaire, le volume d'eau actuellement présent dans le puits, selon la profondeur d'eau mesurée, est calculé selon la formule suivante:

$$V(L) = \left(\frac{DT}{2}\right)^2 \times \pi \times (PT - PE) \times 1000 \times 3$$

V représente le volume d'eau en litres, DT est le diamètre du tubage en mètres, PT est la profondeur totale du puits en mètres et PE est la profondeur du niveau d'eau, en mètres.

Pour ce qui est du piézomètre, la formule doit être modifiée pour tenir compte du massif filtrant qui entoure la crépine. La formule est donc:

$$V(L) = \left[\left(\left(\frac{DT}{2} \right)^2 \times \pi \times (PT - PE - IMF) \right) + \left(\left(\frac{DF}{2} \right)^2 \times \pi \times IMF \right) \right] \times 1000 \times 3$$

IMF correspond à l'intervalle du massif filtrant, en mètres et *DF* est le diamètre du forage, en mètres, soit le diamètre à considérer à l'endroit du massif filtrant.

La constante 1000 dans les deux formules convertit les m³ en litres tandis que la constante 3 permet d'obtenir le volume minimum à purger correspondant à trois fois le volume d'eau contenu dans le puits en fonction de la profondeur d'eau mesurée.

Autre cas

Lorsque la recharge du puits (piézomètre) est lente, que le puits est en inactivité depuis un certain temps, 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'au moins trois fois le volume contenu dans le puits.

B.3 PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS

Sécurité

L'équipe d'échantillonnage doit connaître chacun des agents de conservations utilisés et avoir à portée de main chacune des fiches signalétiques associées.

Lors du prélèvement des échantillons, toujours porter des pantalons longs, des lunettes de protection et des gants de latex sans poudre pour se protéger des éclaboussures possibles d'agent de conservation et pour diminuer les risques de contamination des échantillons par une mauvaise manipulation. Il est aussi conseillé de porter un chandail à manches longues. Éviter les lentilles

cornéennes puisqu'elles rendent difficile le rinçage des yeux en cas d'éclaboussure. Il est aussi très important de ne jamais porter les mains au visage ou ailleurs sur le corps lors du prélèvement des échantillons afin d'éviter le contact avec les agents de conservation ou à l'inverse, la contamination des échantillons par des contaminants corporels. Manipulez très prudemment les agents de conservation. Ils sont corrosifs, très toxiques ou oxydants. Certains nécessitent d'être dilués rapidement avec de l'eau (acides forts: HNO_3 , H_2SO_4 et base forte: NaOH) lorsqu'on en renverse.

Eau brute

Afin de connaître la qualité naturelle de l'eau souterraine, il est nécessaire de prélever des échantillons d'eau brute non traitée puisque les traitements, tels que la chloration ou la présence de filtres (ne pas confondre avec les filtres $0.45 \mu\text{m}$ utilisés pour filtrer les métaux et les nutriments), peuvent modifier la composition chimique de l'eau. Le prélèvement des échantillons d'eau brute doit être fait préférentiellement 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. Généralement, le robinet extérieur sur lequel est connecté le boyau d'arrosage de jardin délivre de l'eau non traitée. Par contre, il est très important de valider cette information avant de procéder à la purge et à l'échantillonnage.

Assurance qualité

Duplicata

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

Blancs de terrain et de transport

Il est recommandé de produire des blancs de terrain et des blancs de transport d'eau ultrapure fournie par le laboratoire pour vérifier la qualité de la technique de décontamination lors du 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 blancs.

Remplissage des bouteilles et paramètres analysés

Les paramètres ayant été analysés dans le cadre du PACES Montérégie Est sont présentés dans le tableau B.1. Le tableau résume, selon l'ordre de remplissage recommandé, l'information sur chacune des bouteilles devant être remplies sur le terrain, les paramètres qui leur sont associés ainsi que les instructions de remplissage et de conservation.

Agents de conservation

Les agents de conservation utilisés servent généralement à acidifier l'échantillon d'eau et ont pour but, soit :

- d'éviter la précipitation ou l'adsorption des métaux sur les parois des contenants ;
- minimiser la prolifération bactérienne ;
- empêcher certaines réactions d'oxydation.

Les agents de conservation sont déjà inclus à l'intérieur des contenants pour l'analyse des métaux (HNO_3), l'azote ammoniacal et le phosphore total inorganique (H_2SO_4) ainsi que les sulfures (acétate de zinc + NaOH). Le remplissage des bouteilles doit être fait en prenant soin de ne pas perdre l'agent de conservation. Pour la bouteille de 1L HDPE pour les analyses du carbone 13 (^{13}C) et du carbone 14 (^{14}C), de 1 à 2 mg de cristaux de sodium azide (NaN_3) devra être introduit dans le contenant par les équipes d'échantillonnage avant d'aller sur le terrain. Il est très important de s'assurer de la présence des agents de conservation dans les contenants avant le remplissage.

Tableau B.1: Résumé du protocole d'échantillonnage comprenant l'ordre de remplissage, la description des bouteilles, les paramètres analysés avec chacune des bouteilles, les instructions de remplissage spécifiques et les conditions de conservation recommandées.

Ordre de remplissage (Identifiant)	Description des bouteilles	Paramètres	Instructions de remplissage	Conservation
-1- (Anions)	Polyéthylène 250 ml	Alcalinité totale, Br, Cl, F, Nitrites+Nitrates, Sulfates (SO ₄)	. Rincer la bouteille . Remplir sans air (méthode de la chaudière)	Noirceur 4°C 14 jours
-2- (Isotopes de l'eau)	HDPE 2 x 60 ml	$\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$. Rincer la bouteille . Remplir sans air (méthode de la chaudière)	Noirceur 4°C
-3- (Datation tritium)	HDPE 1L	Tritium	. Rincer la bouteille . Remplir sans air (méthode de la chaudière)	Noirceur 4°C
-4- (CID/COD)	Verre ambré 40 ml	CID, COD, Azote total (N _{tot})	. Rincer . Filtrer (filtre en fibre de verre 0,45 μm) . Remplir sans air	Noirceur 4°C 1 semaine
-5- (Isotope nitrate)	HDPE 3 x 60 ml	$\delta^{15}\text{N}$. Rincer . Filtrer (0,45 μm) . Remplir à l'épaule	Noirceur Congeler
-6- (Nutriments)	Polyéthylène 250 ml	P total inorganique NH ₄	. Filtrer (0,45 μm) . Remplir à l'épaule	Noirceur 4°C 28 jours
-7- (Métaux)	Polyéthylène 250 ml	Al, Li, Sb, Mg, Ag, Mn, As, Mo, Ba, Ni, Be, K, Bi, Pb, B, Se, Ca, Si, Cd, Na, Cr, Sr, Co, Ti, Cu, U, Sn, V, Fe, Zn	. Filtrer (0,45 μm) . Remplir à l'épaule	Noirceur 4°C 6 mois
-8- (Sulfures)	Polyéthylène 250 ml	S ²⁻	. Remplir à l'épaule	Noirceur 4°C 28 jours
-9- (Datation ¹⁴ C)	HDPE 1L	$\delta^{13}\text{C}$ et ^{14}C	. Remplir sans air (ne pas faire déborder)	Noirceur 4°C

Filtration

Dans certains cas, les agents de conservation utilisés peuvent dissoudre certains éléments en suspension et modifier les résultats des concentrations en éléments dissous, de là l'importance de la filtration sur place.

Seulement les portions d'échantillons destinées à l'analyse des métaux, des nutriments (azote ammoniacal et phosphore total inorganique), du CID, COD et azote total ainsi que des isotopes du nitrate seront filtrées à 0.45 μm sur le terrain. Les filtres utilisés sont faits de cellulose ou de fibre de verre tels qu'illustrés à la figure B.2. Exceptionnellement, les filtres utilisés pour la filtration de l'échantillon destiné à l'analyse du CID, COD et de l'azote total doivent être absolument fait de fibre de verre. Si les eaux à échantillonner sont très turbides ou riches en particules, il sera préférable de filtrer l'ensemble du volume à prélever et d'en aviser le laboratoire.



Figure B.1: Combinaison filtre – seringue et filtre modèle FHT-45

Généralement, la combinaison d'un filtre de nitrocellulose de 0,45 micron vissé à l'extrémité d'une seringue de 60 ml en polyéthylène est utilisée pour la filtration (figure B.2). Dépendamment du volume à filtrer et de la densité de particules, la filtration avec ce système peut s'avérer longue et fastidieuse. Pour filtrer des volumes importants d'eau contenant beaucoup de particules et pour diminuer le temps de filtration, le filtre « Inline Disposable 0,45 Micron Filter Model FHT-45 » (figure B.2) s'avère très utile, car il peut se connecter directement à la sortie de l'eau souterraine.

Les filtres possèdent un sens d'utilisation : une entrée et une sortie. Les inscriptions sur le filtre indiquent quelle extrémité doit être connectée à la seringue ou au boyau selon le cas. La filtration préalable de 1 à 5 ml de l'eau à échantillonner est d'abord recommandée pour rincer le filtre (20 à 30 ml pour le filtre FHT-45) avant de commencer à utiliser l'eau filtrée pour le remplissage des bouteilles.

Pour vérifier l'impact des filtres sur les concentrations en métaux et nutriments, 2 filtres (non utilisés) de chaque lot utilisé pour la filtration seront envoyés au laboratoire en même temps que l'expédition des échantillons. Les filtres doivent être ensachés de façon à les séparer des échantillons.

Remplissage des bouteilles

Un échantillon sera composé de neuf types de bouteilles : quatre avec agent de conservation (métaux, nutriments, sulfures, ^{13}C et ^{14}C) et cinq sans agent de conservation (anions, CID/COD, $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, tritium et $\delta^{15}\text{N}$). Étant donné que les agents de conservation constituent des contaminants potentiels, il est préférable de remplir les bouteilles sans agent de conservation en premier pour diminuer les risques de contamination, suivant l'ordre de remplissage recommandé par le tableau 1.1. De plus, pour les bouteilles avec agent de conservation, il est recommandé de suivre un ordre préétabli de remplissage pour aussi diminuer le risque de contamination croisée. Par exemple, la bouteille des sulfures qui contient de l'acétate de zinc devrait être remplie après celle pour l'analyse des métaux pour éviter le risque de contamination au niveau du zinc. L'ordre de remplissage est indiqué à la première colonne du tableau 1.1.

Lors du remplissage, il est très important d'éviter de toucher les filets du col de la bouteille et l'intérieur du bouchon. Advenant le cas où il y aurait contact entre les gants et l'agent de conservation, vous pouvez rincer amplement les gants avec de l'eau à échantillonner ou de l'eau déminéralisée. Ensuite, secouez pour enlever le surplus d'eau à la surface des gants. Il n'est pas recommandé d'essuyer les gants pour éviter le transfert de contaminants. Toutefois, pour simplifier, il est fortement recommandé de changer de gants.

Bouteilles sans agent de conservation

Remplir complètement (à rebord sans espace d'air le plus possible) la bouteille qui ne contient pas d'agent de conservation après l'avoir rincée avec l'eau à échantillonner. Ceci est pour restreindre le dégazage potentiel du $\text{CO}_2(\text{g})$ qui aurait comme conséquence d'influencer l'alcalinité totale.

Les bouteilles pour les analyses isotopiques du $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (60 ml) et ^3H (1L) doivent être remplies complètement, sans présence d'air, pour éviter tout échange isotopique entre l'eau et l'air. Ces bouteilles peuvent être remplies directement au robinet. Par contre, il est très difficile de remplir ces bouteilles sans présence d'air par cette méthode. C'est pourquoi une méthode simple de remplissage employée par la « *United States Geological Survey* » (USGS) pour l'analyse des chlorofluorocarbones (CFC) dans les eaux souterraines est recommandée, mieux connue sous le nom de « méthode de la chaudière ». Cette technique consiste à placer la bouteille dans un contenant propre assez volumineux pour permettre de la noyer complètement sous un niveau d'eau. Le remplissage s'effectue en introduisant jusqu'au fond de la bouteille un tuyau (plastique, vinyle, silicone, etc.) non réactif raccordé à la sortie de l'eau souterraine (le tuyau doit être le plus court possible). L'eau circule en premier à travers la bouteille pour ensuite remplir le contenant jusqu'à rebord pour permettre de noyer la bouteille. Laissez déborder un peu d'eau du contenant utilisé. Le bouchon est ensuite vissé fermement sous le niveau de l'eau. Une vérification de la présence d'air dans la bouteille doit être faite. Si de l'air est présent, il est conseillé de vider le contenant et de refaire toutes les étapes. La base du bouchon est ensuite enrobée de ruban adhésif pour électricien afin d'assurer l'étanchéité et éviter les échanges avec l'air extérieur.

Bouteilles avec agent de conservation

Remplir les bouteilles qui contiennent un agent de conservation jusqu'au col (début des filets), sans rincer la bouteille afin de conserver l'agent de conservation. Ne pas laisser déborder pour ne pas perdre l'agent de conservation. Remplissez dans l'ordre la bouteille pour les isotopes du nitrate ($\delta^{15}\text{N}$) qui ne contient aucun agent de conservation, ensuite pour les nutriments (filtration: azote ammoniacal, phosphore total inorganique) qui contient du H_2SO_4 , ensuite la bouteille pour

les métaux (filtration) qui contient du HNO_3 suivie par la bouteille pour les sulfures (sans filtration).

Remplissez la bouteille pour ^{13}C et ^{14}C en dernier. Elle doit être remplie sans espace d'air le plus possible. Étant donné la présence de l'agent de conservation NaN_3 , cette bouteille ne peut pas être remplie selon la méthode de la chaudière. Elle doit être remplie directement au robinet. Étant la dernière bouteille à remplir, prenez votre temps. N'oubliez pas de consulter la fiche signalétique de ce produit. Il s'agit d'un produit dangereux.

B.4 CONSERVATION ET EXPÉDITIONS DES ÉCHANTILLONS

Étiquetage

Les étiquettes seront présentes sur les contenants pour l'analyse des anions, des métaux, des nutriments et des sulfures. Noter sur les étiquettes, préférablement avant l'échantillonnage, le nom de l'échantillon (valider avec le chargé de projet), la date et l'heure de la prise de l'échantillon ainsi que les initiales de l'équipe d'échantillonnage pour suivi ultérieur. S'il y a eu filtration pour les autres paramètres autres que métaux et nutriments, indiquez-le. Par défaut, métaux et nutriments sont filtrés. Indiquer sur les bouchons de chaque contenant le numéro de l'échantillon.

Pour isotopes et datations, étiqueter les bouteilles avant ou après l'échantillonnage selon la méthode qui aura été utilisée. Indiquez sur les étiquettes et les bouchons, les mêmes informations que mentionnées précédemment. N'oubliez pas d'indiquer la présence du sodium azide (NaN_3) comme agent de conservation pour la bouteille du ^{13}C et ^{14}C . Il est préférable d'utiliser des étiquettes plastifiées (imperméables) s'il le laboratoire ne les fournit pas. Écrire les informations avec des crayons à encre indélébile.

Conservation et expéditions des échantillons

Tous les échantillons d'eau doivent être conservés à 4 °C et à l'obscurité jusqu'à leur analyse. Si les échantillons sont conservés plus d'une journée (c'est le cas pour les isotopes et datations), conservez au réfrigérateur ou dans une chambre froide. Utilisez des « ice-packs » pour de courts délais. Séparez les bouteilles qui seront expédiées chez Maxxam (anions, nutriments, métaux, sulfures) de celles qui seront expédiées dans d'autres laboratoires pour les analyses des isotopes stables et des datations. Il est conseillé de regrouper les bouteilles qui composent un échantillon (anions, nutriments, métaux, sulfures) dans un sac de plastique pour l'expédition au laboratoire. Ceci facilite la vérification interne et la manutention des échantillons tout en protégeant les étiquettes de l'humidité si de la glace est utilisée pour l'expédition vers le laboratoire.

Remplir le formulaire de demande d'analyse (généralement fourni par le laboratoire). Il peut être important de noter les mesures de terrain telles que la conductivité et le pH ainsi des commentaires pour des échantillons très particuliers (ex: eau très saline ; eau chargée en particule). Le chimiste responsable des analyses apprécie ces commentaires qui lui permettent de traiter différemment les échantillons ou de les analyser dans un ordre différent. Prendre soin de bien emballer chacune des bouteilles à l'intérieure de la glacière de façon à empêcher qu'elles ne se fracassent les unes sur les autres. Sceller également les glacières afin d'éviter qu'elles ne s'ouvrent lors du transport. Vérifier que le nombre de bouteilles est exact.

BIBLIOGRAPHIE

Bourque, E., Cloutier, V., 2001. Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine : caractérisation hydrogéochimique régionale. 36 p.

Blanchette, D., Roy, N., 2004. Protocole d'échantillonnage de la caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay. 7 p. + annexes.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, août 2008.
Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 83 p.

USGS, 2009. CFC Sampling Method – Bottle. US Department of the interior.

URL: <http://water.usgs.gov/lab/chlorofluorocarbons/sampling/bottles/>

Page Last Modified: Friday, 27-Nov-2009.

ANNEXE C

*PROTOCOLE DE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS D'EAUX INTERSTITIELLES DES ARGILES
MARINES DE LA MONTÉRÉGIE EST*

Inspiré de Cloutier (2004)

C.1 EXTRACTION ET ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU INTERSTITIELLE DES ARGILES

Les travaux d'extraction de l'eau interstitielle des argiles marines ont été réalisés du 8 au 11 août 2011 dans le laboratoire et avec les équipements du Dr Jacques Locat du département de Géologie et de Génie géologique de l'Université Laval, Québec. Les manipulations ont été réalisées conformément au protocole proposé par Cloutier (2004) et aux recommandations de Mme Ariane Locat, étudiante au doctorat avec le professeur Locat.

Description des échantillons

Les échantillons d'argile choisis pour l'extraction ont été prélevés au droit des forages RS01 (Ste-Victoire-de-Sorel) et RS02 (St-Charles-sur-le-Richelieu) tel qu'indiqué à la figure C.1. Il s'agit de forages de 4 pouces de diamètres (10.2 cm) pour lesquels l'échantillonnage des sols a été réalisé en continu. Les « carottes » récupérées lors des travaux de forage ont été systématiquement enrobées de plastique et mises dans des boîtes longitudinales en bois. Le plastique a ainsi permis une meilleure conservation de l'humidité de l'échantillon.

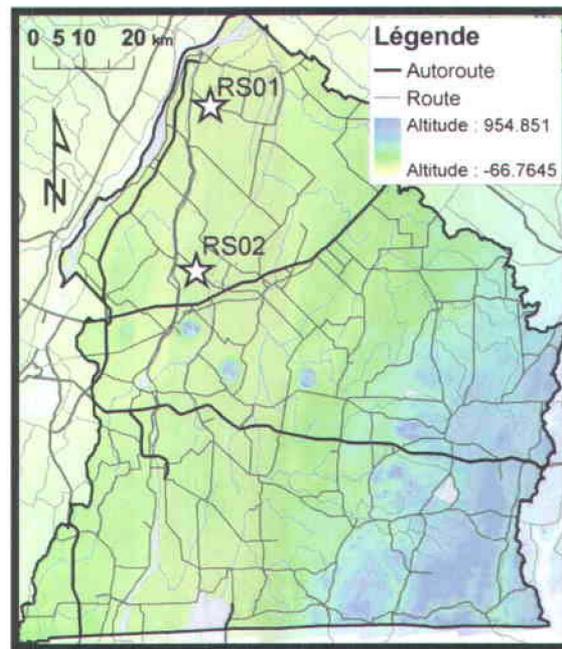


Figure C.1: Localisation des forages RS01 et RS02 sur fond topographique.

Pour les fins du projet PACES, les sols extraits de chacun des forages ont été numérisés par imagerie médicale (scanographie à rayon X). La composition a également été analysée par fluorescence à rayon X. Des analyses granulométriques ont également été réalisées sur une sélection d'échantillons.

À l'aide des résultats préliminaires obtenus de la scanographie et de l'analyse par fluorescence, 5 sections argileuses d'intérêt ont été identifiées par Jean-Marc Ballard et René Lefebvre sur les forages RS01 et RS02. Les sections ont été coupées sur une longueur de 30,5 cm. Trois échantillons proviennent du forage RS01, à des profondeurs de 49, 59 et 75 pieds (14,9 m, 18,0 m et 22,9 m respectivement) et deux échantillons proviennent du forage RS02, à des profondeurs de 32 et 54 pieds (9,8 m et 16,5 m respectivement). L'intervalle de profondeur d'où provient l'échantillon débute à la mesure désignant le nom de l'échantillon (en pied) et se terminant 1 pied plus bas. Le tableau C.1 décrit les cinq échantillons sélectionnés.

Tableau C.1: Provenance des échantillons étudiés.

Nom de l'échantillon	Forage	Intervalle de profondeur
RS01-49'	RS01	14,9 à 15,2 m
RS01-59'	RS01	18,0 à 18,3 m
RS01-75'	RS01	22,9 à 23,16 m
RS02-32'	RS02	9,8 à 10,1 m
RS02-54'	RS02	15,5 à 16,8 m

Étapes de l'extraction

Le montage d'extraction à air comprimé qui a été utilisé est montré à la figure C.2. Il est important de mentionner qu'afin de minimiser les risques de contamination, tous les instruments et équipements en contact avec les échantillons d'argile et/ou d'eau doivent être lavés entre chaque manipulation à l'aide d'eau et de savon, puis rincés abondamment à l'eau déminéralisée. Le port de gants jetables en latex ou en vinyle est nécessaire pour les manipulations. Une nouvelle paire de gants est requise pour chaque échantillon. Un environnement de travail propre contribue à minimiser la contamination.

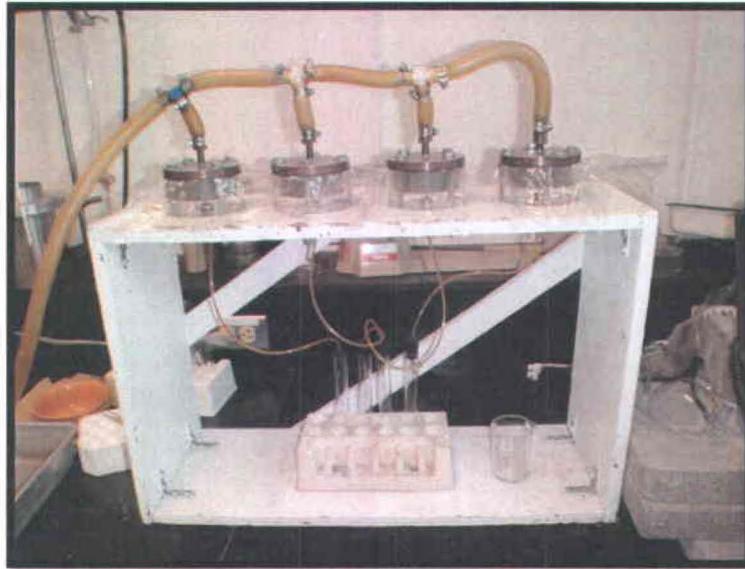


Figure C.2: Montage utilise pour l'extraction de l'eau interstitielle de l'argile.

Voici les étapes à suivre :

Préparation des équipements

- Noter le numéro d'échantillon, la date d'extraction, la personne faisant les manipulations, la durée de l'extraction, les bouteilles remplies ainsi que les caractéristiques spéciales du sol, s'il y a lieu ;
- Installer les 4 cellules en plexiglas à l'endroit qui leur est désigné, soit sur le dessus du support en bois. Chaque cellule comporte un petit tuyau vissé qui permet l'évacuation de l'eau extraite. S'assurer que ces tuyaux sont fermement vissés à la cellule ;
- Découper 4 filtres de type Whatman 40 et les placer au fond de chacune des cellules afin d'éviter le colmatage du tuyau ;

Manipulation de l'échantillon

- Sortir l'échantillon du réfrigérateur ;
- À l'aide d'une spatule propre, enlever la couche extérieure d'argile ayant été altérée et remaniée lors du forage, du transport et du stockage ;
- Découper l'argile en morceaux et en placer dans les quatre cellules de plexiglas à l'aide d'un pilon propre, de façon à complètement remplir complètement les compartiments ;

- Prélever et mettre de côté une part de l'argile qui servira à mesurer la teneur en eau avant extraction (20 à 30 g suffisent), déposer dans un contenant d'aluminium identifié et préalablement pesé, peser, noter et mettre à l'étuve (125°C) ;
- Placer une pellicule moulante (« Saran Wrap ») au-dessus des 4 cellules, déposer les disques de polymère au-dessus de l'échantillon ainsi que les beignes de caoutchouc et les couvercles métalliques ;
- Percer préalablement la pellicule moulante aux endroits où les boulons passeront ;
- Visser fermement le montage (16 boulons et écrous) sans oublier d'installer les plaques métalliques en dessous ;
- Démarrer tranquillement l'air comprimé en vérifiant qu'il n'y a aucune fuite. S'il n'y a pas de fuite, augmentez le débit d'air au maximum. S'il y a une fuite, un son strident se fera entendre : recommencez alors l'étape précédente ;
- Placer les quatre tubes flexibles (constituant l'exutoire) dans un bécher afin de recueillir et éliminer les 3 premières gouttes recueillies de chacun des tubes (eau résiduelle de rinçage). Par la suite, insérer les 4 petits tuyaux dans 4 éprouvettes. Chaque éprouvette est fermée par un bouchon de caoutchouc. Ce dernier possède une ouverture pour y passer le tuyau ;
- Laisser l'essai se dérouler sur une période d'environ 2-3 heures. Au-delà de ce temps, la quantité d'eau extraite est minime. Il devient donc inutile de continuer. (Note : Si la quantité d'eau recueillie est insuffisante, il est préférable de répéter la procédure à nouveau avec un nouvel échantillon d'argile) ;
- Une fois l'extraction complétée, arrêter l'air comprimé et verser le contenu des quatre éprouvettes dans la seringue de 60cc. Noter la quantité d'eau totale récoltée ;
- Remplir les bouteilles conformément aux directives d'échantillonnage de l'eau (voir section suivante). Réfrigérer les bouteilles immédiatement (à 4°C) ;
- Déboulonner le montage. Nettoyer.

Teneur en eau

- Prendre une part de l'argile ayant été comprimée et réserver pour une teneur en eau après extraction (20 à 30 g suffisent), déposer dans un contenant d'aluminium identifié et préalablement pesé, peser et mettre à l'étuve (125°C) ;
- Les échantillons d'argile placés à l'étuve devront y être laissés pour séchage pendant une nuit, puis pesés à nouveau afin de compléter les calculs de teneur en eau.

Échantillonnage de l'eau

Le tableau C.2 résume les informations quant aux paramètres analysés sur les échantillons d'eau, les types de bouteilles utilisées ainsi que les instructions requises pour le prélèvement des échantillons d'eau après l'extraction.

Tableau C.2: Instructions d'échantillonnage de l'eau interstitielle après extraction.

Paramètres	Laboratoire analytique	Bouteille	Instructions
Cations : Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Sr ²⁺	INRS-ETE	1 x 30 ml polyéthylène (Nalgene)	Acidifier avec HNO ₃ (5 gouttes pour 20 ml d'eau). Filtrer à 0,45 µm et réfrigérer. Minimum 15 ml.
Anions : Cl ⁻ , SO ₄ ⁻ , Alcalinité, pH, conductivité	INRS-ETE	1 x 15 ml polyéthylène (Sarstedt)	Remplir sans air, réfrigérer.
Isotopes stables : δ ¹⁸ O et δ ² H	Delta Lab - CGC	3 x 5 ml verre transparent	Remplir sans air. Sceller à l'aide d'un ruban adhésif. Réfrigérer. Minimum 2 bouteilles.

C.2 TENEURS EN EAU

L'objectif est de comparer la teneur en eau d'un échantillon intact (ω_0) avec la teneur en eau d'un échantillon ayant été compressé dans l'extracteur (ω_{extract}). Un morceau d'argile de masse M_0 est donc prélevé avant extraction au milieu de la carotte (puisque l'on suppose que la teneur en eau sur les parois de la carotte a été perturbée lors du forage et de l'entreposage), est pesé et mis à l'étuve à 120°C pendant une nuit. La quantité prélevée n'a pas d'importance puisque c'est la variation de masse de ce même échantillon qui nous intéresse.

- Une fois l'échantillon séché, peser (M_{SEC}) ;
- Appliquer la même procédure à l'échantillon ayant été compressé dans l'extracteur ;
- Comparer les deux teneurs en eau afin d'obtenir la variation $\Delta\omega$.

La teneur en eau se calcul ainsi:

$$\omega = [(M_0 - M_C) - (M_{\text{Sec}} - M_C) / (M_{\text{Sec}} - M_C)] \times 100$$

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{\text{extract}}$$

C.3 COMPTE RENDU DES EXTRACTIONS

Les tableaux suivants regroupent les informations recueillies lors des manipulations en laboratoire réalisées du 8 au 11 août 2011. Le tableau C.3 porte sur la réalisation des extractions et le tableau C.4 résume les mesures et calculs de teneur en eau de l'argile.

Tableau C.3: Suivi des extractions réalisées au laboratoire du 8 au 11 août 2011.

Extraction	Échantillon	Date et heure	Qté d'eau extraite	Bouteilles remplies	Remarques
1	RS01 49'	2011-08-08 13:30 à 16:30	15 ml	5 ml isotopes 10 ml cations	La 1re heure n'a pas été réalisée à pression maximale.
2	RS01 49'	2011-08-09 8:45 à 10:45	25 ml	5 ml isotopes 15 ml anions 5 ml cations	
4	RS01 49'	2011-08-09 10:00 à 10:30	10 ml	5 ml cations 5 ml isotopes	
5	RS01 59'	2011-08-09 11:40 à 13:10	22 ml	15 ml anions 7 ml isotopes	
6	RS01 59'	2011-08-09 13:45 à 15:05	21 ml	3 ml isotopes 18 ml cations	
7	RS01 75'	2011/08/09 15:35 à 17:05	19 ml	10 ml isotopes 9 ml anions	4 ml renversés.
8	RS01 75'	2011/08/10 9:55 à 11:30	23 ml	19 ml cations 4 ml anions	
9	RS02 32'	2011/08/10 12:30 à 14:16	20 ml	20 ml cations	
10	RS02 32'	2011/08/10 18:00	25 ml	15 ml anions 10 ml isotopes	
11	RS02 54'	2011-08-11 10:15 à 12:00	19 ml	15 ml anions 4 ml isotopes	2ml renversés.
12	RS02 54'	2011-08-11 12:40 à 13:55	23 ml	6 ml isotopes 17 ml cations	

Tableau C.4: Calcul de la teneur en eau pour chacun des échantillons d'argile utilisés pour l'extraction.

Échantillon	$\Delta\omega$ (%)	Argile avant extraction				Argile après extraction			
		M_C (g)	M_0 (g)	M_{Sec} (g)	ω_0 (%)	M_C (g)	M_0 (g)	M_{Sec} (g)	$\omega_{extract}$ (%)
RS01 49' (extract. 1)	6,98	1,00	28,15 11/08/08 16:30	18,46 11/08/09 9:10	55,50	1,00	22,12 11/08/08 16:30	15,22 11/08/09 9:10	48,52
RS01 59' (extract. 1)	15,51	1,00	24,50 11/08/09 11:30	15,64 11/08/10 10:05	60,30	1,01	20,18 11/08/09 13 :10	14,25 11/08/10 10:05	44,79
RS01 75' (extract. 1)	11,58	1,00	20,24 (2011-08-09 15:00)	13,20 (2011/08/10 10:05)	57,71	1,00	23,84 (2011/08/10 9:30)	16,63 11-08-11 10:45	46,13
RS02 32' (extract. 1)	6,97	1,00	34,09 (2011-08-10 12:00)	23,28 (2011-08-11 10:45)	48,52	1,01	20,53 14 :30	14,80 11-08-11 10:45	41,55
RS02 54' (extract. 1)	7,83	1,01	14,27 11-08-11 10:00	10,12 11-08-11 14 :40	45,55	1,01	18,79 11-08-11 12 :00	13,92 11-08-11 14 :40	37,72

M_C : Masse du contenant.

M_0 : Masse initiale de l'échantillon.

M_{SEC} : Masse sèche (étuvée).

ω_0 : Masse volumique avant l'extraction.

$\omega_{extract}$: Masse volumique après l'extraction.

$\Delta\omega$: Variation de masse due à l'extraction.

ANNEXE D

PROTOCOLE DE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS D'EAUX DE PRÉCIPITATIONS

Réalisé en collaboration avec Rachel Thériault

D.1 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DES RÉCEPTEURS DE PRÉCIPITATIONS LIQUIDES

Fréquence des prélèvements : le dernier jour de chaque mois.

Matériel nécessaire :

- 2 bouteilles de 60 ml (HDPE avec petit goulot)
- Gants de latex
- Ruban adhésif noir électrique.

1. Sous le robinet du pluviomètre, rincer les deux bouteilles de 60 ml de 2 ou 3 fois avec une petite quantité d'eau de précipitations;
2. Remplir les bouteilles de 60 ml jusqu'au bord, en prenant soin de ne pas laisser de bulle d'air à l'intérieur;
3. Refermer fermement chacune des bouteilles et sceller les bouchons à l'aide du ruban adhésif noir pour éviter tout échange avec l'atmosphère;
4. Laisser s'écouler par terre l'eau résiduelle du récepteur. Laisser une petite quantité d'huile s'écouler pour être bien sûr qu'il ne reste plus d'eau du mois en cours;
5. Sur les bouteilles de 60 ml, noter le contenu de la bouteille, l'endroit de l'échantillonnage ainsi que la date et vos initiales. Par exemple :

Précipitations Granby
31/10/10
R.T.

6. Conserver les bouteilles au réfrigérateur.

D.2 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES (NEIGE)

Fréquence des prélèvements : une collecte à chaque épisode de précipitations et récupération de l'échantillon global le dernier jour de chaque mois.

Matériel :

- 2 bouteilles de 60 ml (HDPE avec petit goulot)
 - Ruban adhésif électrique noir
 - Gants de latex
 - Seringue de 60 ml et tube flexible
 - Bouteille de 1L en plastique (HDPE) contenant de l'huile de paraffine
1. À la fin de chaque épisode de précipitations (neige, pluie ou grésil) entrer l'échantillonneur à l'intérieur pour laisser fondre la neige. Note : en période hivernale, il n'y a pas d'huile de paraffine dans le réceptacle du pluviomètre;
 2. Une fois la neige fondue, verser l'eau de précipitations dans la bouteille de 1L contenant l'huile de paraffine. À la fin du mois, cette même bouteille contiendra un mélange de toutes les précipitations recueillies. Conserver cette bouteille au réfrigérateur en tout temps;
 3. À la fin du mois, prélever l'eau contenue dans la bouteille de 1L à l'aide de la seringue et du tube flexible afin de remplir 2 bouteilles de 60 ml. Pour ce faire, plonger le tube sous la couche d'huile et remplir la seringue. Transvider le contenu dans les petites bouteilles (suivre les mêmes consignes que pour la pluie : rincer, remplir sans air et sceller avec du ruban adhésif noir);
 4. Noter sur les 2 bouteilles de 60 ml le contenu, l'endroit, la date et vos initiales;
 5. Garder les bouteilles de 60ml au réfrigérateur;
 6. Jeter l'eau résiduelle de la bouteille de 1L en aspirant avec la seringue;
 7. Recommencer le mois suivant.

ANNEXE E

ANALYSES EN LABORATOIRE : LABORATOIRES, MÉTHODES ET RÉSULTATS

E.1 LABORATOIRES

Voici la liste des laboratoires impliqués dans l'analyse des différents échantillons prélevés tout au long du PACES Montérégie Est :

Maxxam

889, montée de Liesse
Ville Saint-Laurent (Québec) H4T 1P5
Téléphone : 1-877-462-9926

Paramètres analysés : Chimique inorganique.

Beta Analytic

4985 SW 74th Court
Miami (Florida) 33155
USA
Téléphone : 305-667-5167

Paramètre analysé : Carbone 14

Delta-Lab, CGC Québec

Ressources naturelles Canada
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9
Téléphone : 418-654-2604
Contact : Martine Savard

Paramètres analysés : Isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$.

INRS-ETE

490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9
Téléphone : 418-654-4677
Contact : Stefane Prémont

Paramètres analysés : CID/COD/ N_{total} et chimiques inorganiques (pour eau interstitielle des argiles).

Environmental Isotope Laboratory

University of Waterloo
200 University Avenue West
Waterloo (Ontario) N2L 3G1
Téléphone: 1-519-888-4567 ext. 35838
Contact: A. Richard Heemskerk

Paramètre analysé : Tritium.

E.2 MÉTHODES ANALYTIQUES

Le tableau E.1 dresse la liste des paramètres chimiques analysés et des méthodes employées par chacun des laboratoires.

Tableau E.1 : Méthodes analytiques de référence pour chacun des paramètres standards.

Paramètres	Méthode de référence	Description de la méthode	Laboratoire
Alcalinité totale	MA. 315- Alc-Aci 1.0 / SM 2320 B-Titration	Méthode par titration. Exprimé en CaCO_3 , pH final 4.5.	Maxxam
Anions : Chlorures (Cl^-), bromures (Br^-), Nitrites et nitrates (NO_2^- et NO_3^-), sulfates (SO_4^{2-})	MA. 300 – Ions 1.2 / 1.3	Dosage par chromatographie ionique avec détecteur conductivimétrique	Maxxam
Fluorures (F)	SM 4500-F- C.	Méthode par électrode sélective	Maxxam
Métaux : Al, Sb, Ag, As, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Na, Zn, B, Fe, Mg, Li, K, Se, Sr, Sn, Ti, V, Be, Bi, Ca, Si (soluble dans HNO_3), Pb, U	MA. 200-Mét 1.2	Méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon	Maxxam
Azote ammoniacal (N-NH_3)	MA. 300-N 1.1	Méthode colorimétrique automatisée avec le salicylate de sodium	Maxxam
Phosphore inorganique	MA. 300-P.Ino 1.1	Méthode colorimétrique automatisée avec le molybdate d'ammonium	Maxxam
Anions sulfures (S^{2-})	MA. 300-S 1.1	méthode colorimétrique avec le chlorure ferrique et l'oxalate du diméthyle-p-phénylène diamine	Maxxam
Carbone organique total (COT)	NA	NPOC courbe 0-50 mg/L	INRS-ETE
Carbone inorganique total (CIT)	NA	IC courbe 0-5 mg/L	INRS-ETE
Azote total (N_{tot}) (comprend les nitrates, les nitrites, l'azote ammoniacal et l'azote lié à la matière organique)	NA	NPOC courbe 0-50 mg/L	INRS-ETE

SM : Standard Method, publié par American Public Health Association.

MA : Méthode d'analyse approuvée par le Centre d'expertise environnementale du Québec.

Le tableau E.2 dresse la liste des paramètres isotopiques analysés et des méthodes employées par chacun des laboratoires.

Tableau E.2 : Méthodes analytiques de référence pour chacun des paramètres isotopiques.

Paramètres	Méthode de référence	Description de la méthode	Laboratoire
Isotopes stables de l'eau : $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$	<i>IMS : Isotope mass spectrometry</i> – spectrométrie de masse isotopique		Delta Lab / CGC Québec
Isotope radioactif : Tritium enrichi (^3H)	<i>IMS : Isotope mass spectrometry</i> – spectrométrie de masse isotopique	Spectrométrie de masse isotopique. Distillation azéotropique requise pour les échantillons dont la conductivité électrique est > 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.	EILab – Université de Waterloo
Isotope radioactif : Carbone 14 (^{14}C et $\delta^{13}\text{C}$)	<i>AMS : Accelerator mass spectrometry</i> – Spectrométrie de masse par accélérateur.	Le résultat est transmis sous forme d'âge apparent en années.	Beta Analytic

SM : Standard Method, publié par American Public Health Association.

MA : Méthode d'analyse approuvée par le Centre d'expertise environnementale du Québec.

E.3 RÉSULTATS ANALYTIQUES BRUTES

Tableau E.3 : Paramètres *In Situ* et classification

- Définition des groupes :

1 →	M1
2 →	M2
3 →	M3
4 →	MC / CS
5 →	BT / LL
6 →	A1
7 →	A2
8 →	A3

Tableau E.4 : Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Tableau E.5 : Indices de saturation (SI)

Tableau E.3: Paramètres *in situ* et classification

Échantillon	X m	Y m	Aquif.	T °C	pH	CE uS/cm	OD mg/L	Redox mV	Eh mV	Dureté mg/L	MDT mg/L	EN %	TE	Groupe
INRS101	629625	5017039	Roc	10,4	7,47	543	0,16	-85	165	--	--	22,4	--	5
INRS102	690479	5067740	Roc	9,8	7,96	174	0,27	-102	149	65,15	246,90	1,0	Na-HCO ₃	8
INRS103	681597	5066091	Roc	10,2	6,93	627	0,43	-51	199	481,35	947,66	-3,9	Ca-HCO ₃	5
INRS105	663442	5026780	Roc	11,1	7,44	380	0,31	33	282	300,07	441,93	11,8	Ca-HCO ₃	5
INRS106	670667	5039112	Roc	10,1	8,73	226	0,35	-187	64	50,63	318,70	-4,4	Na-HCO ₃	7
INRS107	677604	5034806	Roc	9,9	8,15	511	0,43	-75	176	51,06	732,90	-1,8	Na-HCO ₃	7
INRS108	673216	5028933	Roc	13,6	6,10	267	6,63	271	517	82,68	253,97	-0,2	Na-Cl	6
INRS109	674676	5023388	Roc	9,9	8,08	275	0,35	-169	82	95,29	323,99	-1,9	Na-HCO ₃	8
INRS110	658178	5013338	Roc	9,8	7,11	275	2,13	-70	181	158,64	340,10	-4,3	Ca-HCO ₃	5
INRS111	661568	5021240	Roc	9,3	7,31	617	0,55	-69	182	341,51	797,52	-3,7	Mix-HCO ₃	5
INRS112	670890	5016053	Roc	9,8	8,22	332	6,01	219	470	67,62	365,74	-2,8	Na-HCO ₃	7
INRS113	635938	5025777	Roc	9,5	8,79	722	0,20	-81	170	12,99	1118,00	-2,5	Na-HCO ₃	3
INRS114	627696	5025548	Roc	10,1	8,58	1125	0,04	-204	47	21,02	1513,72	-5,7	Na-HCO ₃	3
INRS115	674983	5010334	Roc	9,8	7,53	165	0,23	108	359	75,26	301,77	-13,9	Na-HCO ₃	7
INRS116	676615	5015845	Roc	10,5	7,67	181	0,29	-242	8	43,14	334,46	-14,7	Na-HCO ₃	7
INRS117	669356	5012273	Roc	10,9	7,50	295	0,53	91	340	9,37	400,86	-7,5	Na-HCO ₃	7
INRS118	668086	5019888	Roc	14,0	7,55	492	3,12	242	487	--	--	-23,0	--	7
INRS119	684210	5036709	Roc	12,7	7,44	232	2,03	187	434	--	--	-18,6	--	8
INRS120	689630	5034367	Roc	9,6	7,26	113	0,34	-118	133	101,16	205,54	-1,5	Ca-HCO ₃	8
INRS121	690361	5026950	Roc	8,8	5,87	520	6,12	46	298	--	--	-21,4	--	6
INRS122	683818	5027697	Roc	8,9	7,31	263	0,27	-137	115	220,04	463,30	-5,2	Mg-HCO ₃	5
INRS123	659809	4997091	Roc	10,1	7,63	486	0,22	147	398	82,75	614,22	-10,6	Na-HCO ₃	7
INRS124	658398	4987758	Séd	12,2	7,50	287	1,14	107	354	--	--	-16,6	--	6
INRS125	671561	4990508	Roc	10,2	7,36	163	3,21	-22	228	71,35	213,19	-3,1	Mix-HCO ₃	7
INRS126	671584	4992679	Roc	10,0	7,35	129	0,36	-45	206	35,70	203,84	-4,0	Na-HCO ₃	7
INRS127	669015	5073174	Roc	10,4	6,96	2763	4,21	-49	201	796,40	3158,26	-5,3	Na-Cl	5
INRS128	670423	5079248	Roc	10,0	7,98	1844	0,41	-154	96	84,37	2603,73	-10,1	Na-Cl	3
INRS129	657470	5047568	Roc	12,7	7,75	1523	0,17	-61	186	65,27	1488,31	-2,2	Na-Cl	3
INRS130	661221	5058403	Roc	10,3	7,82	566	0,29	-32	218	74,38	749,93	-6,0	Na-HCO ₃	3
INRS131	662069	5062004	Roc	10,2	7,69	392	0,19	-100	150	161,12	508,10	-3,3	Mix-HCO ₃	2
INRS132	674845	5086678	Roc	10,3	7,26	390	0,61	-55	195	73,36	319,19	-5,2	Na-HCO ₃	2
INRS133	677476	5090442	Roc	9,2	7,37	1573	0,34	-47	205	70,34	1189,57	-5,1	Na-HCO ₃	3
INRS134	614237	4989013	Roc	9,4	6,93	686	0,31	51	302	276,59	546,00	-4,3	Ca-HCO ₃	5
INRS135	615171	4995797	Roc	9,6	7,23	547	0,24	-31	220	234,27	469,73	-3,5	ALK-HCO ₃	5
INRS136	617613	4993084	Roc	9,1	7,38	587	0,22	-59	193	181,36	494,06	-3,6	Mix-HCO ₃	5
INRS137	621378	4989288	Roc	9,7	6,85	1494	0,21	-68	183	671,55	1150,47	-4,2	Ca-HCO ₃	5
INRS138	680709	5023739	Roc	11,2	7,00	623	4,28	147	396	266,65	507,67	-4,5	Ca-HCO ₃	8
INRS139	691051	5025076	Roc	9,2	6,96	478	0,32	-20	231	218,20	402,07	-0,6	Ca-HCO ₃	8
INRS140	692166	5018196	Roc	11,7	7,94	527	3,79	-105	143	179,74	386,98	-4,6	Mix-HCO ₃	8
INRS141	682963	5015441	Roc	14,6	7,56	356	0,26	-100	145	103,76	279,97	-5,0	Ca-HCO ₃	8
INRS142	694495	5015441	Roc	9,1	7,50	752	1,02	50	302	293,59	463,91	-5,7	Ca-Cl	6
INRS143	695545	5022975	Roc	10,0	7,87	402	0,79	-41	210	153,76	334,18	-2,1	Mg-HCO ₃	8
INRS144	697320	5030483	Roc	10,6	6,78	501	0,47	92	341	184,38	380,47	-2,7	Ca-HCO ₃	5
INRS145	650851	5029917	Roc	14,2	6,87	964	0,48	135	380	314,79	776,77	-5,0	Mix-HCO ₃	5
INRS146	639308	5029755	Roc	10,3	6,97	1300	0,33	-80	170	538,99	981,35	-2,3	Ca-HCO ₃	5
INRS147	693032	5035852	Roc	9,8	7,47	412	0,39	34	285	205,58	372,35	-3,2	Ca-HCO ₃	8
INRS148	696275	5045380	Roc	10,3	7,48	435	0,43	167	417	184,38	343,38	-4,7	Ca-HCO ₃	8
INRS149	687644	5049676	Roc	9,3	7,88	329	0,39	-140	111	124,06	277,63	-3,3	Mg-HCO ₃	8
INRS150	687713	5044277	Roc	9,5	7,22	371	0,33	339	591	141,08	313,22	-8,8	Ca-HCO ₃	8
INRS151	694322	5057706	Roc	10,4	5,99	215	3,92	327	577	77,33	133,62	9,7	Ca-HCO ₃	6
INRS152	700504	5057607	Roc	9,5	7,16	448	4,08	364	615	187,83	347,97	-4,7	Ca-HCO ₃	8
INRS153	702968	5061905	Roc	9,2	8,24	807	0,30	40	292	66,66	542,31	-4,2	Na-HCO ₃	7
INRS154	708596	4989381	Roc	9,8	7,95	517	0,14	277	528	150,04	391,55	-8,4	Mix-HCO ₃	8
INRS155	701680	4989830	Roc	10,7	6,96	779	0,34	-39	211	183,97	509,01	-12,1	Ca-HCO ₃	8
INRS156	708760	4993837	Roc	9,0	7,65	190	0,25	-127	125	84,50	164,59	-4,5	Ca-HCO ₃	8
INRS157	706177	4994669	Roc	9,5	7,02	375	2,95	64	315	169,51	308,14	-2,6	Ca-HCO ₃	6
INRS158	650970	5076282	Séd	17,3	7,13	213	5,39	121	362	75,16	146,61	-0,5	Ca-HCO ₃	6

Tableau E.3: Paramètres *in situ* et classification

Echantillon	X m	Y m	Aquif.	T °C	pH	CE uS/cm	OD mg/L	Redox mV	Eh mV	Dureté mg/L	MDT mg/L	EN %	TE	Groupe
INRS159	646678	5062643	Séd	13,8	6,61	1382	0,75	-51	195	468,47	1038,22	-2,2	Ca-HCO ₃	5
INRS160	689249	5010751	Roc	9,2	8,18	242	0,37	123	375	102,06	200,17	-5,4	Ca-HCO ₃	8
INRS161(X21)	643245	5026533	Séd	ND	ND	ND	ND	ND	ND	121,69	437,54	-1,8	Na-HCO ₃	2
INRS162	705918	5049091	Roc	9,0	8,15	316	0,31	-198	54	108,46	243,70	-4,1	Mix-HCO ₃	8
INRS163	712919	5049529	Roc	12,6	5,23	162	10,14	95	342	50,25	110,97	-1,8	Ca-HCO ₃	6
INRS164	705964	5046227	Roc	10,4	6,53	383	0,62	40	290	163,14	298,42	-1,9	Ca-HCO ₃	8
INRS165	712580	5042988	Roc	10,9	6,41	492	2,88	94	343	212,46	376,52	-1,2	Ca-HCO ₃	6
INRS166	714778	5045634	Roc	11,3	7,96	436	7,78	64	312	200,85	343,27	2,1	Ca-HCO ₃	8
INRS167	714913	5035605	Roc	9,0	5,70	142	9,86	338	590	66,30	113,14	-2,2	Ca-HCO ₃	6
INRS168	701757	5030985	Roc	8,6	6,27	250	6,54	80	333	107,24	189,38	-0,9	Ca-HCO ₃	6
INRS169	704591	5033960	Roc	9,9	7,48	333	0,26	-18	232	94,36	253,36	0,2	Na-HCO ₃	7
INRS170	710404	5035681	Séd	12,9	6,96	358	6,01	43	290	167,91	301,63	-1,4	Ca-HCO ₃	6
INRS171	713835	5029754	Roc	9,0	6,52	283	0,29	17	268	108,01	208,56	-2,8	Ca-HCO ₃	7
INRS172	705745	5017323	Roc	10,3	7,05	376	0,38	-68	182	160,65	275,17	0,0	Ca-HCO ₃	8
INRS173	709934	5014759	Roc	7,8	6,61	183	8,39	135	388	83,71	144,29	-0,2	Ca-HCO ₃	6
INRS174	711199	5021184	Roc	13,0	7,89	395	0,56	45	291	169,75	285,05	-0,4	Ca-HCO ₃	8
INRS175	706137	5022116	Roc	9,8	8,16	287	0,38	-187	64	120,07	238,86	-0,1	Ca-HCO ₃	8
INRS176	643712	5044336	Roc	10,3	7,64	335	0,41	48	298	56,01	282,99	-2,5	Na-HCO ₃	7
INRS177	633268	5040095	Roc	10,4	8,07	1195	0,31	33	283	15,48	1019,30	-5,9	Na-HCO ₃	3
INRS178	701672	5010294	Roc	9,6	7,24	258	0,28	-51	200	120,20	218,53	0,8	Ca-HCO ₃	8
INRS179	705372	5003231	Roc	16,1	4,66	ND	6,04	71	314	23,44	44,70	-3,4	Ca-HCO ₃	6
INRS180	696011	5008701	Roc	11,2	4,74	126	6,53	157	406	71,07	132,79	-2,3	Ca-HCO ₃	6
INRS181	625738	5050317	Roc	11,7	8,47	1177	0,27	-109	139	3,15	867,08	-2,7	Na-HCO ₃	1
INRS182	626545	5042447	Roc	9,5	7,56	3026	0,37	-276	-24	902,40	2435,37	2,9	Na-SO ₄	4
INRS183	626288	5059720	Roc	9,7	7,79	5794	0,50	-156	95	164,23	3458,30	5,5	Na-Cl	3
INRS184	644223	5047438	Roc	10,9	7,17	225	0,65	-12	237	25,54	188,38	1,4	Na-HCO ₃	7
INRS185	645631	5042360	Roc	10,3	7,85	1204	0,61	-165	85	43,30	926,02	1,1	Na-HCO ₃	1
INRS186	639450	5042145	Roc	11,9	7,42	860	4,45	-61	187	31,84	778,68	0,0	Na-HCO ₃	1
INRS187	632366	5050848	Roc	10,6	7,86	2000	0,77	-92	158	17,14	1106,04	0,5	Na-HCO ₃	3
INRS188	636618	5063865	Roc	10,4	7,60	5768	1,80	-13	237	158,14	3254,01	7,5	Na-Cl	3
INRS189	632945	5061359	Roc	9,1	8,00	1885	1,32	-41	211	26,81	1339,98	-0,4	Na-HCO ₃	3
INRS190	627296	5061743	Séd	18,0	6,99	1189	6,47	169	409	376,08	865,60	3,2	Mix-HCO ₃	2
INRS191	666115	5004267	Roc	9,9	7,25	545	0,79	49	299	234,80	415,54	0,0	Ca-HCO ₃	5
INRS192	653123	5005156	Roc	13,5	8,19	836	0,32	24	270	23,73	603,00	1,2	Na-HCO ₃	1
INRS193	658778	5029271	Roc	10,3	7,37	777	0,76	-19	231	187,84	657,86	-0,4	Na-HCO ₃	2
INRS194	678992	5024697	Roc	11,2	7,37	488	0,80	-71	178	199,84	365,16	0,0	Ca-HCO ₃	8
INRS195	682851	5025493	Roc	10,8	7,65	462	0,39	-71	179	96,86	383,60	-1,0	Na-HCO ₃	8
INRS196	685407	5024470	Roc	10,1	7,80	685	1,20	105	355	261,66	380,54	2,7	Ca-Cl	6
INRS197	679579	5061196	Roc	9,9	6,82	637	0,53	163	413	302,83	535,91	0,5	Ca-HCO ₃	5
INRS198	674899	5054465	Roc	9,4	7,69	648	2,57	-185	66	114,33	525,40	-0,3	Na-HCO ₃	2
INRS199	678453	5039290	Roc	11,7	7,24	568	3,90	12	260	280,49	473,38	1,4	Ca-HCO ₃	5
INRS201	680116	5083089	Roc	8,6	9,20	455	0,13	-26	227	9,33	484,37	-2,0	Na-HCO ₃	1
INRS202	683934	5078076	Roc	9,7	7,13	935	0,78	-42	209	527,17	799,98	12,0	Ca-MIXTE	5
INRS203	678581	5077463	Roc	9,9	8,05	405	0,25	36	286	139,04	470,52	5,0	Na-HCO ₃	5
INRS204	681886	5068951	Roc	10,8	6,91	647	0,62	40	290	--	--	27,2	--	5
INRS205	686703	5071098	Roc	9,4	7,91	341	0,53	-176	76	--	--	15,9	--	5
INRS206	676576	5073258	Roc	10,5	7,87	452	3,46	-154	96	174,00	677,42	1,0	Na-HCO ₃	2
INRS207	667537	5062655	Roc	10,0	8,46	293	1,18	6	256	49,73	425,06	-5,5	Na-HCO ₃	2
INRS208	673686	5059153	Roc	12,0	7,57	484	0,19	-107	141	365,26	640,76	-2,2	Ca-HCO ₃	5
INRS209	665672	5055916	Roc	10,1	7,14	552	0,47	-100	150	431,67	776,28	-2,2	Ca-HCO ₃	5
INRS210	669435	5045944	Roc	13,8	7,46	394	1,07	194	439	0,11	496,03	-2,9	Na-HCO ₃	1
INRS211	669346	5053290	Roc	10,6	8,62	719	0,17	-207	43	39,54	848,12	-6,6	Na-Cl	1
INRS212	676205	5049678	Roc	9,9	8,04	417	0,93	-134	116	105,13	481,70	-4,2	Na-HCO ₃	7
INRS213	681960	5046715	Roc	9,0	8,08	173	0,30	-114	138	119,33	243,52	-5,5	Ca-HCO ₃	8
INRS214	675096	5065215	Roc	9,2	8,26	1374	0,13	0	252	206,33	1296,26	-8,8	Na-Cl	3
INRS215	685462	5059941	Roc	9,8	8,00	279	4,49	-11	240	124,02	388,82	-5,0	Na-HCO ₃	5
INRS216	688290	5055130	Roc	12,8	8,65	549	0,77	118	364	27,39	636,21	-3,8	Na-HCO ₃	7

Tableau E.3: Paramètres *in situ* et classification

Échantillon	X m	Y m	Aquif.	T °C	pH	CE uS/cm	OD mg/L	Redox mV	Eh mV	Dureté mg/L	MDT mg/L	EN %	TE	Groupe
INRS217	682056	5051320	Roc	10,4	7,59	424	0,28	-163	88	203,22	509,12	-2,2	Ca-HCO ₃	5
INRS218	693893	5049410	Roc	9,8	8,58	231	0,14	-228	23	40,67	297,30	-4,1	Na-HCO ₃	7
INRS219	695734	5065750	Roc	8,2	7,81	267	0,20	-169	84	154,29	349,76	-4,3	Ca-HCO ₃	2
INRS220	628055	5027315	Roc	11,3	8,18	402	0,27	130	379	0,68	723,49	-2,4	Na-HCO ₃	1
INRS221	635822	5027898	Roc	11,0	8,79	416	0,26	-209	40	31,16	751,40	-2,8	Na-HCO ₃	3
INRS222	631252	5038225	Roc	11,4	8,69	627	0,26	-238	11	39,08	773,63	-2,9	Na-HCO ₃	1
INRS223	629840	5034019	Roc	12,0	8,48	698	0,40	-189	59	29,72	900,41	-4,7	Na-HCO ₃	1
INRS224	637534	5036700	Roc	10,5	9,33	964	0,08	61	311	2,88	1128,97	-3,0	Na-HCO ₃	1
INRS225	650044	5036250	Roc	9,8	7,53	212	1,73	127	377	139,65	263,74	-3,2	Ca-HCO ₃	6
INRS226	656943	5027010	Roc	10,7	7,31	587	0,25	-84	166	408,41	692,95	1,1	Ca-HCO ₃	5
INRS227	654726	5037516	Roc	10,1	9,11	262	0,24	-112	138	9,37	330,70	-4,6	Na-HCO ₃	1
INRS228	632402	5016248	Roc	10,8	7,31	770	0,30	-217	32	288,12	670,37	-4,8	Ca-HCO ₃	5
INRS229	638825	5014861	Séd	12,4	8,78	415	3,71	-89	158	--	--	-17,0	--	1
INRS230	638758	5014844	Roc	11,8	8,93	561	0,38	-248	0	11,68	485,69	-4,3	Na-HCO ₃	1
INRS231	646157	5015421	Roc	10,7	7,12	1283	0,49	-135	115	564,23	1056,09	-1,2	Ca-HCO ₃	5
INRS232	655718	5016853	Roc	11,3	7,45	756	0,25	-88	161	--	--	-15,1	--	5
INRS233	657137	5025688	Roc	11,5	7,43	629	0,25	-103	145	224,68	490,45	-13,5	Ca-HCO ₃	5
INRS234	647232	5023257	Roc	9,6	7,15	1060	0,19	-88	163	344,41	739,74	-5,9	Ca-HCO ₃	5
INRS235	640478	5020551	Roc	12,6	9,16	474	0,19	-209	38	15,67	397,07	-9,2	Na-HCO ₃	1
INRS236	663753	5006793	Roc	9,7	7,61	395	0,31	195	446	190,73	436,26	-6,2	Ca-HCO ₃	5
INRS237	648583	4998588	Roc	10,0	7,62	452	0,55	-154	97	196,74	356,07	-6,0	Ca-HCO ₃	8
INRS238	647695	5009760	Roc	11,6	7,91	788	0,49	-190	59	183,24	420,28	-4,5	Ca-HCO ₃	5
INRS239	651151	5001611	Roc	9,5	7,29	889	2,20	-64	187	399,56	754,45	-4,4	Ca-HCO ₃	5
INRS240	659915	5003483	Séd	10,2	7,21	1057	0,21	-65	186	414,94	840,62	-11,9	Ca-HCO ₃	5
INRS241	655398	5010445	Roc	11,9	7,60	869	2,51	-88	160	363,86	694,65	-2,0	Ca-HCO ₃	2
INRS242	656191	4987074	Roc	11,4	6,40	534	1,10	275	524	244,66	440,92	-6,1	Ca-HCO ₃	6
INRS243	656353	4992120	Roc	9,3	7,28	478	0,32	69	320	218,68	398,21	-5,0	Ca-HCO ₃	8
INRS244	647383	4993219	Roc	13,4	6,90	863	0,78	1	247	340,03	674,91	-3,0	Ca-HCO ₃	5
INRS245	641870	5002383	Séd	12,7	7,03	494	0,24	66	312	228,19	405,48	-2,5	Ca-HCO ₃	5
INRS246	641691	4988882	Roc	11,6	6,65	509	3,08	224	473	238,44	418,68	-3,5	Ca-HCO ₃	6
INRS247	637745	4991289	Roc	10,0	7,10	891	0,33	-55	195	370,60	688,27	-5,4	Ca-HCO ₃	5
INRS248	633612	4995923	Roc	10,0	7,11	955	0,39	-67	184	365,26	728,50	-4,7	Ca-HCO ₃	5
INRS249	635431	4998946	Roc	10,4	8,49	549	0,26	-166	84	160,37	463,31	-4,8	Mix-HCO ₃	2
INRS250	616352	5002290	Roc	9,7	7,52	1566	0,34	-66	184	563,44	1059,30	-5,3	Ca-HCO ₃	5
INRS251	625912	5000913	Roc	9,9	7,21	985	0,34	43	293	404,16	751,94	-5,0	Ca-HCO ₃	5
INRS252	628322	5007890	Roc	9,9	7,44	1009	0,34	-21	230	812,08	1228,90	4,3	Ca-SO ₄	5
INRS253	632150	5010060	Roc	10,8	7,05	1141	0,36	-21	229	510,73	924,77	-6,1	Mg-HCO ₃	5
INRS254	631905	4989260	Roc	9,9	7,21	1904	0,31	-55	196	556,26	1295,96	-3,4	Ca-HCO ₃	5
INRS255	626691	4989000	Roc	10,1	7,64	620	0,27	-58	192	260,87	511,15	-5,3	Ca-HCO ₃	5
INRS256	639660	5006737	Roc	10,2	7,80	701	0,32	-89	161	184,86	576,49	-6,4	Mix-HCO ₃	2
INRS257	627728	4991499	Roc	10,2	7,18	2400	0,38	-78	172	517,88	1778,45	-10,5	Na-Cl	5
INRS258	622204	5008143	Roc	10,2	7,84	605	0,56	-124	127	255,13	482,91	-1,7	Ca-HCO ₃	5
INRS259	676511	5003721	Roc	9,1	8,42	282	3,77	159	411	102,73	227,60	-1,0	Ca-HCO ₃	8
INRS260	674201	4996507	Roc	8,5	8,22	333	0,33	-198	55	148,60	254,79	-1,1	Ca-HCO ₃	8
INRS261	673984	4989943	Roc	10,5	7,83	241	0,31	-17	233	103,40	194,76	-1,7	Ca-HCO ₃	8
INRS262	669367	5000917	Roc	10,5	7,52	663	0,61	72	322	282,73	493,77	-2,0	Ca-HCO ₃	5
INRS263	684403	4987546	Roc	6,0	6,64	120	9,28	58	314	46,05	92,52	-1,6	Ca-HCO ₃	6
INRS264	684072	4996383	Roc	10,7	7,74	278	8,35	104	353	122,58	212,08	1,3	Ca-HCO ₃	6
INRS265	681034	5002332	Roc	11,2	7,83	289	0,25	-117	132	123,46	229,12	-2,4	Ca-HCO ₃	8
INRS266	681289	5005010	Roc	13,3	4,44	180	11,07	223	469	70,14	118,39	6,0	Ca-HCO ₃	6
INRS267	687357	4994200	Roc	9,4	5,51	188	2,09	104	355	77,71	145,80	-4,1	Ca-HCO ₃	6
INRS268	688534	4997410	Roc	9,3	5,80	128	1,62	127	379	70,14	132,69	-2,2	Ca-HCO ₃	6
INRS269	695790	5000920	Roc	10,0	5,69	131	9,58	265	515	56,97	107,76	-2,1	Ca-HCO ₃	6
INRS270	664945	5034944	Roc	10,0	7,02	261	2,16	88	338	43,07	213,70	-2,3	Na-HCO ₃	7
INRS271	662848	5040645	Roc	10,7	8,44	964	0,27	-169	81	45,70	742,06	-8,5	Na-HCO ₃	3
INRS272	664507	5053745	Séd	9,8	8,24	905	0,21	-140	111	40,52	712,95	-5,5	Na-HCO ₃	1
INRS273	690366	4988422	Roc	13,6	6,52	430	4,96	141	387	100,52	266,49	3,9	Na-HCO ₃	6

Tableau E.3: Paramètres *in situ* et classification

Échantillon	X m	Y m	Aquif.	T °C	pH	CE uS/cm	OD mg/L	Redox mV	Eh mV	Dureté mg/L	MDT mg/L	EN %	TE	Groupe
INRS274	696157	4988827	Séd	13,8	6,13	48	6,81	151	397	19,24	35,59	9,0	Ca-HCO ₃	6
INRS275	699077	4991847	Roc	9,8	8,37	181	0,34	-176	75	77,61	154,10	-0,9	Ca-HCO ₃	8
INRS276	670294	5074516	Roc	9,3	7,83	1039	ND	-225	27	316,28	843,09	0,1	Mix-HCO ₃	2
INRS277	672531	5072253	Roc	10,5	8,45	462	0,25	-95	155	55,49	392,46	-2,0	Na-HCO ₃	2
INRS278	639372	5016111	Roc	11,7	8,02	671	0,37	-199	49	185,34	567,84	-1,6	Na-HCO ₃	2
INRS279	644962	5012807	Roc	10,8	8,52	1370	0,21	-150	99	23,16	1035,67	1,8	Na-HCO ₃	1
INRS280	650422	5008408	Roc	11,0	9,04	408	1,45	-172	77	23,04	351,79	-0,4	Na-HCO ₃	1
INRS281	678362	5045373	Roc	10,2	7,26	545	2,52	232	482	73,69	423,05	1,8	Na-HCO ₃	7
INRS282	674636	5045173	Roc	10,0	6,64	320	6,95	208	459	109,71	265,92	-0,6	Ca-HCO ₃	8
INRS283	676685	5045288	Roc	10,4	7,65	600	0,37	-77	173	169,27	493,97	-1,3	Na-HCO ₃	5
INRS284	685378	5085742	Roc	10,1	7,72	621	0,49	-271	-21	125,07	501,05	-0,7	Na-HCO ₃	2
INRS285	680602	5073607	Roc	10,2	7,12	1057	0,51	-167	83	332,32	769,36	2,1	Ca-HCO ₃	5
INRS286	684861	5063239	Roc	10,1	8,20	336	0,32	-181	70	121,69	282,69	-2,4	Mix-HCO ₃	8
INRS287(TS-B)	632150	5010060	Séd	9,4	8,24	2805	3,66	-114	137	86,74	1905,59	6,3	Na-Cl	3
INRS288(S9-D)	672119	5073008	Séd	ND	ND	ND	ND	ND	ND	214,73	397,72	-0,4	Ca-HCO ₃	5
INRS289(S8-C)	664211	5047316	Séd	12,0	8,36	1444	4,80	140	388	130,54	886,27	-13,4	Na-HCO ₃	2
INRS290(T9-B)	668589	5025927	Séd	13,6	7,78	651	0,84	115	361	259,16	449,38	-1,9	Ca-HCO ₃	5
INRS291(T2-A)	665680	5030017	Séd	13,9	7,68	839	3,57	57	303	402,58	656,25	3,8	Ca-HCO ₃	5
INRS292(X12)	693390	5059213	Séd	13,2	6,91	1635	4,68	49	296	415,46	829,69	-0,1	Ca-HCO ₃	5
INRS293	693409	5059195	Roc	13,1	6,68	1553	0,37	21	267	448,93	789,61	-0,6	Ca-HCO ₃	5
INRS294(T6-E)	667570	5061444	Séd	12,4	7,51	1550	9,51	178	425	431,41	767,53	2,4	Ca-HCO ₃	5
INRS295	675191	5049645	Roc	9,0	7,91	763	2,70	52	304	109,06	370,47	-1,3	Na-HCO ₃	5
INRS296(S03)	675187	5049638	Séd	12,8	7,95	1228	10,50	130	376	--	--	-59,0	--	--
INRS300	662658	5015320	Roc	9,8	7,49	636	0,35	133	384	58,12	422,32	-1,1	Na-HCO ₃	7
INRS301	668953	5031580	Roc	11,4	7,62	859	3,18	155	404	155,32	295,65	-5,8	Ca-HCO ₃	8
P01	633773	5067244	Roc	9,4	8,38	9449	3,88	236	487	82,75	2649,64	-2,1	Na-Cl	3
P02_ROC	680245	5018939	Roc	9,4	8,00	504	0,06	132	383	148,15	264,81	-0,7	Mg-HCO ₃	8
P02_SED	680246	5018940	Séd	13,6	7,20	923	2,51	308	554	266,65	498,35	-0,7	Ca-HCO ₃	8
P03	661984	5081978	Roc	8,5	7,59	7841	0,17	-161	91	844,07	2961,34	1,5	Na-SO ₄	4
P04	674619	5045095	Roc	9,7	7,01	555	0,52	-96	155	--	--	-51,6	--	5
P05	633183	5000387	Roc	10,2	7,70	718	8,47	105	356	--	--	-60,7	--	5
P06	688098	5060825	Roc	9,9	8,50	505	1,68	127	378	47,70	437,07	-1,4	Na-HCO ₃	7
P07	638685	5040308	Roc	9,7	9,20	1091	1,19	172	423	4,69	1043,83	-2,3	Na-HCO ₃	1
P08	645192	5082224	Roc	9,0	7,65	21610	0,07	-312	-60	3902,29	13837,43	5,2	Na-Cl	4
P09	709917	5039902	Roc	8,9	8,03	154	0,44	109	361	114,33	225,65	-0,2	Ca-HCO ₃	8
P10	667516	4992441	Roc	8,0	7,94	737	4,03	139	392	--	--	-27,4	--	8
P11	692958	5031734	Roc	9,3	8,63	326	0,29	-263	-12	--	--	-43,6	--	8
P12	654564	5042191	Roc	9,3	8,34	2490	0,22	-191	60	--	--	-43,3	--	3
P13	631348	5055268	Roc	8,9	8,26	3444	0,03	-175	77	92,97	2076,03	4,5	Na-Cl	3
P14_ROC	673496	5083213	Roc	9,0	9,08	4466	0,34	84	336	92,74	1371,75	-0,1	Na-HCO ₃	3
P14_SED	673495	5083214	Séd	9,5	8,99	843	0,96	135	386	174,26	298,10	-1,0	Ca-HCO ₃	6
P15	668 090	5060880	Roc	10,1	9,54	452	6,96	151	402	3,01	449,47	-6,1	Na-HCO ₃	1
P16	662696	5004695	Roc	9,0	8,57	1734	0,52	416	668	16,56	637,53	-2,1	Na-HCO ₃	7
P17	637009	5011449	Roc	10,1	8,37	599	0,57	-188	62	--	--	-51,4	--	2
P18_ROC	676262	5009583	Roc	6,7	9,20	819	0,65	55	310	120,95	720,80	-5,8	Na-Cl	3
P18_SED	676262	5009583	Séd	9,5	8,56	264	3,27	250	501	156,04	278,42	0,4	Ca-HCO ₃	6
P19	652479	5035181	Roc	10,7	9,38	461	6,40	125	374	47,90	323,11	3,7	Na-HCO ₃	7
P20	690294	5006053	Roc	8,4	8,89	403	0,59	-94	158	46,00	203,11	-4,8	Na-HCO ₃	7
P21	705245	4992684	Roc	10,2	7,76	793	7,76	-92	159	186,75	296,30	-0,3	Ca-Cl	8
P22_ROC	686863	4995568	Roc	10,9	8,82	273	0,67	219	469	58,53	155,33	-6,6	Ca-HCO ₃	7
P22_SED	686862	4995566	Séd	8,9	7,93	463	2,43	292	544	95,50	175,28	-2,4	Ca-HCO ₃	6
P23	630537	5025247	Roc	9,3	8,95	4380	0,56	-185	66	37,89	2670,39	-0,3	Na-Cl	3
P24	711247	5025871	Roc	8,5	7,88	137	8,82	63	315	99,95	183,87	-2,2	Ca-HCO ₃	8
P25	661024	5049576	Roc	ND	7,84	10000	ND	ND	ND	560,32	6754,46	3,6	Na-Cl	3
PUITS_MSH	644085	5044550	Roc	8,6	9,37	369	2,51	141	393	35,70	250,43	2,7	Na-HCO ₃	7
RS01	647792	5090378	Séd	7,7	7,20	19170	5,14	187	440	2479,00	9886,12	-3,6	Na-Cl	4
RS01_49'	647792	5090378	Arg	ND	7,53	19780	ND	ND	ND	2249,90	13366,81	1,0	Na-Cl	4

Tableau E.3: Paramètres *in situ* et classification

Échantillon	X m	Y m	Aquif.	T °C	pH	CE uS/cm	OD mg/L	Redox mV	Eh mV	Dureté mg/L	MDT mg/L	EN %	TE	Groupe
RS01_59'	647792	5090378	Arg	ND	7,84	18820	ND	ND	ND	2108,49	12698,75	-1,0	Na-Cl	4
RS01_75'	647792	5090378	Arg	ND	7,70	16650	ND	ND	ND	2407,08	11379,26	3,2	Na-Cl	4
RS02_32'	645005	5057711	Arg	ND	8,20	1466	ND	ND	ND	103,04	1236,30	-3,3	Na-HCO ₃	1
RS02_54'	645005	5057711	Arg	ND	8,20	1840	ND	ND	ND	186,40	1424,05	6,6	Na-SO ₄	1
RS02_ROC	645005	5057711	Roc	10,1	ND	2852	1,16	-55	195	--	--	-21,4	--	3
RS02_SED	645005	5057711	Séd	9,5	ND	1182	1,55	-14	238	125,94	560,71	0,7	Na-HCO ₃	2
RS04	668170	5076451	Séd	8,1	7,96	7433	0,16	-187	66	55,59	3244,37	-6,7	Na-Cl	3
RS05_ROC	650686	5034101	Roc	7,2	8,82	945	1,04	-159	95	22,29	525,33	-6,0	Na-HCO ₃	1
RS05_SED	650686	5034101	Séd	5,1	9,22	1001	1,88	-212	45	76,29	514,04	-11,1	Na-SO ₄	1
SOURCE_MSH	643469	5045077	Roc	9,9	7,05	126	10,14	191	442	28,82	66,89	-3,3	Ca-HCO ₃	6
X07	662696	5004695	Séd	12,1	7,48	1099	1,56	388	636	287,37	434,62	2,3	Ca-HCO ₃	5
X22	693839	5049171	Séd	12,4	6,92	1314	1,85	228	476	251,00	484,54	-1,5	Ca-HCO ₃	6
X23	640692	4991444	Séd	16,8	6,40	1171	7,81	434	676	265,91	387,44	10,6	Ca-HCO ₃	6
X24	616803	4989217	Séd	11,0	6,88	1722	9,21	248	497	654,82	1018,45	10,6	Ca-HCO ₃	5



Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	Alc mg CaCO ₃ /L	Al mg/L	Sb mg/L	Ag mg/L	As mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Br- mg/L	Cd mg/L
INRS101	150	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,18	0,2	<0.0005	<0.00025	0,036	<0.1	<0.0002
INRS102	120	0,0039	<0.001	<0.0001	0,0033	0,08	0,11	<0.0005	<0.00025	0,024	<0.1	<0.0002
INRS103	460	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	12	0,096	<0.0005	<0.00025	0,066	<0.1	<0.0002
INRS105	160	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,04	0,088	<0.0005	<0.00025	0,047	<0.1	<0.0002
INRS106	160	0,0064	<0.001	0,00057	<0.001	0,03	0,089	<0.0005	<0.00025	0,04	<0.1	<0.0002
INRS107	320	0,0014	<0.001	0,00033	0,0014	0,04	0,066	<0.0005	<0.00025	0,08	<0.1	<0.0002
INRS108	70	0,0039	<0.001	0,00022	<0.001	<0.02	0,08	<0.0005	<0.00025	0,019	<0.1	<0.0002
INRS109	130	<0.001	<0.001	0,00021	0,0012	0,04	0,14	<0.0005	<0.00025	0,017	<0.1	<0.0002
INRS110	160	0,0042	<0.001	0,00018	<0.001	0,33	0,73	<0.0005	<0.00025	0,051	<0.1	<0.0002
INRS111	280	<0.001	<0.001	0,00017	<0.001	0,54	0,098	<0.0005	<0.00025	0,049	<0.1	<0.0002
INRS112	130	0,006	<0.001	0,00016	0,0041	<0.02	0,099	<0.0005	<0.00025	0,065	<0.1	<0.0002
INRS113	650	0,0017	<0.001	0,00013	<0.001	0,4	0,2	<0.0005	<0.00025	0,57	<0.1	<0.0002
INRS114	740	0,027	<0.001	0,00014	<0.001	0,97	0,25	<0.0005	<0.00025	0,75	<0.1	<0.0002
INRS115	150	0,0015	<0.001	0,00051	<0.001	0,03	0,033	<0.0005	<0.00025	0,014	<0.1	<0.0002
INRS116	170	0,0099	<0.001	0,00031	0,0026	0,03	0,013	<0.0005	<0.00025	0,036	<0.1	<0.0002
INRS117	180	0,0011	<0.001	<0.0001	<0.001	<0.02	0,0033	<0.0005	<0.00025	0,0051	<0.1	<0.0002
INRS118	360	0,0092	<0.001	0,00012	0,0053	<0.02	0,15	<0.0005	<0.00025	0,066	<0.1	<0.0002
INRS119	180	0,0022	<0.001	<0.0001	<0.001	0,02	0,18	<0.0005	<0.00025	0,0084	<0.1	<0.0002
INRS120	110	0,0011	<0.001	<0.0001	0,003	0,04	0,091	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS121	28	0,0048	<0.001	<0.0001	<0.001	0,02	0,012	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS122	220	0,0023	<0.001	<0.0001	0,0012	0,08	0,11	<0.0005	<0.00025	0,023	<0.1	<0.0002
INRS123	210	0,02	<0.001	<0.0001	<0.001	0,18	0,033	<0.0005	<0.00025	0,075	<0.1	<0.0002
INRS124	170	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,09	0,07	<0.0005	<0.00025	0,019	<0.1	<0.0002
INRS125	120	0,0052	<0.001	<0.0001	0,0054	0,04	0,02	<0.0005	<0.00025	0,013	<0.1	<0.0002
INRS126	110	0,0046	<0.001	0,00038	<0.001	<0.02	0,11	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
INRS127	490	0,006	<0.001	<0.0001	<0.001	4,2	0,93	<0.0005	<0.00025	0,047	<1	<0.0002
INRS128	720	0,0043	<0.001	<0.0001	<0.001	1,8	1,4	<0.0005	<0.00025	0,8	<0.1	<0.0002
INRS129	450	0,0069	<0.001	<0.0001	<0.001	1,5	0,6	<0.0005	<0.00025	0,7	1,6	<0.0002
INRS130	420	0,0011	<0.001	0,00022	<0.001	1,9	1,6	<0.0005	<0.00025	0,5	<0.1	<0.0002
INRS131	310	0,0086	<0.001	0,0002	<0.001	1,4	1,5	<0.0005	<0.00025	0,3	<0.1	<0.0002
INRS132	160	<0.001	<0.001	0,00011	<0.001	0,87	0,33	<0.0005	<0.00025	0,1	<0.1	<0.0002
INRS133	540	0,0019	<0.001	0,0003	<0.001	1,7	0,72	<0.0005	<0.00025	0,47	<0.1	<0.0002
INRS134	260	0,0021	<0.001	<0.0001	<0.001	0,07	0,14	<0.0005	<0.00025	0,05	<0.1	<0.0002
INRS135	250	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,09	0,058	<0.0005	<0.00025	0,067	<0.1	<0.0002
INRS136	240	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,1	0,052	<0.0005	<0.00025	0,047	<0.1	<0.0002
INRS137	430	<0.001	<0.001	0,0001	0,0018	0,03	0,12	<0.0005	<0.00025	0,0063	<0.1	<0.0002
INRS138	220	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,074	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
INRS139	210	<0.001	0,0012	0,00065	<0.001	<0.02	0,14	<0.0005	<0.00025	0,0058	<0.1	<0.0002
INRS140	160	<0.001	<0.001	0,00036	<0.001	<0.02	0,13	<0.0005	<0.00025	0,01	<0.1	<0.0002
INRS141	110	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	<0.02	0,11	<0.0005	<0.00025	0,0054	<0.1	<0.0002
INRS142	120	<0.001	<0.001	0,00019	<0.001	<0.02	0,0027	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS143	180	<0.001	<0.001	0,00014	0,0031	0,02	0,099	<0.0005	<0.00025	0,011	<0.1	<0.0002
INRS144	170	<0.001	<0.001	0,00016	<0.001	0,04	0,2	<0.0005	<0.00025	0,013	<0.1	<0.0002
INRS145	360	<0.001	<0.001	0,00012	<0.001	0,41	0,096	<0.0005	<0.00025	0,1	<0.1	<0.0002
INRS146	390	0,0012	<0.001	<0.0001	<0.001	0,3	0,42	<0.0005	<0.00025	0,12	<0.1	<0.0002
INRS147	210	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0024	0,06	0,11	<0.0005	<0.00025	0,0051	<0.1	<0.0002
INRS148	170	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0061	0,05	0,018	<0.0005	<0.00025	0,0053	<0.1	<0.0002
INRS149	150	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,14	0,088	<0.0005	<0.00025	0,033	<0.1	<0.0002
INRS150	180	0,0024	<0.001	<0.0001	<0.001	0,03	0,14	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
INRS151	61	0,032	<0.001	<0.0001	<0.001	0,04	0,093	<0.0005	<0.00025	0,011	<0.1	<0.0002
INRS152	180	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,04	0,074	<0.0005	<0.00025	0,011	<0.1	<0.0002
INRS153	200	0,0015	<0.001	<0.0001	<0.001	0,12	0,039	<0.0005	<0.00025	0,11	0,4	<0.0002
INRS154	180	0,002	<0.001	<0.0001	0,023	0,2	0,019	<0.0005	<0.00025	0,0056	<0.1	<0.0002
INRS155	200	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,06	0,051	<0.0005	<0.00025	0,0092	<0.1	<0.0002
INRS156	88	0,0012	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,0088	<0.0005	<0.00025	0,0072	<0.1	<0.0002
INRS157	170	0,0019	<0.001	<0.0001	<0.001	0,03	0,009	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS158	73	0,0036	0,0021	<0.0001	<0.001	0,13	0,019	<0.0005	<0.00025	0,0077	<0.1	<0.0002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Alc mg CaCO ₃ /L	Al mg/L	Sb mg/L	Ag mg/L	As mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Br- mg/L	Cd mg/L
INRS159	500	0,0022	<0.001	<0.0001	<0.001	0,31	0,085	<0.0005	<0.00025	0,038	0,2	<0.0002
INRS160	110	0,0017	<0.001	<0.0001	0,0043	0,08	0,012	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS161(X21)	200	0,017	0,0035	<0.0001	0,0019	0,67	0,37	<0.0005	<0.00025	0,12	<0.1	<0.0002
INRS162	130	0,0017	0,0012	0,00082	0,012	1,3	0,83	<0.0005	<0.00025	0,009	<0.1	<0.0002
INRS163	43	0,0089	<0.001	0,0004	<0.001	<0.02	0,052	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS164	150	0,0015	<0.001	0,00029	<0.001	0,06	0,36	<0.0005	<0.00025	0,0058	<0.1	<0.0002
INRS165	200	0,003	<0.001	0,00021	<0.001	0,02	0,064	<0.0005	<0.00025	0,0062	<0.1	<0.0002
INRS166	180	0,0049	<0.001	0,00019	<0.001	0,02	0,055	<0.0005	<0.00025	0,0071	<0.1	<0.0002
INRS167	52	0,0044	<0.001	0,00017	<0.001	<0.02	0,0064	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS168	91	0,0032	<0.001	0,00013	<0.001	<0.02	0,0028	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS169	120	0,0018	<0.001	0,00013	0,0025	0,1	0,11	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
INRS170	170	0,004	<0.001	0,00024	<0.001	0,03	0,0075	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS171	97	0,0032	<0.001	0,00014	0,0017	<0.02	0,012	<0.0005	<0.00025	0,0071	<0.1	<0.0002
INRS172	130	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,044	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS173	76	0,0016	<0.001	0,00014	<0.001	0,02	0,013	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS174	140	0,0013	<0.001	<0.0001	0,0043	0,04	0,052	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS175	130	0,001	<0.001	0,00011	<0.001	0,05	0,056	<0.0005	<0.00025	0,0079	<0.1	<0.0002
INRS176	130	0,017	<0.001	<0.0001	0,0014	<0.02	0,0047	<0.0005	<0.00025	0,013	<0.1	<0.0002
INRS177	540	0,0031	<0.001	<0.0001	<0.001	0,63	0,21	<0.0005	<0.00025	0,51	0,3	<0.0002
INRS178	120	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,08	0,057	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS179	22	0,028	<0.001	<0.0001	<0.001	0,04	0,0075	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS180	68	0,0029	<0.001	<0.0001	<0.001	0,03	<0.002	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS181	430	0,013	<0.001	<0.0001	<0.001	0,82	0,036	<0.0005	<0.00025	0,85	0,7	<0.0002
INRS182	640	0,0019	<0.001	<0.0001	<0.001	2,8	0,023	<0.0005	<0.00025	0,57	<0.1	<0.0002
INRS183	750	0,0078	<0.001	<0.0001	<0.001	2,9	2,8	<0.0005	<0.00025	0,99	6	<0.0002
INRS184	83	0,0079	<0.001	<0.0001	0,0014	0,04	0,0064	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
INRS185	370	0,002	<0.001	<0.0001	<0.001	0,82	0,19	<0.0005	<0.00025	0,36	0,2	<0.0002
INRS186	420	0,0034	<0.001	<0.0001	<0.001	0,09	0,029	<0.0005	<0.00025	0,23	<0.1	<0.0002
INRS187	620	0,0037	<0.001	0,00081	<0.001	0,71	0,39	<0.0005	<0.00025	0,66	0,1	<0.0002
INRS188	510	0,0063	<0.001	<0.0001	<0.001	1,5	0,18	<0.0005	<0.00025	0,86	9,7	<0.0002
INRS189	530	0,0017	<0.001	0,0004	<0.001	0,81	0,35	<0.0005	<0.00025	0,69	1	<0.0002
INRS190	390	0,0082	<0.001	<0.0001	<0.001	0,03	0,04	<0.0005	<0.00025	0,13	<0.1	<0.0002
INRS191	180	0,0014	<0.001	<0.0001	<0.001	0,19	0,073	<0.0005	<0.00025	0,031	<0.1	<0.0002
INRS192	220	0,0098	<0.001	<0.0001	<0.001	0,54	0,036	<0.0005	<0.00025	0,39	0,2	<0.0002
INRS193	360	0,0018	<0.001	<0.0001	<0.001	1,1	2,5	<0.0005	<0.00025	0,22	<0.1	<0.0002
INRS194	170	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0026	0,1	0,15	<0.0005	<0.00025	0,027	<0.1	<0.0002
INRS195	200	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,13	0,049	<0.0005	<0.00025	0,042	<0.1	<0.0002
INRS196	81	0,0062	<0.001	<0.0001	0,0015	0,08	0,032	<0.0005	<0.00025	0,014	<0.1	<0.0002
INRS197	270	0,0025	<0.001	<0.0001	0,0018	0,36	0,17	<0.0005	--	0,045	<0.1	<0.0002
INRS198	270	0,0023	<0.001	0,00031	<0.001	0,79	0,39	<0.0005	<0.00025	0,3	0,2	<0.0002
INRS199	240	0,0024	<0.001	<0.0001	0,0011	0,21	0,16	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
INRS201	240	0,022	<0.001	<0.0001	<0.001	0,46	0,074	<0.0005	<0.00025	0,5	<0.1	<0.0002
INRS202	200	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,54	0,15	<0.0005	<0.00025	0,12	<0.1	<0.0002
INRS203	230	0,0032	<0.001	<0.0001	<0.001	0,47	1,2	<0.0005	<0.00025	0,11	<0.1	<0.0002
INRS204	240	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,26	0,14	<0.0005	<0.00025	0,068	<0.1	<0.0002
INRS205	130	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,44	0,36	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS206	320	0,0019	<0.001	<0.0001	<0.001	1,2	0,3	<0.0005	<0.00025	0,81	<0.1	<0.0002
INRS207	240	0,0024	<0.001	0,00012	<0.001	0,96	0,74	<0.0005	<0.00025	0,29	<0.1	<0.0002
INRS208	260	<0.001	<0.001	0,00013	<0.001	0,41	0,19	<0.0005	<0.00025	0,053	<0.1	<0.0002
INRS209	330	<0.001	<0.001	0,00011	<0.001	0,43	0,14	<0.0005	<0.00025	0,059	<0.1	<0.0002
INRS210	180	0,0014	<0.001	0,00013	<0.001	0,02	<0.002	<0.0005	<0.00025	0,0091	<0.1	<0.0002
INRS211	280	<0.001	<0.001	0,00019	<0.001	0,81	0,51	<0.0005	<0.00025	0,24	1,1	<0.0002
INRS212	190	<0.001	<0.001	0,00011	0,0022	0,07	0,19	<0.0005	<0.00025	0,053	0,1	<0.0002
INRS213	120	0,0084	<0.001	<0.0001	<0.001	0,21	0,09	<0.0005	<0.00025	0,037	<0.1	<0.0002
INRS214	200	0,002	<0.001	<0.0001	<0.001	1	8,9	<0.0005	<0.00025	0,28	2,3	<0.0002
INRS215	190	0,0031	<0.001	<0.0001	0,0015	0,43	0,33	<0.0005	<0.00025	0,11	<0.1	<0.0002
INRS216	200	0,0042	<0.001	<0.0001	0,01	0,03	0,02	<0.0005	<0.00025	0,11	<0.1	<0.0002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Alc mg CaCO ₃ /L	Al mg/L	Sb mg/L	Ag mg/L	As mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Br- mg/L	Cd mg/L
INRS217	240	0,0025	<0.001	<0.0001	0,0062	0,55	0,26	<0.0005	<0.00025	0,045	<0.1	<0.0002
INRS218	150	0,0029	<0.001	<0.0001	0,0027	0,05	0,031	<0.0005	<0.00025	0,023	<0.1	<0.0002
INRS219	190	0,025	<0.001	<0.0001	<0.001	0,52	0,18	<0.0005	<0.00025	0,025	<0.1	<0.0002
INRS220	410	0,022	<0.001	<0.0001	<0.001	0,19	0,0078	<0.0005	<0.00025	0,37	<0.1	<0.0002
INRS221	450	0,0088	<0.001	<0.0001	<0.001	0,42	0,3	<0.0005	<0.00025	0,48	0,3	<0.0002
INRS222	420	0,0071	<0.001	<0.0001	<0.001	0,71	0,36	<0.0005	<0.00025	0,56	0,1	<0.0002
INRS223	500	0,027	<0.001	<0.0001	<0.001	0,61	0,19	<0.0005	<0.00025	0,44	<0.1	<0.0002
INRS224	580	0,042	<0.001	<0.0001	<0.001	0,62	0,021	<0.0005	<0.00025	0,91	1,1	<0.0002
INRS225	140	0,0049	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,028	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
INRS226	310	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,16	0,17	<0.0005	<0.00025	0,022	<0.1	<0.0002
INRS227	170	0,027	<0.001	<0.0001	<0.001	0,28	0,0039	<0.0005	<0.00025	0,13	<0.1	<0.0002
INRS228	310	0,0019	0,0012	0,00072	<0.001	0,22	0,2	<0.0005	<0.00025	0,094	<0.1	<0.0002
INRS229	260	0,0034	<0.001	0,00044	<0.001	0,42	0,1	<0.0005	<0.00025	0,25	<0.1	<0.0002
INRS230	270	0,011	<0.001	0,00027	<0.001	0,43	0,091	<0.0005	<0.00025	0,27	<0.1	<0.0002
INRS231	460	0,0023	<0.001	0,00021	<0.001	1,4	0,44	<0.0005	<0.00025	0,12	<0.1	<0.0002
INRS232	180	<0.001	<0.001	0,00014	<0.001	0,1	0,38	<0.0005	<0.00025	0,018	<0.1	<0.0002
INRS233	190	<0.001	<0.001	0,00012	<0.001	0,28	0,24	<0.0005	<0.00025	0,03	<0.1	<0.0002
INRS234	270	<0.001	<0.001	0,00013	<0.001	0,22	0,54	<0.0005	<0.00025	0,081	<0.1	<0.0002
INRS235	230	0,0062	<0.001	0,00011	<0.001	0,27	0,074	<0.0005	<0.00025	0,18	<0.1	<0.0002
INRS236	190	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0071	0,3	0,14	<0.0005	<0.00025	0,052	<0.1	<0.0002
INRS237	130	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,11	0,078	<0.0005	<0.00025	0,016	<0.1	<0.0002
INRS238	180	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0078	0,37	0,13	<0.0005	<0.00025	0,053	<0.1	<0.0002
INRS239	350	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,29	0,21	<0.0005	<0.00025	0,071	<0.1	<0.0002
INRS240	400	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,32	0,11	<0.0005	<0.00025	0,024	<0.1	<0.0002
INRS241	350	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	1,1	1,1	<0.0005	<0.00025	0,15	<0.1	<0.0002
INRS242	250	0,0082	<0.001	<0.0001	<0.001	0,04	0,035	<0.0005	<0.00025	0,015	<0.1	<0.0002
INRS243	230	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0081	0,09	0,074	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
INRS244	330	0,003	<0.001	<0.0001	<0.001	0,44	0,11	<0.0005	<0.00025	0,031	<0.1	<0.0002
INRS245	200	0,059	<0.001	0,00032	<0.001	0,06	0,16	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
INRS246	230	0,0011	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,057	<0.0005	<0.00025	0,016	<0.1	<0.0002
INRS247	330	0,059	<0.001	<0.0001	<0.001	0,69	0,2	<0.0005	<0.00025	0,027	<0.1	<0.0002
INRS248	310	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,19	0,37	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
INRS249	280	0,0021	<0.001	<0.0001	<0.001	0,96	1,5	<0.0005	<0.00025	0,23	<0.1	<0.0002
INRS250	320	0,0013	<0.001	<0.0001	<0.001	0,21	0,088	<0.0005	<0.00025	0,024	<0.1	<0.0002
INRS251	310	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,19	0,089	<0.0005	<0.00025	0,093	<0.1	<0.0002
INRS252	200	0,0023	<0.001	<0.0001	<0.001	0,18	0,012	<0.0005	<0.00025	0,38	<0.1	<0.0002
INRS253	410	0,0013	<0.001	<0.0001	<0.001	0,31	0,055	<0.0005	<0.00025	0,088	<0.1	<0.0002
INRS254	520	0,0042	<0.001	<0.0001	<0.001	1,6	0,65	<0.0005	<0.00025	0,026	<0.1	<0.0002
INRS255	280	0,0012	<0.001	<0.0001	<0.001	0,16	0,054	<0.0005	<0.00025	0,068	<0.1	<0.0002
INRS256	340	0,0032	<0.001	0,00014	<0.001	1,8	1,8	<0.0005	<0.00025	0,21	<0.1	<0.0002
INRS257	350	0,0026	<0.001	0,00013	<0.001	0,05	0,06	<0.0005	<0.00025	0,008	<0.1	<0.0002
INRS258	210	0,0016	<0.001	0,00011	<0.001	0,17	0,06	<0.0005	<0.00025	0,08	<0.1	<0.0002
INRS259	120	0,0015	<0.001	<0.0001	<0.001	<0.02	0,06	<0.0005	<0.00025	0,005	<0.1	<0.0002
INRS260	120	0,001	<0.001	0,00011	0,0028	0,05	0,014	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS261	100	0,0077	<0.001	<0.0001	0,0015	0,07	0,061	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS262	190	0,0012	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,094	<0.0005	<0.00025	0,019	<0.1	<0.0002
INRS263	38	0,0016	0,0014	0,00075	<0.001	0,08	0,0033	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS264	110	0,0025	<0.001	0,00032	<0.001	0,03	0,041	<0.0005	<0.00025	0,013	<0.1	<0.0002
INRS265	120	<0.001	<0.001	0,00024	0,0042	0,03	0,17	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS266	54	0,008	<0.001	0,00024	<0.001	0,05	0,026	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
INRS267	66	<0.001	<0.001	0,00017	<0.001	0,03	0,009	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS268	65	0,002	<0.001	0,00015	<0.001	0,03	0,0039	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS269	56	0,0033	<0.001	0,00014	<0.001	0,03	0,0042	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS270	110	0,028	<0.001	0,0001	<0.001	0,46	0,054	0,00091	<0.00025	0,043	<0.1	<0.0002
INRS271	350	0,0059	<0.001	0,0001	<0.001	2,1	0,32	<0.0005	<0.00025	0,34	0,4	<0.0002
INRS272	340	0,0012	<0.001	<0.0001	<0.001	1,3	0,65	<0.0005	<0.00025	0,43	0,3	<0.0002
INRS273	83	0,0035	<0.001	<0.0001	<0.001	<0.02	0,01	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Alc mg CaCO ₃ /L	Al mg/L	Sb mg/L	Ag mg/L	As mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Br- mg/L	Cd mg/L
INRS274	11	0,0029	<0.001	<0.0001	<0.001	0,03	<0.002	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS275	74	0,08	<0.001	<0.0001	<0.001	0,04	0,011	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
INRS276	440	0,002	<0.001	<0.0001	<0.001	1	1,3	<0.0005	<0.00025	0,31	<0.1	<0.0002
INRS277	220	0,0015	<0.001	<0.0001	<0.001	0,71	0,48	<0.0005	<0.00025	0,19	<0.1	<0.0002
INRS278	320	0,0024	<0.001	<0.0001	<0.001	0,58	1,2	<0.0005	<0.00025	0,18	<0.1	<0.0002
INRS279	450	0,032	<0.001	<0.0001	<0.001	1,2	0,28	<0.0005	<0.00025	0,37	0,1	<0.0002
INRS280	190	0,0043	<0.001	<0.0001	<0.001	0,46	0,19	0,00075	<0.00025	0,26	<0.1	<0.0002
INRS281	210	0,0043	<0.001	<0.0001	0,0036	0,02	0,072	<0.0005	<0.00025	0,059	<0.1	<0.0002
INRS282	140	0,018	<0.001	<0.0001	<0.001	0,02	0,13	<0.0005	<0.00025	0,026	<0.1	<0.0002
INRS283	250	0,021	<0.001	<0.0001	<0.001	0,09	0,23	<0.0005	<0.00025	0,032	<0.1	<0.0002
INRS284	260	0,0022	<0.001	<0.0001	<0.001	0,85	1,9	<0.0005	<0.00025	0,28	<0.1	<0.0002
INRS285	330	0,003	<0.001	<0.0001	<0.001	0,64	1,3	<0.0005	<0.00025	0,036	<0.1	<0.0002
INRS286	150	0,0018	<0.001	<0.0001	<0.001	1,5	0,22	<0.0005	<0.00025	0,088	<0.1	<0.0002
INRS287(T5-B)	580	0,0044	<0.001	<0.0001	<0.001	1,8	0,58	<0.0005	<0.00025	0,73	1,8	<0.0002
INRS288(S9-D)	230	0,014	<0.001	<0.0001	0,0017	0,36	0,24	<0.0005	<0.00025	0,046	<0.1	<0.0002
INRS289(S8-C)	560	0,0051	<0.001	0,0003	0,0013	2,2	0,12	<0.0005	<0.00025	0,54	<0.1	<0.0002
INRS290(T9-B)	190	0,0038	<0.001	0,00016	0,012	0,09	0,18	<0.0005	<0.00025	0,036	<0.1	<0.0002
INRS291(T2-A)	320	0,0035	<0.001	<0.0001	0,0089	0,13	0,32	<0.0005	<0.00025	0,025	<0.1	<0.0002
INRS292(X12)	450	0,0029	<0.001	0,00015	0,021	1,5	0,16	<0.0005	<0.00025	0,059	<0.1	<0.0002
INRS293	450	<0.001	<0.001	<0.0001	0,0054	0,15	0,23	<0.0005	<0.00025	0,19	<0.1	<0.0002
INRS294(T6-E)	380	0,0034	0,0014	<0.0001	0,0052	0,57	0,7	<0.0005	<0.00025	0,077	<0.1	<0.0002
INRS295	200	0,0027	<0.001	<0.0001	0,0053	0,24	0,15	<0.0005	<0.00025	0,094	<0.1	<0.0002
INRS296(S03)	1400	0,39	0,0013	<0.0001	0,013	2,5	0,31	<0.0005	<0.00025	0,18	<0.1	<0.0002
INRS300	150	<0.001	<0.001	0,00042	0,0019	0,12	0,05	<0.0005	<0.00025	0,053	0,1	<0.0002
INRS301	130	0,0084	<0.001	<0.0001	0,0016	0,12	0,21	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
P01	530	0,0058	<0.001	<0.0001	0,025	1,1	0,029	<0.0005	<0.00025	1	4,9	<0.0002
P02_ROC	140	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	0,1	0,029	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
P02_SED	280	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	1,3	0,061	<0.0005	<0.00025	0,014	<0.1	<0.0002
P03	120	0,0027	<0.001	<0.0001	0,027	0,9	0,0048	<0.0005	<0.00025	1,6	<1	<0.0002
P04	290	<0.001	<0.001	<0.0001	0,006	0,15	0,24	<0.0005	<0.00025	0,01	<0.1	<0.0002
P05	300	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	1,1	0,21	<0.0005	<0.00025	0,049	<0.1	<0.0002
P06	220	0,013	0,0021	<0.0001	0,0026	0,33	0,078	<0.0005	<0.00025	0,14	<0.1	<0.0002
P07	570	0,045	0,0037	<0.0001	0,0075	0,47	0,027	<0.0005	<0.00025	0,91	0,4	<0.0002
P08	130	0,0046	<0.001	<0.0001	0,0016	5,3	0,016	<0.0005	<0.00025	1,2	32	<0.0002
P09	120	0,0039	<0.001	<0.0001	0,0016	0,09	0,033	<0.0005	<0.00025	0,025	<0.1	<0.0002
P10	190	0,0071	0,0021	<0.0001	0,0041	0,02	0,038	<0.0005	<0.00025	0,028	<0.1	<0.0002
P11	150	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,1	0,016	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	<0.0002
P12	430	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	0,92	0,13	<0.0005	<0.00025	0,15	0,5	<0.0002
P13	540	0,0046	0,0012	<0.0001	0,002	1,7	2	<0.0005	<0.00025	0,49	2,5	<0.0002
P14_ROC	560	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	1,8	0,97	<0.0005	<0.00025	0,38	1,3	<0.0002
P14_SED	140	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	0,23	0,024	<0.0005	<0.00025	0,0088	<0.1	<0.0002
P15	250	0,018	<0.001	<0.0001	0,0014	0,58	0,11	<0.0005	<0.00025	0,35	<0.1	<0.0002
P16	250	0,032	0,0059	<0.0001	0,0078	0,29	0,0044	<0.0005	<0.00025	0,21	0,5	<0.0002
P17	270	<0.001	<0.001	<0.0001	<0.001	2	0,69	<0.0005	<0.00025	0,17	<0.1	<0.0002
P18_ROC	220	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	0,2	0,91	<0.0005	<0.00025	0,025	0,5	<0.0002
P18_SED	130	<0.01	<0.001	<0.0001	0,0017	0,2	0,055	<0.0005	<0.00025	0,0087	<0.1	<0.0002
P19	98	0,016	<0.001	<0.0001	0,0026	0,09	0,011	<0.0005	<0.00025	0,046	0,1	<0.0002
P20	110	0,014	<0.001	<0.0001	<0.001	0,12	0,015	<0.0005	<0.00025	0,033	<0.1	<0.0002
P21	90	0,0031	0,0014	<0.0001	<0.001	0,2	0,061	<0.0005	<0.00025	0,023	<0.1	<0.0002
P22_ROC	81	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	0,18	0,069	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
P22_SED	83	<0.01	<0.001	<0.0001	0,0035	0,09	0,014	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
P23	620	0,0029	<0.001	<0.0001	<0.001	1,7	2,3	<0.0005	<0.00025	0,46	3,9	<0.0002
P24	90	0,028	<0.001	<0.0001	<0.001	0,08	0,16	<0.0005	<0.00025	0,012	<0.1	<0.0002
P25	1500	<0.01	<0.001	0,00018	<0.001	8,5	7,1	<0.0005	<0.00025	2,1	13	<0.0002
PUITS_MSH	100	0,06	<0.001	<0.0001	0,0011	0,06	<0.002	<0.0005	<0.00025	0,015	<0.1	<0.0002
RS01	450	0,0026	<0.001	<0.0001	0,0021	6,3	0,035	<0.0005	<0.00025	2,1	10	<0.0002
RS01_49'	225	--	--	--	--	--	--	--	--	--	28	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Alc mg CaCO ₃ /L	Al mg/L	Sb mg/L	Ag mg/L	As mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Bi mg/L	B mg/L	Br- mg/L	Cd mg/L
RS01_59'	213	--	--	--	--	--	--	--	--	--	18	--
RS01_75'	225	--	--	--	--	--	--	--	--	--	12	--
RS02_32'	488	--	--	--	--	--	--	--	--	--	<0.6	--
RS02_54'	413	--	--	--	--	--	--	--	--	--	<0.6	--
RS02_ROC	190	0,083	0,0015	<0.0001	0,0024	0,24	0,05	<0.0005	<0.00025	0,063	<0.1	<0.0002
RS02_SED	300	0,0052	<0.001	<0.0001	0,0013	1,2	0,11	<0.0005	<0.00025	0,26	<0.1	<0.0002
RS04	830	0,029	0,0011	<0.0001	0,0025	1,9	0,92	<0.0005	<0.00025	1,4	4,7	<0.0002
RS05_ROC	300	0,74	<0.001	<0.0001	<0.001	0,21	0,18	<0.0005	<0.00025	0,3	<0.1	<0.0002
RS05_SED	150	0,044	<0.001	0,00073	0,0035	<0.02	0,13	<0.0005	<0.00025	0,12	<0.1	<0.0002
SOURCE_MSH	27	0,0047	<0.001	<0.0001	<0.001	0,05	0,0053	<0.0005	<0.00025	0,021	<0.1	0
X07	160	0,0024	0,0035	<0.0001	0,029	0,06	0,22	<0.0005	<0.00025	0,02	<0.1	<0.0002
X22	260	<0.01	<0.001	<0.0001	0,0039	0,36	0,069	<0.0005	<0.00025	<0.005	<0.1	<0.0002
X23	180	<0.01	<0.001	<0.0001	<0.001	0,12	0,046	<0.0005	<0.00025	0,015	<0.1	<0.0002
X24	550	<0.01	0,0014	<0.0001	0,01	0,2	0,13	<0.0005	<0.00025	0,018	<0.1	<0.0002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Ca mg/L	Cl mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Sn mg/L	Fe mg/L	F mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
INRS101	92	62	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,1	0,2	0,016	32	0,049	0,0011	<0.001
INRS102	19	7,9	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,072	0,2	<0.01	4,3	0,12	0,0012	<0.001
INRS103	140	44	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	2,5	0,2	0,03	32	0,067	<0.0005	0,0031
INRS105	74	33	<0.0005	<0.0005	0,0033	<0.001	<0.03	<0.1	0,012	28	0,035	0,0091	<0.001
INRS106	15	9,5	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,062	0,2	0,015	3,2	0,027	0,0012	<0.001
INRS107	9,4	78	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	1,3	0,016	6,7	0,1	0,0016	<0.001
INRS108	28	63	<0.0005	<0.0005	0,032	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	3,1	0,00069	<0.0005	<0.001
INRS109	22	50	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	0,2	0,015	9,8	0,018	0,0011	<0.001
INRS110	51	34	0,0016	<0.0005	<0.0005	<0.001	4,4	0,1	0,018	7,6	0,46	<0.0005	<0.001
INRS111	84	80	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,1	0,1	0,012	32	0,14	0,00065	<0.001
INRS112	19	77	<0.0005	<0.0005	0,0012	<0.001	<0.03	0,5	0,028	4,9	0,011	0,0055	<0.001
INRS113	2,4	21	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,036	1,8	0,046	1,7	0,0016	0,00077	<0.001
INRS114	3,8	190	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,26	1,2	0,11	2,8	0,0063	0,00096	0,017
INRS115	12	17	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,033	0,2	0,015	11	0,013	0,00062	0,0015
INRS116	8,7	20	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,16	1,6	<0.01	5,2	0,021	0,0069	<0.001
INRS117	2,5	45	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	0,76	0,022	<0.0005	<0.001
INRS118	29	75	<0.0005	<0.0005	0,018	0,026	<0.03	0,1	0,021	4,9	0,0097	0,0025	<0.001
INRS119	31	31	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	15	0,12	0,00063	<0.001
INRS120	26	0,81	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,1	0,2	<0.01	8,8	0,072	0,0022	<0.001
INRS121	4,9	0,66	<0.0005	<0.0005	0,055	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	1,5	0,01	<0.0005	<0.001
INRS122	37	41	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,19	0,4	<0.01	31	0,0078	0,00086	<0.001
INRS123	15	13	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0,016	<0.03	0,5	0,011	11	0,008	0,0043	0,0014
INRS124	34	14	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	16	0,017	0,0011	<0.001
INRS125	20	0,52	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,17	0,3	<0.01	5,2	0,049	0,0021	<0.001
INRS126	11	3,3	<0.0005	<0.0005	0,86	<0.001	0,12	0,2	<0.01	2	0,028	0,0022	<0.001
INRS127	220	1500	<0.0005	0,0013	<0.0005	<0.001	16	0,1	0,012	60	2,8	0,00097	0,0064
INRS128	14	950	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,14	0,6	0,32	12	0,025	0,00074	<0.001
INRS129	8	450	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,099	0,9	0,051	11	0,011	<0.0005	<0.001
INRS130	10	39	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,046	0,5	0,086	12	0,022	<0.0005	<0.001
INRS131	20	2,1	<0.0005	<0.0005	0,0051	<0.001	0,12	0,4	0,039	27	0,029	<0.0005	<0.001
INRS132	18	30	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0,0012	0,2	0,2	0,013	6,9	0,079	0,00052	<0.001
INRS133	13	190	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,62	0,6	0,13	9,2	0,037	0,00066	<0.001
INRS134	58	48	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,17	0,1	<0.01	32	0,087	0,0028	<0.001
INRS135	46	8,8	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,071	0,1	<0.01	29	0,022	<0.0005	<0.001
INRS136	38	19	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,039	0,2	0,012	21	0,012	0,0024	<0.001
INRS137	170	200	<0.0005	0,00091	0,001	<0.001	0,91	<0.1	<0.01	60	0,68	0,00058	<0.001
INRS138	87	34	<0.0005	0,00059	0,011	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	12	0,8	0,0009	0,002
INRS139	61	17	0,00054	<0.0005	0,0013	<0.001	0,35	<0.1	<0.01	16	0,53	0,00057	<0.001
INRS140	39	62	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	0,2	0,011	20	0,029	0,002	<0.001
INRS141	31	21	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,05	0,7	<0.01	6,4	0,096	0,004	<0.001
INRS142	78	160	<0.0005	<0.0005	0,0033	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	24	0,0009	0,00088	<0.001
INRS143	22	13	<0.0005	<0.0005	0,0091	<0.001	0,047	0,4	<0.01	24	0,012	0,0087	<0.001
INRS144	59	36	<0.0005	<0.0005	0,0085	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	9	0,077	<0.0005	0,0031
INRS145	70	59	<0.0005	<0.0005	0,0015	<0.001	0,038	0,2	0,029	34	0,08	0,00082	<0.001
INRS146	140	140	<0.0005	<0.0005	0,0031	<0.001	2,6	0,2	0,033	46	0,14	0,0029	<0.001
INRS147	51	5,9	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,052	0,2	<0.01	19	0,016	0,002	<0.001
INRS148	59	13	<0.0005	<0.0005	0,0011	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	9	0,06	0,002	<0.001
INRS149	20	1,3	0,0012	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	0,2	<0.01	18	0,013	0,0012	<0.001
INRS150	41	7,9	<0.0005	<0.0005	0,015	<0.001	0,046	0,1	<0.01	9,4	0,67	0,0011	<0.001
INRS151	28	4	<0.0005	<0.0005	0,065	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	1,8	0,0026	<0.0005	<0.001
INRS152	65	13	<0.0005	<0.0005	0,0068	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	6,2	0,071	<0.0005	<0.001
INRS153	14	100	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,034	0,6	0,013	7,7	0,007	0,0033	<0.001
INRS154	37	0,92	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,26	0,1	<0.01	14	0,11	0,0033	<0.001
INRS155	59	100	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,77	<0.1	<0.01	8,9	0,26	<0.0005	<0.001
INRS156	19	0,69	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,38	0,3	<0.01	9	0,08	0,0018	<0.001
INRS157	57	8,2	<0.0005	<0.0005	0,063	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	6,6	0,00094	<0.0005	<0.001
INRS158	24	9	0,0027	<0.0005	0,00077	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	3,7	0,095	<0.0005	<0.001

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Ca mg/L	Cl mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Sn mg/L	Fe mg/L	F mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
INRS159	120	100	<0.0005	0,00063	<0.0005	<0.001	5,3	0,1	<0.01	41	3,4	<0.0005	0,0016
INRS160	29	1,9	<0.0005	<0.0005	0,0011	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	7,2	0,13	0,0013	<0.001
INRS161(X21)	24	29	<0.0005	<0.0005	0,0043	<0.001	<0.03	0,3	0,016	15	0,029	0,027	0,0031
INRS162	22	15	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,51	0,2	<0.01	13	0,031	0,0028	<0.001
INRS163	16	17	<0.0005	<0.0005	0,016	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	2,5	0,0016	0,00078	<0.001
INRS164	50	16	<0.0005	<0.0005	0,00096	<0.001	0,053	<0.1	<0.01	9,3	0,085	<0.0005	<0.001
INRS165	62	16	<0.0005	<0.0005	0,0034	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	14	<0.0004	<0.0005	<0.001
INRS166	59	3,3	<0.0005	<0.0005	0,0061	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	13	0,027	0,0018	0,0021
INRS167	25	0,63	<0.0005	<0.0005	0,09	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	0,94	0,0024	<0.0005	0,0019
INRS168	38	13	<0.0005	<0.0005	0,0014	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	3	<0.0004	0,0011	<0.001
INRS169	18	7,6	<0.0005	<0.0005	0,0034	<0.001	<0.03	0,4	<0.01	12	0,059	0,0072	<0.001
INRS170	59	0,67	0,00067	<0.0005	0,015	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	5	0,013	<0.0005	<0.001
INRS171	36	15	<0.0005	<0.0005	0,0036	<0.001	0,12	<0.1	<0.01	4,4	0,25	<0.0005	0,0084
INRS172	49	15	<0.0005	<0.0005	0,0065	<0.001	2,7	<0.1	<0.01	9,3	0,27	<0.0005	<0.001
INRS173	20	0,63	<0.0005	<0.0005	0,0077	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	8,2	0,0028	<0.0005	0,0022
INRS174	35	25	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,037	0,1	<0.01	20	0,11	0,0015	<0.001
INRS175	25	0,44	<0.0005	<0.0005	0,00061	<0.001	0,16	0,3	<0.01	14	0,022	0,0016	<0.001
INRS176	16	9,7	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	2,3	<0.01	3,9	0,028	0,0056	<0.001
INRS177	2,9	84	<0.0005	<0.0005	0,0025	<0.001	0,068	2	0,03	2	0,0018	0,0016	<0.001
INRS178	30	1,7	<0.0005	<0.0005	0,0045	<0.001	0,12	0,1	<0.01	11	0,029	0,0008	<0.001
INRS179	8,2	0,3	<0.0005	<0.0005	0,0093	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	0,72	0,001	<0.0005	<0.001
INRS180	25	0,61	<0.0005	<0.0005	0,0063	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	2,1	0,01	0,00052	<0.001
INRS181	0,98	88	<0.0005	<0.0005	0,0038	<0.001	<0.03	3,6	0,23	0,17	0,0019	<0.0005	<0.001
INRS182	180	87	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,36	0,4	0,2	110	0,24	<0.0005	<0.001
INRS183	13	1200	<0.0005	<0.0005	0,0073	<0.001	0,29	3	0,089	32	0,0034	0,0011	0,0085
INRS184	6,6	1,5	<0.0005	<0.0005	0,0033	<0.001	<0.03	1	<0.01	2,2	0,013	0,0036	<0.001
INRS185	8,6	42	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,051	1,7	0,011	5,3	0,0083	0,0037	<0.001
INRS186	8,3	13	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,12	0,4	0,046	2,7	0,018	<0.0005	<0.001
INRS187	3,4	33	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,093	1,7	0,032	2,1	0,0035	0,0011	0,0036
INRS188	32	1300	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,22	0,8	0,25	19	0,0068	0,0087	0,0012
INRS189	4,8	270	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,04	1,4	0,049	3,6	0,0029	0,00053	<0.001
INRS190	83	81	0,00068	<0.0005	0,19	<0.001	<0.03	0,4	0,016	41	0,0032	0,0043	0,0022
INRS191	66	21	<0.0005	0,00056	<0.0005	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	17	0,16	0,0017	0,0024
INRS192	6,7	52	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,8	0,2	1,7	0,0069	0,0035	<0.001
INRS193	34	37	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,19	0,3	0,076	25	0,017	<0.0005	<0.001
INRS194	52	39	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,36	0,3	<0.01	17	0,061	0,00082	<0.001
INRS195	19	10	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	1,3	<0.01	12	0,053	0,0024	<0.001
INRS196	85	110	0,0016	<0.0005	0,039	<0.001	<0.03	0,2	<0.01	12	0,0035	0,00094	0,0024
INRS197	85	13	<0.0005	<0.0005	0,0022	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	22	0,076	<0.0005	<0.001
INRS198	26	31	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	1,4	0,096	12	0,0048	<0.0005	<0.001
INRS199	81	5,3	<0.0005	0,0014	0,0047	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	19	0,88	0,002	0,014
INRS201	2,6	34	<0.0005	<0.0005	0,0033	<0.001	0,067	0,9	0,16	0,69	0,013	<0.0005	<0.001
INRS202	160	160	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,44	0,2	0,067	31	0,058	<0.0005	<0.001
INRS203	26	2,8	<0.0005	<0.0005	0,00079	0,0011	0,03	0,1	0,012	18	0,05	0,00056	<0.001
INRS204	160	18	<0.0005	<0.0005	0,0026	<0.001	1,2	<0.1	0,021	27	0,098	0,00093	0,0017
INRS205	99	38	<0.0005	<0.0005	0,0007	<0.001	1,4	<0.1	<0.01	9	0,18	0,00082	<0.001
INRS206	40	50	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	2,3	0,2	18	0,074	<0.0005	<0.001
INRS207	12	16	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,065	0,5	0,13	4,8	0,016	<0.0005	<0.001
INRS208	110	51	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,54	0,2	0,015	22	0,068	<0.0005	<0.001
INRS209	130	24	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	3,8	<0.1	0,031	26	0,53	0,00068	<0.001
INRS210	<0.05	64	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	0,012	0,00087	<0.0005	<0.001
INRS211	9,9	200	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,6	0,21	3,6	0,0067	<0.0005	<0.001
INRS212	36	88	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,083	0,2	0,053	3,7	0,11	0,0022	<0.001
INRS213	28	12	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	0,2	<0.01	12	0,03	0,00057	<0.001
INRS214	48	640	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,2	0,3	0,69	21	0,018	<0.0005	<0.001
INRS215	34	24	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,078	0,2	<0.01	9,5	0,15	0,00098	<0.001
INRS216	8	60	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,5	0,027	1,8	0,038	0,0015	<0.001

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Ca mg/L	Cl mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Sn mg/L	Fe mg/L	F mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
INRS217	55	31	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,98	0,2	0,021	16	0,12	0,00077	<0.001
INRS218	8,7	8,8	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,065	0,3	0,016	4,6	0,015	0,0075	<0.001
INRS219	42	22	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,82	<0.1	<0.01	12	0,17	<0.0005	<0.001
INRS220	0,15	19	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,7	<0.01	0,075	0,00044	0,00055	<0.001
INRS221	4,4	1,7	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,067	2,1	0,035	4,9	0,003	<0.0005	0,0068
INRS222	7,9	39	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,083	2,7	0,1	4,7	0,0061	<0.0005	<0.001
INRS223	5,8	40	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,045	1	0,075	3,7	0,012	<0.0005	<0.001
INRS224	0,79	100	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,055	5,1	0,24	0,22	0,0023	0,00092	<0.001
INRS225	49	8,2	<0.0005	<0.0005	0,003	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	4,2	0,0021	0,0019	0,0013
INRS226	91	52	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,6	0,2	0,014	44	0,19	0,0022	0,0032
INRS227	2,4	4,9	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,055	0,8	0,032	0,82	0,0055	0,00084	0,0032
INRS228	89	43	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,4	0,025	16	0,045	<0.0005	<0.001
INRS229	3,4	24	<0.0005	<0.0005	0,0046	<0.001	<0.03	1,3	0,064	2	0,0019	0,0011	<0.001
INRS230	2,7	19	<0.0005	<0.0005	0,00051	<0.001	<0.03	1,1	0,084	1,2	0,0041	0,0012	<0.001
INRS231	160	100	<0.0005	<0.0005	0,00086	<0.001	4,6	0,1	0,056	40	0,69	<0.0005	<0.001
INRS232	63	110	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,82	<0.1	<0.01	9,3	0,48	0,00077	<0.001
INRS233	57	48	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,1	0,1	0,02	20	0,37	<0.0005	<0.001
INRS234	100	150	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	5,3	0,2	0,029	23	0,56	<0.0005	<0.001
INRS235	3,8	7,4	0,0009	<0.0005	0,00056	<0.001	<0.03	2,3	0,049	1,5	0,0021	0,0017	<0.001
INRS236	50	26	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,076	0,2	<0.01	16	0,026	0,002	<0.001
INRS237	59	15	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,2	0,1	<0.01	12	0,66	0,0019	<0.001
INRS238	47	25	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	0,2	<0.01	16	0,026	0,0019	<0.001
INRS239	99	24	<0.0005	0,00055	<0.0005	<0.001	1,3	<0.1	0,027	37	0,53	0,00098	0,0013
INRS240	120	46	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,4	<0.1	0,011	28	0,3	<0.0005	<0.001
INRS241	88	57	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,46	0,1	0,073	35	0,1	<0.0005	<0.001
INRS242	65	9,5	<0.0005	<0.0005	0,011	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	20	0,0098	0,00078	<0.001
INRS243	48	0,7	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,2	0,1	<0.01	24	0,04	0,0031	<0.001
INRS244	90	40	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1	0,2	0,018	28	0,66	0,00075	<0.001
INRS245	65	4,5	<0.0005	<0.0005	0,0011	<0.001	0,041	0,1	0,023	16	0,18	0,0011	<0.001
INRS246	79	4,1	<0.0005	<0.0005	0,0058	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	10	0,0017	<0.0005	<0.001
INRS247	94	46	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,091	0,1	0,015	33	0,024	<0.0005	<0.001
INRS248	110	90	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,3	0,1	0,023	22	0,068	<0.0005	<0.001
INRS249	23	9	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,34	0,9	0,13	25	0,0081	<0.0005	<0.001
INRS250	130	200	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,1	0,1	0,011	58	0,047	0,00075	<0.001
INRS251	86	61	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,3	0,021	46	0,0059	<0.0005	<0.001
INRS252	190	9,5	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,24	1,3	0,048	82	0,0046	0,00075	<0.001
INRS253	99	32	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,3	0,3	0,017	64	0,04	<0.0005	<0.001
INRS254	170	260	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	5,6	0,1	0,034	32	0,36	<0.0005	0,0013
INRS255	55	1,8	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,22	0,1	<0.01	30	0,0061	<0.0005	<0.001
INRS256	46	20	<0.0005	<0.0005	0,00073	<0.001	0,15	0,3	0,13	17	0,045	<0.0005	<0.001
INRS257	120	560	<0.0005	<0.0005	0,001	<0.001	1,4	<0.1	<0.01	53	0,047	0,0011	<0.001
INRS258	56	13	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,17	0,6	<0.01	28	0,013	0,0016	<0.001
INRS259	23	1,6	<0.0005	<0.0005	0,0015	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	11	0,023	0,00054	<0.001
INRS260	45	3,9	<0.0005	<0.0005	0,00086	<0.001	0,21	<0.1	<0.01	8,8	0,076	0,0009	0,0011
INRS261	33	1,1	<0.0005	<0.0005	0,00055	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	5,1	0,15	<0.0005	<0.001
INRS262	72	36	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	25	0,026	0,0042	<0.001
INRS263	13	6,7	<0.0005	<0.0005	0,01	<0.001	0,3	<0.1	<0.01	3,3	0,033	<0.0005	<0.001
INRS264	42	4	<0.0005	<0.0005	0,0095	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	4,3	<0.0004	<0.0005	<0.001
INRS265	44	1,3	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,096	<0.1	<0.01	3,3	0,18	0,00052	<0.001
INRS266	21	5,9	<0.0005	<0.0005	0,18	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	4,3	0,01	<0.0005	0,0013
INRS267	27	0,4	<0.0005	<0.0005	0,012	<0.001	0,066	<0.1	<0.01	2,5	0,24	<0.0005	0,0042
INRS268	21	0,5	<0.0005	<0.0005	0,0046	<0.001	<0.03	0,2	<0.01	4,3	0,0096	0,0012	<0.001
INRS269	21	1,2	<0.0005	<0.0005	0,0039	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	1,1	0,00041	<0.0005	<0.001
INRS270	9,5	1,2	<0.0005	<0.0005	0,051	<0.001	<0.03	0,5	<0.01	4,7	0,0064	0,0016	<0.001
INRS271	6,1	110	<0.0005	<0.0005	0,0011	<0.001	0,069	0,6	0,032	7,4	0,0097	<0.0005	<0.001
INRS272	6,5	93	<0.0005	<0.0005	0,00074	<0.001	0,076	0,5	0,1	5,9	0,021	<0.0005	<0.001
INRS273	33	55	<0.0005	<0.0005	0,0073	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	4,4	0,0058	<0.0005	0,0013

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	Ca mg/L	Cl mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Sn mg/L	Fe mg/L	F mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
INRS274	6,6	0,86	<0.0005	<0.0005	0,027	<0.001	0,042	<0.1	<0.01	0,67	0,015	<0.0005	<0.001
INRS275	23	0,61	<0.0005	<0.0005	0,0054	<0.001	0,27	0,2	<0.01	4,9	0,046	0,00058	<0.001
INRS276	64	51	<0.0005	<0.0005	0,0026	<0.001	0,29	0,5	0,12	38	0,12	<0.0005	<0.001
INRS277	12	13	<0.0005	<0.0005	0,00086	<0.001	<0.03	0,5	0,099	6,2	0,011	<0.0005	<0.001
INRS278	33	24	<0.0005	<0.0005	0,001	<0.001	0,19	0,5	0,042	25	0,016	0,00059	<0.001
INRS279	6,8	94	<0.0005	<0.0005	0,0018	<0.001	<0.03	0,3	0,59	1,5	0,015	<0.0005	<0.001
INRS280	5,6	9,5	<0.0005	<0.0005	0,042	<0.001	<0.03	0,5	0,1	2,2	0,0054	0,0016	<0.001
INRS281	15	21	<0.0005	<0.0005	0,049	<0.001	<0.03	0,1	0,01	8,8	0,029	0,0064	0,0062
INRS282	38	4,2	<0.0005	<0.0005	0,035	<0.001	<0.03	<0.1	<0.01	3,6	0,03	<0.0005	<0.001
INRS283	48	12	<0.0005	<0.0005	0,0025	<0.001	0,28	0,1	0,022	12	0,12	<0.0005	<0.001
INRS284	27	27	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	1,2	0,19	14	0,014	<0.0005	0,0027
INRS285	110	91	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	4,3	0,1	<0.01	14	0,23	<0.0005	<0.001
INRS286	24	2,3	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,035	0,2	<0.01	15	0,037	0,0012	<0.001
INRS287(T5-B)	10	510	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,12	0,9	0,052	15	0,024	0,00062	<0.001
INRS288(S9-D)	70	2,4	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,1	0,1	<0.01	9,7	0,28	0,0082	0,0039
INRS289(S8-C)	16	3,1	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,033	0,7	<0.01	22	0,035	0,0074	<0.001
INRS290(T9-B)	84	24	<0.0005	0,00055	0,0013	<0.001	0,034	0,1	<0.01	12	0,52	0,0052	<0.001
INRS291(T2-A)	120	19	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,24	0,2	0,012	25	0,22	0,0077	0,0031
INRS292(X12)	140	8,4	<0.0005	0,0054	<0.0005	<0.001	3,4	0,2	0,019	16	2,2	0,0029	0,0051
INRS293	160	6,9	<0.0005	0,0087	<0.0005	<0.001	2,4	<0.1	0,01	12	2	0,00068	0,0041
INRS294(T6-E)	120	25	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,32	0,3	0,024	32	0,3	0,0066	<0.001
INRS295	29	5	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,095	0,2	0,011	8,9	0,2	0,0015	<0.001
INRS296(S03)	46	14	<0.0005	<0.0005	0,00094	<0.001	0,46	0,2	0,01	47	0,11	0,0053	<0.001
INRS300	18	45	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,2	0,034	3,2	0,067	0,0025	<0.001
INRS301	50	8,4	<0.0005	<0.0005	0,0012	<0.001	0,24	<0.1	<0.01	7,4	0,24	0,00093	<0.001
P01	15	920	0,0036	0,0012	0,0076	<0.001	0,041	1,6	0,3	11	0,011	0,0029	0,009
P02_ROC	28	2,1	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,28	0,3	<0.01	19	0,0092	0,0015	<0.001
P02_SED	87	3,5	<0.0005	0,0018	0,0013	<0.001	<0.1	0,2	<0.01	12	2,8	0,0011	0,0046
P03	310	340	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	1,2	0,8	0,2	17	0,36	0,015	<0.001
P04	26	2,1	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	2,3	0,2	<0.01	5,2	0,82	0,00063	<0.001
P05	10	23	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,9	0,049	5,1	0,0016	<0.0005	<0.001
P06	13	8,7	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,6	0,031	3,7	0,026	0,0074	0,0032
P07	1,3	48	0,0067	<0.0005	0,0027	<0.001	0,033	4,4	0,13	0,35	0,0045	0,0037	0,0049
P08	1200	6600	<0.0005	0,00058	<0.0005	<0.001	8,1	0,5	1,9	220	2,1	0,014	0,0032
P09	26	0,74	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,08	0,4	<0.01	12	0,034	0,0035	<0.001
P10	47	1,3	0,0009	0,00094	<0.0005	0,0028	<0.03	0,1	0,2	0,023	25	0,0027	0,0051
P11	7,7	1,5	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0,0014	0,079	0,6	<0.01	3,8	0,097	0,0028	<0.001
P12	2,5	140	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,8	0,013	2,9	0,00092	<0.0005	<0.001
P13	9,2	670	<0.0005	<0.0005	0,00083	<0.001	0,27	4,9	0,14	17	0,033	0,018	0,0025
P14_ROC	19	260	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,6	0,6	0,2	11	0,068	0,00087	<0.001
P14_SED	50	12	<0.0005	<0.0005	0,0013	<0.001	0,2	0,2	<0.01	12	0,17	0,003	<0.001
P15	0,86	0,74	0,0021	<0.0005	0,001	<0.001	<0.03	1,5	0,18	0,21	0,0026	0,0026	0,0014
P16	3,5	95	0,00081	<0.0005	0,00072	<0.001	0,16	0,8	0,01	1,9	0,0035	0,004	0,0052
P17	9,8	8,5	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,5	0,11	2,4	0,0043	<0.0005	<0.001
P18_ROC	27	230	0,00081	<0.0005	<0.0005	<0.001	2,3	0,5	0,056	13	0,21	0,0044	<0.001
P18_SED	46	25	0,00081	<0.0005	0,0052	0,0027	<0.1	0,2	<0.01	10	0,051	0,014	0,0037
P19	5	15	0,0029	<0.0005	<0.0005	0,0019	<0.03	0,5	<0.01	8,6	0,003	0,0024	0,0053
P20	11	0,69	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0,0017	0,14	0,4	<0.01	4,5	0,1	0,0073	<0.001
P21	55	66	<0.0005	<0.0005	0,00088	<0.001	0,42	0,1	<0.01	12	0,45	0,0025	0,0027
P22_ROC	18	1,2	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0,0075	0,2	0,2	<0.01	3,3	0,048	0,0037	<0.001
P22_SED	30	10	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.1	0,1	<0.01	5	0,086	0,00055	<0.001
P23	6,6	980	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,17	4	1,1	5,2	0,17	0,0028	0,0014
P24	27	14	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,11	0,2	<0.01	7,9	0,13	0,0014	0,0022
P25	43	2500	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0010	0,76	0,4	0,3	110	0,035	<0.0005	<0.001
PUITS_MSH	11	7,8	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	0,049	4	<0.01	2	0,0042	0,093	<0.001
RS01	630	2700	0,0011	<0.0005	<0.0005	<0.001	8,4	0,4	0,19	220	0,25	0,0063	0,0021
RS01_49'	360,4	5155	--	--	--	--	--	--	--	327,85	--	--	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Ca mg/L	Cl mg/L	Cr mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Sn mg/L	Fe mg/L	F mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L	Ni mg/L
RS01_59'	384,9	4719	--	--	--	--	--	--	--	278,65	--	--	--
RS01_75'	510,5	3586	--	--	--	--	--	--	--	275	--	--	--
RS02_32'	15,45	11	--	--	--	--	--	--	--	15,655	--	--	--
RS02_54'	28,905	11	--	--	--	--	--	--	--	27,74	--	--	--
RS02_ROC	7,2	39	<0.0005	<0.0005	0,0029	<0.001	0,052	0,3	<0.01	1,6	0,0069	0,066	0,0017
RS02_SED	29	24	0,00073	<0.0005	0,0006	<0.001	<0.03	0,5	<0.01	13	0,056	0,019	0,0012
RS04	22	1200	0,001	0,0009	0,001	0,02	0,048	0,7	<0.01	0,16	0,063	0,034	0,011
RS05_ROC	5,3	6,2	0,0016	<0.0005	0,00073	<0.001	0,59	1,7	0,021	2,2	0,014	0,0086	0,001
RS05_SED	20	6,4	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0,0039	0,16	0,6	<0.01	6,4	0,11	0,06	<0.001
SOURCE_MSH	6,1	0,93	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	3,3	0,00058	0,00081	<0.001
X07	92	9,9	0,0016	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.03	0,1	<0.01	14	0,17	0,017	0,017
X22	87	17	<0.0005	0,002	<0.0005	<0.001	2,9	<0.1	<0.01	8,2	1,4	0,0034	0,016
X23	90	7,5	<0.0005	0,00083	0,0023	0,001	<0.1	0,2	0,01	10	0,88	0,029	0,013
X24	160	48	<0.0005	0,0012	<0.0005	<0.001	1	0,1	0,016	62	0,075	0,015	0,041

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	NO ₂ -NO ₃ mg/L	P _{ino} mg/L	Pb mg/L	K mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Na mg/L	Sr mg/L	SO ₄ mg/L	S ⁴⁺ mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L
INRS101	<0.02	<0.03	<0.0001	3,3	<0.001	11	41	1,4	49	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS102	<0.02	<0.03	0,00018	1,4	<0.001	7	38	0,54	15	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS103	<0.02	<0.03	<0.0001	16	<0.001	9,7	35	2,5	99	<0.02	<0.001	0,0015	<0.002
INRS105	3,3	<0.03	0,0021	0,78	<0.001	4,7	27	2,9	74	<0.02	<0.001	0,0018	<0.002
INRS106	<0.02	<0.03	0,00084	0,84	<0.001	3,3	61	0,39	27	0,15	<0.001	<0.001	<0.002
INRS107	<0.02	0,03	0,00012	0,47	<0.001	3,8	190	2,1	50	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS108	4,7	<0.03	0,0013	2,1	<0.001	3	44	0,25	22	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS109	<0.02	<0.03	<0.0001	0,48	<0.001	5,7	53	1,8	18	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS110	<0.02	<0.03	<0.0001	1	<0.001	8,6	20	0,99	13	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS111	<0.02	<0.03	<0.0001	3,2	<0.001	7,9	80	3,6	160	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS112	<0.02	<0.03	0,00016	0,55	<0.001	4,1	80	1,4	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS113	<0.02	0,11	<0.0001	1,9	<0.001	3,7	290	0,24	0,5	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS114	<0.02	1,1	<0.0001	5,6	<0.001	4,2	400	0,49	0,2	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS115	<0.02	<0.03	0,00011	0,23	<0.001	3,1	38	1,9	34	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS116	<0.02	<0.03	<0.0001	0,28	<0.001	2,8	58	0,41	29	<0.02	<0.001	0,0019	<0.002
INRS117	<0.02	<0.03	<0.0001	1,2	<0.001	5,1	100	0,019	21	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS118	<0.02	<0.03	0,00035	0,54	<0.001	3,3	130	2,3	130	<0.02	<0.001	0,0018	<0.002
INRS119	<0.02	<0.03	0,00041	0,21	<0.001	4,8	14	2,5	23	<0.02	<0.001	0,0011	<0.002
INRS120	<0.02	<0.03	<0.0001	0,42	<0.001	6,3	8,9	0,36	13	<0.02	<0.001	0,0017	<0.002
INRS121	0,03	<0.03	0,0002	0,17	<0.001	3,8	2,5	0,079	7,9	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS122	<0.02	<0.03	<0.0001	1,2	<0.001	6	31	0,8	41	<0.02	<0.001	0,0045	<0.002
INRS123	<0.02	<0.03	0,00023	0,6	<0.001	4	120	1,6	190	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS124	0,05	<0.03	<0.0001	0,97	<0.001	5,3	11	0,31	54	<0.02	<0.001	0,0037	<0.002
INRS125	<0.02	<0.03	0,00011	0,57	<0.001	4,1	23	1,5	8,8	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS126	<0.02	<0.03	0,00021	0,39	<0.001	3,7	36	1,4	9,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS127	<0.2	0,05	0,00013	9,8	<0.001	8,4	720	2,8	33	<0.04	<0.001	<0.001	<0.002
INRS128	<0.02	0,7	<0.0001	8,5	<0.001	4,9	730	1,4	0,8	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS129	<0.02	1,4	<0.0001	12	<0.001	8,6	440	0,63	0,2	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS130	<0.02	0,23	<0.0001	16	<0.001	5	150	0,91	0,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS131	<0.02	0,15	0,00049	15	<0.001	6,4	52	1,1	0,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS132	<0.02	0,7	<0.0001	3,6	<0.001	8,2	48	0,25	<0.1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS133	0,08	1,7	<0.0001	5,6	<0.001	6,2	300	0,58	<0.1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS134	<0.02	<0.03	<0.0001	4,7	<0.001	4,8	29	0,48	47	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS135	<0.02	<0.03	<0.0001	5,6	<0.001	3,5	22	0,85	46	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS136	<0.02	<0.03	<0.0001	2	<0.001	5,8	54	0,82	55	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS137	<0.02	<0.03	<0.0001	1,1	<0.001	7,5	49	0,28	130	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS138	<0.02	<0.03	0,00028	1,5	<0.001	5,1	21	0,66	73	<0.02	<0.001	0,0029	<0.002
INRS139	0,07	<0.03	0,0002	0,96	<0.001	8,9	14	0,66	18	<0.02	<0.001	0,0034	<0.002
INRS140	<0.02	<0.03	<0.0001	0,69	<0.001	5,7	32	3,8	26	0,12	<0.001	<0.001	<0.002
INRS141	<0.02	<0.03	<0.0001	0,97	<0.001	7,7	28	2,1	42	0,04	<0.001	<0.001	<0.002
INRS142	0,33	<0.03	<0.0001	1,4	<0.001	7,1	16	0,57	23	<0.02	<0.001	0,0012	<0.002
INRS143	0,08	<0.03	0,00011	1	<0.001	6,4	24	0,95	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS144	1,5	<0.03	0,00018	5,2	<0.001	5,6	22	0,55	30	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002
INRS145	1,5	<0.03	<0.0001	2,6	<0.001	5,7	75	1,7	85	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS146	<0.02	<0.03	<0.0001	6,4	<0.001	10	52	2,6	100	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS147	<0.02	<0.03	<0.0001	0,55	<0.001	7,4	7	0,46	17	<0.02	<0.001	0,008	<0.002
INRS148	<0.02	0,11	<0.0001	0,92	<0.001	6,2	7,9	0,38	33	<0.02	<0.001	0,0033	<0.002
INRS149	<0.02	<0.03	<0.0001	2,8	<0.001	5,9	17	0,8	23	<0.04	<0.001	<0.001	<0.002
INRS150	0,04	<0.03	0,0003	1,1	<0.001	6	12	1	9,5	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002
INRS151	7,7	<0.03	0,0023	3	<0.001	2,4	6,3	0,16	11	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS152	0,97	<0.03	0,00026	0,85	<0.001	6	6,6	0,57	24	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS153	<0.2	<0.03	0,00011	0,39	<0.001	3,9	130	0,87	38	<0.02	<0.001	0,0078	<0.002
INRS154	<0.02	0,03	0,00013	0,38	<0.001	5,5	32	0,22	76	<0.02	<0.001	0,0031	<0.002
INRS155	<0.2	<0.03	<0.0001	1,4	<0.001	6	50	0,68	33	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS156	<0.02	<0.03	<0.0001	0,47	<0.001	5,9	3,5	0,085	12	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS157	0,45	<0.03	0,00031	1,1	<0.001	3,9	6,6	0,14	13	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS158	0,57	<0.03	0,00069	1,1	<0.001	1,4	8	0,11	8,8	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	NO ₂ -NO ₃ mg/L	P _{ino} mg/L	Pb mg/L	K mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Na mg/L	Sr mg/L	SO ₄ mg/L	S ²⁻ mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L
INRS159	<0.2	<0.03	<0.0001	4	<0.001	11	88	0,49	52	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS160	<0.02	<0.03	0,00022	0,63	<0.001	5,1	4,4	0,24	12	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS161(X21)	0,29	<0.03	<0.0001	7,9	<0.001	4,1	66	0,71	43	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS162	<0.02	0,12	<0.0001	1,2	<0.001	4,2	17	0,34	8	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS163	0,11	<0.03	0,00011	0,38	<0.001	4	8,8	0,28	5,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS164	<0.02	<0.03	0,00011	0,62	<0.001	6,4	8,9	0,56	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS165	2,2	<0.03	0,0002	1,1	<0.001	6,8	9	0,47	16	<0.02	<0.001	0,0011	<0.002
INRS166	3,1	<0.03	0,00025	0,64	0,0019	6,8	8,3	0,62	25	<0.02	<0.001	0,02	<0.002
INRS167	0,19	<0.03	0,00039	0,21	<0.001	1,9	0,89	0,27	18	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS168	0,48	<0.03	0,00011	0,6	<0.001	6,6	2,9	0,099	6,8	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS169	0,08	<0.03	<0.0001	0,52	<0.001	3,7	31	0,9	30	0,19	<0.001	0,04	<0.002
INRS170	1,1	<0.03	0,00056	2	<0.001	7,7	2,2	0,18	9	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS171	<0.02	<0.03	<0.0001	0,44	<0.001	3,9	9,1	0,22	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS172	<0.02	<0.03	<0.0001	0,58	<0.001	7	5,8	0,51	22	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS173	0,65	<0.03	0,00024	0,36	<0.001	4,5	1,8	0,14	11	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS174	<0.02	<0.03	0,00039	0,69	<0.001	6,1	7,6	0,25	13	<0.02	<0.001	0,0023	<0.002
INRS175	<0.02	<0.03	<0.0001	0,71	<0.001	7,1	11	0,68	14	0,1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS176	<0.02	<0.03	0,00022	1,4	<0.001	7,7	49	0,3	28	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS177	<0.02	0,34	<0.0001	3,3	<0.001	3,9	260	0,22	0,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS178	<0.02	<0.03	<0.0001	0,51	<0.001	6,4	6,1	0,74	9,2	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002
INRS179	0,15	<0.03	<0.0001	0,21	<0.001	1,9	0,48	0,056	3,9	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS180	0,37	<0.03	<0.0001	0,35	<0.001	5,1	1,6	0,15	9,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS181	<0.02	<0.03	<0.0001	1,7	<0.001	4,3	240	0,11	2,7	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS182	<0.02	<0.03	<0.0001	23	<0.001	7	380	9,1	860	8,7	<0.001	<0.001	<0.002
INRS183	<0.2	<0.03	<0.0001	24	<0.001	4,1	1200	1,9	66	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS184	<0.02	<0.03	<0.0001	1,4	<0.001	6,3	39	0,1	23	<0.02	<0.001	0,0012	<0.002
INRS185	<0.02	0,37	<0.0001	8,9	<0.001	4,7	250	0,55	150	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS186	<0.02	<0.03	<0.0001	0,92	<0.001	5,9	200	0,084	29	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS187	<0.4	0,35	<0.0001	3,1	<0.001	3,8	300	0,24	0,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS188	<0.1	<0.03	<0.0001	17	<0.001	3,8	1200	2,9	56	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS189	<0.02	0,4	<0.0001	5,7	<0.001	3,7	400	0,74	1,7	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS190	0,97	<0.03	<0.0001	14	<0.001	6,1	97	0,44	61	<0.02	<0.001	0,0084	<0.002
INRS191	1,8	<0.03	0,00018	8,5	<0.001	4	13	0,62	62	<0.02	<0.001	0,0023	<0.002
INRS192	0,85	<0.03	0,00035	4	<0.001	3,9	170	0,35	92	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS193	<0.02	0,12	<0.0001	7,6	<0.001	7,1	98	6,8	2,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS194	<0.02	<0.03	<0.0001	0,53	<0.001	6,7	19	0,7	16	<0.02	<0.001	0,0019	<0.002
INRS195	<0.02	<0.03	<0.0001	1,1	<0.001	5,9	62	0,46	23	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS196	0,14	<0.03	0,00042	2,5	<0.001	4,8	16	0,82	46	<0.02	<0.001	0,0012	<0.002
INRS197	0,11	<0.03	0,00019	2,5	<0.001	8,5	17	2,4	49	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS198	<0.02	<0.03	0,00011	0,77	<0.001	7,2	97	3	14	1,8	<0.001	<0.001	<0.002
INRS199	0,79	<0.03	<0.0001	3,1	<0.001	6,7	10	1,4	48	<0.02	<0.001	0,0036	<0.002
INRS201	<0.02	0,13	0,00033	0,52	<0.001	3,7	130	0,37	16	0,59	0,0016	<0.001	0,0023
INRS202	<0.2	<0.03	<0.0001	3	<0.001	9,4	72	4,1	110	0,67	<0.001	<0.001	<0.002
INRS203	0,03	<0.03	0,0001	4	<0.001	6,2	78	2,7	48	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS204	<0.02	<0.03	<0.0001	4,2	<0.001	8,9	12	2,3	43	<0.02	<0.001	0,0013	<0.002
INRS205	<0.02	0,08	<0.0001	1,1	<0.001	8	8,9	0,95	36	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS206	<0.02	0,05	<0.0001	5,6	<0.001	5,9	120	3	41	7,1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS207	<0.02	<0.03	<0.0001	3,9	<0.001	4,4	84	1,6	2,3	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS208	<0.02	<0.03	<0.0001	2,4	<0.001	9,5	21	2,8	97	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS209	<0.02	0,04	<0.0001	3,7	<0.001	5,7	28	2,1	150	<0.1	<0.001	0,0011	<0.002
INRS210	<0.02	<0.03	0,00011	0,11	<0.001	10	140	<0.002	51	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS211	<0.02	<0.03	<0.0001	1	<0.001	4,3	230	1,8	53	3,8	<0.001	<0.001	<0.002
INRS212	<0.02	<0.03	<0.0001	1,7	<0.001	5,9	91	1,3	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS213	<0.02	<0.03	0,00014	0,73	<0.001	6,9	9,7	1,2	20	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS214	<0.02	<0.03	0,00017	0,96	<0.001	5,2	330	9,3	1,3	0,14	<0.001	<0.001	<0.002
INRS215	<0.02	0,11	0,00025	4,1	<0.001	8,2	44	2,8	24	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS216	<0.02	<0.03	<0.0001	1,2	<0.001	5,3	170	1,1	140	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	NO ₂ -NO ₃ mg/L	P _{ino} mg/L	Pb mg/L	K mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Na mg/L	Sr mg/L	SO ₄ mg/L	S ²⁻ mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L
INRS217	<0.02	<0.03	<0.0001	2,5	<0.001	7	51	1,3	46	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS218	<0.02	<0.03	0,00032	0,31	<0.001	4,2	60	1,5	23	0,08	<0.001	<0.001	<0.002
INRS219	<0.02	0,07	0,00012	2,5	<0.001	8,5	21	1,2	0,4	<0.04	0,0019	<0.001	<0.002
INRS220	<0.02	0,38	0,00018	2,2	<0.001	5,2	190	0,0029	1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS221	<0.02	0,06	0,00025	4	<0.001	3,5	180	0,29	0,2	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS222	<0.02	0,06	<0.0001	2,2	<0.001	5	190	0,41	7	<0.04	<0.001	<0.001	<0.002
INRS223	<0.02	<0.03	0,00018	3,3	<0.001	5,2	220	0,41	6,8	--	<0.001	<0.001	<0.002
INRS224	<0.02	<0.03	0,00019	1,8	<0.001	3,8	310	0,079	0,8	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS225	0,21	<0.03	0,00047	1,1	0,0011	5,2	6,4	0,6	13	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS226	<0.02	<0.03	<0.0001	4,2	<0.001	9,7	27	0,66	76	<0.02	<0.001	0,0012	<0.002
INRS227	<0.02	0,03	0,00011	1,3	<0.001	4,2	80	0,085	25	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS228	<0.02	<0.03	<0.0001	3,1	<0.001	6,2	53	1,5	75	0,39	<0.001	<0.001	<0.002
INRS229	<0.02	0,06	0,00011	1,9	<0.001	3,4	87	0,18	<0.5	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS230	<0.02	0,04	<0.0001	1,8	<0.001	4	120	0,15	3,2	0,72	<0.001	<0.001	<0.002
INRS231	<0.02	<0.03	<0.0001	6	<0.001	9,9	58	5,2	110	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS232	<0.02	0,04	<0.0001	1,5	<0.001	6,5	44	0,52	60	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS233	<0.02	<0.03	<0.0001	2,1	<0.001	12	18	1,3	88	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS234	<0.02	<0.03	<0.0001	1,9	<0.001	8,7	61	2,2	56	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS235	<0.02	<0.03	<0.0001	1,2	<0.001	3,7	87	0,19	7,8	--	<0.001	<0.001	<0.002
INRS236	<0.02	<0.03	<0.0001	2,1	<0.001	6,3	31	1,2	66	<0.02	<0.001	0,0036	<0.002
INRS237	<0.02	<0.03	<0.0001	1,4	<0.001	5,4	8,6	0,61	90	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS238	<0.02	<0.03	<0.0001	2,1	<0.001	6,4	33	1,1	64	<0.02	<0.001	0,0039	<0.002
INRS239	<0.02	<0.03	<0.0001	5,7	<0.001	7	27	1,8	120	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS240	<0.02	<0.03	<0.0001	2,9	<0.001	7	21	0,83	120	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS241	<0.02	<0.03	<0.0001	4,9	<0.001	7	35	9,3	33	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS242	0,6	<0.03	0,0011	0,65	<0.001	3,8	5,8	0,22	27	<0.02	<0.001	0,0016	<0.002
INRS243	<0.02	<0.03	<0.0001	1,6	<0.001	4,7	6,4	0,29	27	<0.02	<0.001	0,012	<0.002
INRS244	0,02	<0.03	<0.0001	2,4	<0.001	6,6	37	1,2	61	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS245	0,14	<0.03	0,00013	0,95	<0.001	7,6	7,9	0,91	51	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS246	1,4	<0.03	0,00032	1,2	<0.001	5,2	3,8	0,65	29	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS247	<0.02	<0.03	<0.0001	1,9	<0.001	7	23	4,6	73	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS248	<0.2	<0.03	<0.0001	1,6	<0.001	7,9	43	1,9	67	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS249	<0.02	<0.03	<0.0001	3,3	<0.001	6,4	47	4,4	0,9	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS250	<0.2	<0.03	<0.0001	2,7	<0.001	8,6	70	5,7	190	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS251	<0.02	<0.03	<0.0001	3,6	<0.001	6,7	33	7,6	130	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS252	<0.02	<0.03	<0.0001	3,9	<0.001	4,5	60	9,8	630	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS253	<0.02	<0.03	<0.0001	11	<0.001	8,8	20	4,7	180	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS254	<0.2	<0.03	<0.0001	2,5	<0.001	10	140	2,7	36	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS255	<0.02	<0.03	0,0001	4,8	<0.001	3,8	17	0,47	53	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS256	<0.02	<0.03	<0.0001	5,1	<0.001	5,8	61	4,5	0,4	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS257	<0.02	<0.03	<0.0001	2,2	<0.001	7,7	310	0,72	560	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS258	<0.02	<0.03	<0.0001	2,3	<0.001	6,8	24	14	<1	0,09	<0.001	<0.001	<0.002
INRS259	<0.02	<0.03	0,00016	0,55	<0.001	5,2	16	2,3	18	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS260	<0.02	<0.03	<0.0001	0,54	<0.001	4,5	4,6	0,38	36	0,09	<0.001	0,0016	<0.002
INRS261	<0.02	<0.03	<0.0001	0,51	<0.001	5,1	5,2	0,87	17	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002
INRS262	0,35	<0.03	<0.0001	4,4	<0.001	6,4	17	1,2	0,35	<0.02	<0.001	0,0025	<0.002
INRS263	0,53	<0.03	<0.0001	0,39	<0.001	6,4	2,7	0,091	6,4	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS264	1,3	<0.03	0,0003	0,61	<0.001	4,6	4,2	0,27	13	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS265	<0.02	<0.03	<0.0001	0,57	<0.001	5,9	4	0,45	17	<0.02	<0.001	0,02	<0.002
INRS266	3,4	<0.03	0,00048	1,2	<0.001	3,9	3,7	0,18	8,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS267	<0.02	<0.03	<0.0001	0,2	<0.001	5,9	1,6	0,12	21	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS268	0,08	<0.03	0,00021	0,25	<0.001	4,9	2,9	0,12	14	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS269	0,04	<0.03	0,0002	0,52	<0.001	4	1,5	0,045	5,6	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS270	<0.02	<0.03	<0.0001	0,83	<0.001	5,3	36	0,86	16	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS271	<0.02	1,5	<0.0001	8,2	<0.001	6,3	170	0,44	0,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS272	<0.02	1,1	<0.0001	9,3	<0.001	6,2	170	0,73	0,4	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS273	0,41	<0.03	<0.0001	0,83	<0.001	6,1	42	0,24	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	NO ₂ -NO ₃ mg/L	P _{ino} mg/L	Pb mg/L	K mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Na mg/L	Sr mg/L	SO ₄ mg/L	S ⁶⁺ mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L
INRS274	0,2	<0.03	<0.0001	0,21	<0.001	3,4	0,96	0,036	5,6	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS275	<0.02	<0.03	<0.0001	0,99	<0.001	6,2	5,1	0,32	16	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS276	<0.02	0,25	<0.0001	8,6	<0.001	8,4	99	2,7	28	0,09	<0.001	<0.001	<0.002
INRS277	<0.02	0,21	<0.0001	5	<0.001	5	77	1,8	0,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS278	<0.02	<0.03	<0.0001	4,9	<0.001	7,5	71	1,9	3,7	0,11	<0.001	<0.001	<0.002
INRS279	<0.02	<0.03	<0.0001	3,1	<0.001	5,4	300	0,88	70	0,31	<0.001	<0.001	<0.002
INRS280	<0.02	0,04	<0.0001	1,7	<0.001	5,1	84	0,43	6,2	2	<0.001	<0.001	<0.002
INRS281	1,6	<0.03	<0.0001	0,41	<0.001	4,1	91	2,2	22	<0.02	<0.001	0,0042	<0.002
INRS282	0,76	<0.03	<0.0001	5	<0.001	4,4	20	0,45	15	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS283	<0.02	<0.03	<0.0001	2,3	<0.001	8,8	58	4,8	38	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS284	<0.02	0,05	<0.0001	5,4	<0.001	8,7	80	3,6	12	3,1	<0.001	<0.001	<0.002
INRS285	0,04	<0.03	<0.0001	5,3	<0.001	12	83	2,8	38	<0.04	<0.001	<0.001	<0.002
INRS286	<0.02	0,25	0,00013	7,3	<0.001	7,1	16	1,2	20	0,13	<0.001	<0.001	<0.002
INRS287(T5-B)	<0.2	1,9	<0.0001	15	<0.001	7,6	630	0,8	2,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS288(S9-D)	0,04	<0.03	0,0002	4,6	<0.001	6,9	8,5	1,8	7,3	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS289(S8-C)	0,04	1,7	0,00011	14	<0.001	8,1	130	0,65	1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS290(T9-B)	0,08	<0.03	<0.0001	8,1	<0.001	5	7,9	1,1	71	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002
INRS291(T2-A)	<0.02	<0.03	<0.0001	4,3	<0.001	8,3	17	1,4	63	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS292(X12)	0,03	<0.03	0,00015	48	<0.001	12	8,9	1,2	34	<0.02	<0.001	0,0011	<0.002
INRS293	<0.02	<0.03	<0.0001	10	<0.001	10	7,6	0,99	23	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS294(T6-E)	<0.02	<0.03	0,00012	8,5	<0.001	12	29	3,3	64	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS295	<0.02	<0.03	<0.0001	2,5	<0.001	5,7	50	1,1	19	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS296(S03)	0,36	0,6	0,00048	19	<0.001	15	18	0,54	22	<0.02	0,016	<0.001	0,0026
INRS300	<0.02	<0.03	<0.0001	1,3	<0.001	5,1	98	0,91	63	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
INRS301	<0.02	0,03	0,00043	0,8	<0.001	7,4	6,7	0,85	48	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
P01	<0.4	<0.03	0,00022	8,6	<0.001	4,1	850	2,6	190	<0.1	<0.001	<0.001	<0.002
P02_ROC	0,04	<0.03	<0.0001	1,1	<0.001	8,6	5,5	0,44	20	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P02_SED	0,08	<0.03	<0.0001	9,6	<0.001	8,8	9	0,62	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P03	<0.02	<0.03	0,00014	8,6	<0.001	4,4	630	5,7	1500	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P04	<0.02	<0.03	<0.0001	2,3	<0.001	3,8	2,3	0,46	2,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P05	<0.02	<0.03	<0.0001	0,74	<0.001	2,9	16	1,8	1,9	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P06	0,02	<0.03	0,00015	2	<0.001	4,4	97	1,1	35	<0.5	<0.001	0,0015	<0.002
P07	<0.02	0,04	0,0003	2,5	<0.001	3,9	280	0,067	8,3	<0.1	<0.001	0,001	0,013
P08	<0.02	<0.03	0,00032	48	<0.001	5,1	3900	26	1700	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P09	<0.02	<0.03	0,00013	0,99	<0.001	6,4	9,9	0,6	16	<0.02	<0.001	0,0022	<0.002
P10	<0.02	<0.03	<0.0001	1,4	<0.001	4,6	2,2	0,2	25	<0.02	<0.001	0,0054	<0.002
P11	<0.02	<0.03	<0.0001	1,1	<0.001	1	14	0,21	17	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P12	<0.04	0,5	<0.0001	3,8	<0.001	2	110	0,15	35	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P13	<0.4	<0.03	<0.0001	11	<0.001	3,4	700	1,5	3,1	<0.02	<0.001	0,0018	<0.002
P14_ROC	<0.2	0,5	<0.0001	4,5	<0.001	6,5	380	0,83	<1	<0.1	<0.001	<0.001	0,0052
P14_SED	0,04	0,2	<0.0001	1,2	<0.001	7,1	5	0,17	32	<0.1	<0.001	<0.001	0,0049
P15	<0.02	0,04	0,00028	0,83	<0.001	4,2	110	0,12	23	<0.5	<0.001	<0.001	0,0035
P16	<0.4	<0.03	0,0002	1,3	<0.001	4,2	180	0,36	42	<0.02	<0.001	0,0013	<0.002
P17	<0.02	0,08	<0.0001	1,6	<0.001	1,1	25	0,9	1,1	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P18_ROC	<0.2	<0.03	<0.0001	1,2	<0.001	1,7	170	2,2	7,7	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P18_SED	<0.02	0,04	<0.0001	2	<0.001	6,5	10	0,36	13	<0.1	<0.001	<0.001	0,0028
P19	0,02	<0.03	0,00015	7,1	<0.001	3,7	76	0,16	84	<0.02	<0.001	<0.001	0,0022
P20	<0.02	<0.03	<0.0001	3,8	<0.001	2,8	29	0,19	14	<0.1	<0.001	0,0012	<0.002
P21	<0.02	<0.03	<0.0001	3,5	<0.001	4,7	10	0,7	30	<0.02	<0.001	0,0014	<0.002
P22_ROC	<0.02	<0.03	<0.0001	1,5	<0.001	4	11	0,3	5,6	<0.02	<0.001	<0.001	0,0029
P22_SED	0,04	0,04	<0.0001	0,53	<0.001	4,6	4,7	0,24	14	<0.1	<0.001	<0.001	0,0058
P23	<0.02	<0.03	<0.0001	5,3	<0.001	2	900	1,8	13	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
P24	<0.02	<0.03	0,00026	0,48	<0.001	6,8	4,6	0,31	5,6	<0.1	<0.001	0,0043	<0.002
P25	<2	0,33	0,00034	49	<0.001	5,8	2200	4,3	11	<0.2	<0.01	<0.001	<0.002
PUITS_MSH	<0.02	<0.03	<0.0001	2	<0.001	5	56	2	39	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
RS01	<1	<0.03	<0.0001	72	<0.001	7,2	2200	11	3500	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
RS01_49'	--	--	--	100,35	--	--	4062,5	7,005	3354	--	--	--	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	NO ₂ -NO ₃ mg/L	P _{ino} mg/L	Pb mg/L	K mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Na mg/L	Sr mg/L	SO ₄ mg/L	S ⁴⁺ mg/L	Ti mg/L	U mg/L	V mg/L
RS01_59'	--	--	--	106,1	--	--	3703	7,703	3501	--	--	--	--
RS01_75'	--	--	--	114,8	--	--	3262,5	9,293	3624	--	--	--	--
RS02_32'	--	--	--	16,445	--	--	290,7	0,271	292	--	--	--	--
RS02_54'	--	--	--	21,555	--	--	375,25	0,599	456	--	--	--	--
RS02_ROC	0,41	4,1	0,00042	2,2	<0.001	1,7	72	0,14	38	<0.02	<0.001	0,0018	<0.002
RS02_SED	<0.02	0,7	<0.0001	8	<0.001	7,2	97	0,63	8,5	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
RS04	<0.04	3,8	0,00028	15	<0.001	6	980	1,3	2,3	<0.02	<0.001	0,0011	<0.002
RS05_ROC	0,04	3,1	0,00041	1,7	<0.001	5,2	120	0,23	13	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
RS05_SED	<0.02	<0.03	<0.0001	2	<0.001	5,3	95	0,41	190	<0.1	<0.001	0,0021	<0.002
SOURCE_MSH	0,07	<0.03	<0.0001	1	<0.001	6	1,9	0,11	7,9	<0.02	<0.001	<0.001	<0.002
X07	0,06	<0.03	<0.0001	1,1	<0.001	3	6,1	0,79	110	<0.02	<0.001	0,057	<0.002
X22	0,28	<0.03	<0.0001	1,9	<0.001	5,8	20	0,64	21	<0.02	<0.001	<0.001	0,0037
X23	16	<0.03	<0.0001	2,4	<0.001	9	4,8	0,68	34	<0.02	<0.001	0,0014	0,0025
X24	0,12	<0.03	0,00031	4,1	<0.001	12	48	0,5	<0.5	<0.02	<0.001	0,0048	0,0032

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	Zn mg/L	CID mg/L	COD mg/L	NTD mg/L	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	3H TU	14C Ans - BP	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
INRS101	0,0013	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS102	0,0025	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS103	0,0035	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS105	0,0033	--	--	--	-75,4778	-10,8027	10,2	--	--
INRS106	0,0083	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS107	0,0021	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS108	0,013	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS109	<0.001	--	--	--	-72,0129	-11,0227	7,4	8820	-15,9
INRS110	<0.001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS111	<0.001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS112	0,0044	--	--	--	-71,7841	-10,8781	--	--	--
INRS113	<0.001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS114	<0.001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS115	0,011	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS116	0,0027	--	--	--	-67,6708	-9,6048	--	--	--
INRS117	0,0057	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS118	0,0068	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS119	0,0086	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS120	0,0078	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS121	0,015	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS122	0,0099	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS123	0,024	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS124	0,0073	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS125	0,005	--	--	--	-75,9805	-11,0810	--	--	--
INRS126	0,017	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS127	0,027	--	--	--	-67,7573	-9,3552	--	290	-12,5
INRS128	<0.001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS129	<0.001	--	--	--	-69,4985	-10,2817	--	9360	-18,5
INRS130	0,012	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS131	0,027	--	--	--	-69,3158	-10,0403	--	4020	-16
INRS132	0,025	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS133	0,013	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS134	0,013	58,5	<2.0	0,09	--	--	--	--	--
INRS135	0,017	56,0	2,2	0,08	--	--	--	--	--
INRS136	0,011	54,0	3,8	0,12	--	--	--	--	--
INRS137	0,029	99,1	4,6	0,08	--	--	--	--	--
INRS138	0,021	51,6	2,6	0,12	--	--	--	--	--
INRS139	0,013	51,3	<2.0	0,14	-79,5294	-11,7505	--	--	--
INRS140	0,011	34,2	<2.0	0,03	--	--	--	--	--
INRS141	0,011	23,1	3,0	0,02	-82,1966	-12,0837	--	--	--
INRS142	0,013	--	--	--	-77,4877	-11,3137	--	--	--
INRS143	0,019	--	--	--	-82,9828	-12,5658	6,5	10120	-11,9
INRS144	0,028	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS145	0,031	84,1	4,1	1,45	--	--	--	--	--
INRS146	0,014	90,4	4,2	0,30	--	--	--	--	--
INRS147	0,012	45,9	<2.0	0,02	--	--	--	--	--
INRS148	0,011	38,3	<2.0	0,06	--	--	--	--	--
INRS149	0,017	--	--	--	-75,6953	-11,2488	7,4	--	--
INRS150	0,006	41,8	3,3	0,19	--	--	--	--	--
INRS151	0,018	25,0	10,3	7,39	--	--	--	--	--
INRS152	0,008	38,7	<2.0	1,02	--	--	--	--	--
INRS153	0,0045	42,5	<2.0	0,08	--	--	--	--	--
INRS154	0,017	39,8	<2.0	0,14	--	--	--	--	--
INRS155	0,0072	74,2	<2.0	0,09	-75,7458	-11,6287	9	3160	-18,2
INRS156	0,0076	17,5	13,7	0,02	--	--	--	--	--
INRS157	0,009	39,6	13,1	0,52	--	--	--	--	--
INRS158	0,78	15,7	11,6	0,74	--	--	--	--	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	Zn mg/L	CID mg/L	COD mg/L	NTD mg/L	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	3H TU	14C Ans - BP	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
INRS159	0,028	137,4	19,2	0,49	--	--	--	--	--
INRS160	0,0089	21,1	7,2	0,05	--	--	--	--	--
INRS161(X21)	0,0095	30,5	7,9	1,74	--	--	--	--	--
INRS162	0,009	27,9	1,8	0,55	-77,3760	-11,9749	3,1	11460	-16,1
INRS163	0,024	11,2	1,2	0,15	--	--	--	--	--
INRS164	0,0064	33,0	1,1	0,09	-83,1141	-12,4978	10,0	4390	-18
INRS165	0,011	51,6	1,4	2,10	--	--	--	--	--
INRS166	0,017	41,1	<1,0	2,60	--	--	--	--	--
INRS167	0,029	16,5	1,3	0,22	--	--	--	--	--
INRS168	0,0066	20,3	<1,0	0,40	--	--	--	--	--
INRS169	0,0016	25,8	<1,0	0,11	-71,7423	-11,5416	4,9	11800	-15,5
INRS170	0,02	39,5	<1,0	1,03	--	--	--	--	--
INRS171	0,018	23,1	<1,0	0,04	--	--	--	--	--
INRS172	0,009	31,9	<1,0	0,03	-82,9821	-12,9660	--	--	--
INRS173	0,023	21,0	<1,0	0,61	-88,6517	-13,1449	12,5	3070	-14,6
INRS174	0,0065	31,4	<1,0	0,02	--	--	--	--	--
INRS175	0,0072	29,0	<1,0	0,04	-76,2976	-12,3649	--	--	--
INRS176	0,013	27,6	0,3	<0,02	--	--	--	--	--
INRS177	0,0019	115,7	4,5	0,70	-63,8926	-10,8367	0,0	--	--
INRS178	0,012	28,3	0,2	0,05	--	--	--	--	--
INRS179	0,023	6,9	1,9	0,30	-72,0533	-11,8607	--	--	--
INRS180	0,02	17,2	0,2	0,49	--	--	--	--	--
INRS181	0,016	91,0	6,5	1,47	--	--	--	--	--
INRS182	<0,01	140,8	2,8	2,56	-67,2438	-10,5392	6,6	2140	-17,7
INRS183	0,04	153,7	5,9	2,63	--	--	--	--	--
INRS184	0,014	17,5	0,7	0,05	-78,3119	-12,2927	--	--	--
INRS185	<0,01	79,1	3,8	0,85	--	--	--	--	--
INRS186	0,01	100,9	1,7	0,16	--	--	--	--	--
INRS187	0,015	150,0	<2	1,27	--	--	--	--	--
INRS188	<0,005	122,0	11,2	2,02	--	--	--	--	--
INRS189	0,0059	126,0	6,1	1,23	-68,5121	-10,5320	0,0	11020	-20,5
INRS190	0,036	92,0	2,6	1,50	--	--	--	--	--
INRS191	<0,005	45,0	1,6	2,39	--	--	--	--	--
INRS192	0,0077	55,0	<2	1,61	--	--	--	--	--
INRS193	0,016	90,0	<2	1,18	-64,1067	-10,4783	9,6	3100	-20,2
INRS194	<0,005	43,0	<2	0,09	--	--	--	--	--
INRS195	<0,005	50,0	<2	0,14	-70,4867	-11,7159	6,3	--	--
INRS196	0,017	21,0	<2	0,23	--	--	--	--	--
INRS197	0,0054	67,0	<2	0,59	--	--	--	--	--
INRS198	0,007	70,0	<2	0,88	--	--	--	--	--
INRS199	0,018	62,0	2,3	1,21	-75,4069	-11,7197	14,3	--	--
INRS201	0,011	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS202	0,0056	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS203	0,0035	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS204	0,012	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS205	0,012	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS206	0,0024	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS207	<0,001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS208	<0,001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS209	<0,001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS210	0,035	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS211	<0,001	--	--	--	-79,0654	-11,8078	3,9	9840	-13,3
INRS212	<0,001	--	--	--	-76,4469	-11,6030	0,0	5900	-17,7
INRS213	0,074	--	--	--	-82,3500	-12,5352	8,9	4650	-15,3
INRS214	<0,001	--	--	--	-83,3915	-12,6189	0,0	--	--
INRS215	0,013	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS216	<0,001	--	--	--	--	--	--	--	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Echantillon	Zn mg/L	CID mg/L	COD mg/L	NTD mg/L	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	3H TU	14C Ans - BP	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
INRS217	0,011	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS218	0,008	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS219	0,01	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS220	0,019	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS221	0,013	--	--	--	-63,0035	-10,4529	--	3750	-24,5
INRS222	0,0065	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS223	0,016	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS224	0,02	--	--	--	-73,9432	-11,8678	--	12470	-12,4
INRS225	0,018	--	--	--	-76,3009	-12,4258	--	--	--
INRS226	<0.001	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS227	0,0072	--	--	--	-75,9918	-12,3344	4,9	7810	-15
INRS228	0,013	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS229	0,016	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS230	0,019	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS231	0,024	--	--	--	-71,5613	-11,2674	12,4	1530	-16,9
INRS232	0,023	39,1	7,0	0,13	-75,7685	-12,2806	9,3	--	--
INRS233	0,013	42,0	2,8	0,25	--	--	--	--	--
INRS234	0,015	63,5	4,6	0,26	-66,0878	-11,2952	10,4	--	--
INRS235	0,0094	49,3	2,0	0,19	--	--	--	--	--
INRS236	0,015	41,7	2,3	0,22	--	--	--	--	--
INRS237	0,036	27,3	2,3	0,11	-69,3940	-11,6067	9,7	--	--
INRS238	0,017	36,8	3,4	0,12	--	--	--	--	--
INRS239	0,019	76,9	8,1	0,28	--	--	--	--	--
INRS240	0,011	95,8	11,3	0,35	-67,7300	-10,7080	11,6	--	--
INRS241	0,012	79,9	10,8	0,77	--	--	--	--	--
INRS242	0,018	--	--	--	-72,7459	-11,6234	--	--	--
INRS243	0,0054	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS244	0,009	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS245	0,013	--	--	--	--	--	--	--	--
INRS246	0,027	52,3	8,3	1,65	--	--	--	--	--
INRS247	0,0057	77,6	8,7	0,50	--	--	--	--	--
INRS248	0,0055	74,1	7,5	0,19	--	--	--	--	--
INRS249	0,0051	64,8	9,7	0,61	--	--	--	--	--
INRS250	0,013	82,1	8,9	0,20	--	--	--	--	--
INRS251	0,0044	69,9	8,8	0,17	-68,9033	-10,8839	--	5020	-15,6
INRS252	0,0083	54,3	8,5	0,10	--	--	--	--	--
INRS253	0,0043	98,7	2,3	0,25	--	--	--	--	--
INRS254	0,012	140,8	4,0	1,07	-69,8407	-10,7359	12,6	60	-13,3
INRS255	0,0047	65,0	<1.0	0,10	--	--	--	--	--
INRS256	0,013	76,6	11,5	0,94	-67,9034	-10,5246	1,0	5370	-12,9
INRS257	0,016	85,6	<1.0	0,08	--	--	--	--	--
INRS258	0,0058	47,6	<1.0	0,16	--	--	--	--	--
INRS259	0,0028	27,3	<1.0	0,03	-69,9871	-11,9990	--	--	--
INRS260	0,012	26,5	<1.0	0,04	--	--	--	--	--
INRS261	<0.001	22,6	<1.0	0,05	--	--	--	--	--
INRS262	0,0028	43,0	<1.0	0,28	-71,1724	-11,1582	--	--	--
INRS263	0,015	9,7	<1.0	0,50	-80,3405	-12,5264	--	--	--
INRS264	0,0066	24,7	<1.0	1,32	--	--	--	--	--
INRS265	0,0023	28,1	<1.0	0,07	--	--	--	--	--
INRS266	0,0096	18,9	3,4	3,20	-77,1384	-12,0914	--	--	--
INRS267	0,0037	15,0	<1.0	<0.02	--	--	--	--	--
INRS268	0,01	14,5	<1.0	0,10	--	--	--	--	--
INRS269	0,0068	13,8	<1.0	0,09	-85,1328	-12,9356	--	--	--
INRS270	<0.001	24,3	<1.0	0,24	-73,0002	-12,0700	--	--	--
INRS271	0,019	80,4	3,9	1,84	--	--	--	--	--
INRS272	0,0013	77,7	6,2	1,35	--	--	--	--	--
INRS273	0,014	24,8	0,3	0,53	-81,0423	-12,2902	--	--	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Zn mg/L	CID mg/L	COD mg/L	NTD mg/L	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	3H TU	14C Ans - BP	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
INRS274	0,021	6,6	0,3	0,29	-85,7943	-12,7755	--	--	--
INRS275	<0.01	16,4	0,1	0,03	--	--	--	--	--
INRS276	<0.01	102,6	2,2	1,03	--	--	--	--	--
INRS277	<0.01	49,7	3,2	0,70	-71,2875	-10,9525	7,3	5960	-18
INRS278	<0.01	73,7	0,6	0,54	-67,0701	-10,0086	--	2260	-18,8
INRS279	<0.01	103,9	0,3	1,15	--	--	--	--	--
INRS280	<0.01	42,6	1,6	0,46	-72,5720	-10,8411	3,2	7220	-17,5
INRS281	0,044	55,0	<2	2,13	-74,8218	-11,0465	--	--	--
INRS282	0,014	37,0	7,6	1,22	-74,6285	-11,0901	--	--	--
INRS283	0,019	61,0	<2	0,15	--	--	--	--	--
INRS284	<0.005	67,0	2,9	1,09	--	--	--	--	--
INRS285	0,031	88,0	8,4	1,03	-75,6381	-11,0256	11,7	--	--
INRS286	<0.005	37,0	<2	1,53	--	--	--	--	--
INRS287(T5-B)	0,0097	150,0	13,8	2,42	-66,2730	-10,5269	--	9420	-21,1
INRS288(S9-D)	--	68,0	<2	0,99	--	--	--	--	--
INRS289(S8-C)	<0.005	101,0	8,4	2,44	--	--	--	--	--
INRS290(T9-B)	<0.005	44,0	3,7	0,67	-72,0670	-10,8630	--	--	--
INRS291(T2-A)	<0.005	2,3	<2	0,40	--	--	--	--	--
INRS292(X12)	<0.005	109,0	4,4	1,73	--	--	--	--	--
INRS293	0,027	110,0	3,0	0,40	--	--	--	--	--
INRS294(T6-E)	<0.005	141,0	<2	0,76	--	--	--	--	--
INRS295	0,005	46,0	<2	0,26	--	--	--	--	--
INRS296(S03)	0,0057	64,0	2,7	2,32	--	--	--	--	--
INRS300	<0.005	38,0	<2	0,19	-74,1069	-11,3425	2,6	--	--
INRS301	0,005	30,0	2,1	0,13	--	--	--	--	--
P01	0,0078	43,0	28,0	1,04	--	--	--	--	--
P02_ROC	<0.005	33,0	0,4	<0.25	-84,9367	-11,3438	--	--	--
P02_SED	<0.005	70,6	16,5	3,00	-67,6736	-10,1749	--	--	--
P03	<0.005	23,0	13,0	0,98	-69,4648	-10,5380	--	14390	-22,7
P04	<0.005	33,0	14,0	0,44	--	--	--	--	--
P05	<0.005	65,0	2,0	0,87	--	--	--	--	--
P06	<0.005	52,0	3,0	0,31	-76,6222	-11,4872	3,4	9410	-16,7
P07	0,0083	41,0	22,0	2,22	--	--	--	--	--
P08	0,035	21,0	8,0	4,67	-78,3990	-11,3315	--	13840	--
P09	<0.005	48,0	3,0	0,07	--	--	--	--	--
P10	0,0091	46,0	5,0	0,04	-75,3839	-11,5526	10,4	--	--
P11	<0.001	17,0	5,0	0,21	-69,6116	-12,4314	0,0	18760	-12,8
P12	<0.005	41,0	8,0	0,84	--	--	--	--	--
P13	0,0059	20,0	10,0	1,18	--	--	--	--	--
P14_ROC	<0.005	134,0	15,4	2,40	-78,1649	-10,7267	--	--	--
P14_SED	<0.005	33,0	1,3	0,50	-71,6149	-10,4199	--	--	--
P15	0,0052	26,0	19,0	2,17	--	--	--	--	--
P16	0,011	61,0	7,0	0,17	-72,1232	-11,4644	0,0	12570	-18,5
P17	<0.005	141,0	3,0	1,53	--	--	--	--	--
P18_ROC	0,006	52,8	0,6	0,30	-75,8772	-11,0559	--	--	--
P18_SED	0,0084	30,0	9,2	1,47	-72,9539	-10,5794	--	--	--
P19	0,0067	39,0	3,0	0,06	-79,6083	-12,4218	2,7	8960	-14,4
P20	<0.005	27,0	1,0	0,11	-82,8140	-12,4548	0,8	15520	-16,4
P21	0,0058	86,0	2,0	0,13	-85,4791	-12,9528	4,0	9320	-15,4
P22_ROC	<0.005	16,5	0,9	0,30	-82,8931	-11,7681	--	--	--
P22_SED	<0.005	18,5	1,8	0,30	-77,0599	-11,7427	--	--	--
P23	0,0096	32,0	8,0	1,06	-78,0449	-11,6166	--	16580	-14,2
P24	<0.005	27,0	4,0	0,07	-76,8131	-12,0458	10,7	--	--
P25	0,022	380,0	18,7	8,76	-72,3821	-9,8894	--	--	--
PUITS_MSH	0,0083	33,0	1,0	0,05	-84,2239	-12,6878	7,8	--	--
RS01	0,0068	112,0	29,0	2,83	-77,2330	-11,4405	--	15420	-25,9
RS01_49'	--	--	--	--	-82,1361	-11,1484	--	--	--

Tableau E.4: Paramètres inorganiques, COD et isotopes (données brutes)

Échantillon	Zn mg/L	CID mg/L	COD mg/L	NTD mg/L	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	3H TU	14C Ans - BP	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
RS01_59'	--	--	--	--	-76,9988	-11,1623	--	--	--
RS01_75'	--	--	--	--	-82,4860	-11,0249	--	--	--
RS02_32'	--	--	--	--	-68,3552	-9,0507	--	--	--
RS02_54'	--	--	--	--	-64,5764	-9,0087	--	--	--
RS02_ROC	0,026	24,0	51,0	2,10	-66,6902	-10,3768	--	8440	-14,6
RS02_SED	0,011	74,0	83,0	1,48	--	--	--	--	--
RS04	0,013	206,0	34,0	2,20	-70,5791	-10,6922	--	12520	-9,8
RS05_ROC	0,012	62,0	21,0	2,00	--	--	--	--	--
RS05_SED	0,0064	50,0	71,0	2,42	-68,7917	-9,9713	--	--	--
SOURCE_MSH	0,017	77,0	<1	0,10	--	--	--	--	--
X07	<0.005	39,0	19,0	1,64	-75,7962	-11,6539	12,7	--	--
X22	0,017	69,8	4,6	0,80	-70,2592	-9,9333	--	--	--
X23	0,01	41,0	3,1	21,00	-75,6828	-11,1181	--	--	--
X24	0,01	137,0	29,4	3,40	-70,4115	-10,1055	--	--	--

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Calcédoine	Chrysotile	Dolomite	Gypse	H2(g)	H2O(g)	O2(g)	Quartz	Sepiolite
INRS101	-2,07	-0,17	-0,02	0,32	-5,32	-0,37	-1,82	-20,79	-1,91	-46,68	0,8	-5,15
INRS102	-3,06	-0,38	-0,23	0,13	-5,27	-0,99	-2,8	-21,23	-1,92	-46,04	0,61	-5,39
INRS103	-1,68	-0,11	0,04	0,27	-8,87	-0,43	-1,43	-20,94	-1,91	-46,49	0,75	-7,58
INRS105	-1,97	-0,25	-0,1	-0,06	-6,32	-0,48	-1,71	-24,88	-1,89	-38,28	0,42	-6,49
INRS106	-2,95	0,34	0,5	-0,22	-1,76	0,46	-2,69	-19,73	-1,92	-48,94	0,26	-3,65
INRS107	-2,99	-0,18	-0,02	-0,14	-4,33	-0,07	-2,74	-22,57	-1,92	-43,34	0,34	-5,22
INRS108	-2,76	-2,25	-2,1	-0,28	-17,09	-4,97	-2,5	-30,38	-1,82	-26,35	0,18	-14,23
INRS109	-2,97	-0,19	-0,04	0,04	-3,7	-0,31	-2,71	-19,07	-1,92	-50,33	0,52	-4,51
INRS110	-2,77	-0,71	-0,55	0,22	-9,52	-1,82	-2,52	-20,68	-1,93	-47,15	0,7	-8,07
INRS111	-1,65	-0,18	-0,02	0,19	-6,88	-0,35	-1,4	-21,13	-1,94	-46,44	0,68	-6,32
INRS112	-3,06	-0,13	0,03	-0,1	-4,08	-0,41	-2,8	-33,18	-1,92	-22,14	0,37	-5
INRS113	-5,67	0,06	0,21	-0,16	-2,54	0,41	-5,41	-23,64	-1,93	-41,33	0,32	-4,04
INRS114	-5,92	0,11	0,26	-0,1	-3,01	0,53	-5,66	-18,82	-1,92	-50,76	0,37	-4,3
INRS115	-2,94	-0,94	-0,78	-0,22	-7,39	-1,48	-2,68	-27,85	-1,93	-32,82	0,26	-7,39
INRS116	-3,14	-0,87	-0,71	-0,27	-7,52	-1,52	-2,88	-15,62	-1,9	-57	0,2	-7,62
INRS117	-3,82	-1,55	-1,4	-0,02	-10,48	-3,17	-3,56	-27,08	-1,89	-33,94	0,46	-9,19
INRS118	-2,13	-0,19	-0,04	-0,25	-7,98	-0,66	-1,88	-32,19	-1,8	-22,56	0,22	-8,12
INRS119	-2,74	-0,5	-0,34	-0,07	-6,77	-0,83	-2,49	-30,2	-1,84	-27,03	0,4	-6,93
INRS120	-2,99	-0,98	-0,82	0,09	-8,63	-2	-2,73	-19,27	-1,93	-50,02	0,57	-7,69
INRS121	-3,79	-3,62	-3,47	-0,12	-19,65	-7,35	-3,53	-22,4	-1,95	-44,07	0,36	-15,33
INRS122	-2,47	-0,56	-0,41	0,08	-7,02	-0,79	-2,22	-18,72	-1,95	-51,41	0,56	-6,58
INRS123	-2,24	-0,69	-0,54	-0,11	-6,79	-1,08	-1,98	-29,41	-1,91	-29,55	0,36	-6,84
INRS124	-2,34	-0,45	-0,29	-0,02	-6,35	-0,75	-2,09	-27,51	-1,86	-32,6	0,45	-6,53
INRS125	-3,26	-0,94	-0,78	-0,1	-9	-2,03	-3	-22,84	-1,91	-42,65	0,37	-8,3
INRS126	-3,48	-1,24	-1,08	-0,15	-10,39	-2,79	-3,22	-22,03	-1,92	-44,35	0,33	-9,29
INRS127	-2,22	0	0,15	0,21	-8,25	-0,12	-1,96	-21,08	-1,91	-46,15	0,69	-7,28
INRS128	-4,87	0,04	0,19	-0,02	-4,67	0,44	-4,61	-19,39	-1,92	-49,65	0,46	-5,26
INRS129	-5,58	-0,51	-0,36	0,19	-5,12	-0,41	-5,33	-22,06	-1,84	-43,3	0,66	-5,4
INRS130	-5,64	-0,33	-0,18	-0,02	-5,2	-0,15	-5,39	-23,39	-1,91	-41,53	0,46	-5,63
INRS131	-4,85	-0,27	-0,11	0,09	-4,65	0,03	-4,59	-20,73	-1,91	-46,88	0,57	-5,08
INRS132	-5,58	-0,98	-0,82	0,2	-8,66	-1,93	-5,32	-21,46	-1,91	-45,4	0,67	-7,58
INRS133	-5,91	-0,62	-0,47	0,09	-8,32	-0,98	-5,65	-22,04	-1,94	-44,63	0,57	-7,46
INRS134	-2,26	-0,68	-0,53	-0,02	-9,42	-1,21	-2	-24,63	-1,94	-39,4	0,46	-8,39
INRS135	-2,34	-0,48	-0,33	-0,16	-7,97	-0,75	-2,08	-22,3	-1,93	-43,98	0,32	-7,67
INRS136	-2,33	-0,44	-0,29	0,06	-7,12	-0,73	-2,07	-21,66	-1,95	-45,45	0,54	-6,69
INRS137	-1,55	-0,18	-0,02	0,17	-8,89	-0,38	-1,29	-20,21	-1,93	-48,12	0,65	-7,74
INRS138	-1,89	-0,48	-0,33	-0,02	-9,98	-1,37	-1,64	-28,04	-1,88	-31,89	0,45	-8,89
INRS139	-2,59	-0,69	-0,53	0,25	-9,54	-1,54	-2,34	-22,17	-1,94	-44,38	0,73	-8,01
INRS140	-2,62	0,01	0,16	0,02	-3,43	0,19	-2,37	-20,94	-1,87	-45,92	0,49	-4,49
INRS141	-2,45	-0,55	-0,4	0,11	-6,49	-1,29	-2,2	-20,2	-1,79	-46,35	0,58	-6,57
INRS142	-2,43	-0,31	-0,16	0,15	-6,03	-0,72	-2,18	-25,79	-1,94	-37,19	0,63	-5,82
INRS143	-3,02	-0,27	-0,11	0,09	-3,7	-0,06	-2,76	-23,2	-1,92	-42,02	0,57	-4,43
INRS144	-2,37	-0,95	-0,79	0,03	-11,58	-2,27	-2,12	-25,68	-1,9	-36,84	0,5	-9,83
INRS145	-1,99	-0,49	-0,33	-0,01	-9,02	-0,79	-1,74	-27,08	-1,8	-32,75	0,46	-8,43
INRS146	-1,7	-0,15	0	0,28	-8,12	-0,35	-1,45	-19,98	-1,91	-48,37	0,76	-7,08
INRS147	-2,68	-0,24	-0,09	0,16	-6,33	-0,49	-2,43	-25,08	-1,93	-38,36	0,64	-6,05
INRS148	-2,32	-0,25	-0,1	0,07	-7,32	-0,88	-2,07	-29,8	-1,91	-28,71	0,55	-6,89
INRS149	-2,9	-0,37	-0,22	0,06	-4,14	-0,37	-2,64	-19,72	-1,94	-49,23	0,54	-4,72
INRS150	-2,98	-0,63	-0,48	0,07	-8,9	-1,49	-2,72	-35,5	-1,93	-17,61	0,55	-7,9
INRS151	-2,99	-2,43	-2,28	-0,34	-18,99	-5,62	-2,74	-32,48	-1,91	-23,32	0,14	-15,37
INRS152	-2,42	-0,51	-0,36	0,07	-9,85	-1,62	-2,16	-36,24	-1,93	-16,13	0,55	-8,53
INRS153	-2,9	-0,1	0,05	-0,12	-3,59	-0,04	-2,64	-26,89	-1,94	-34,94	0,36	-4,65
INRS154	-2,18	0	0,16	0,03	-4,16	0,02	-1,92	-34,69	-1,93	-19,13	0,51	-4,83
INRS155	-2,36	-0,72	-0,56	0,06	-10,48	-1,81	-2,11	-21,41	-1,9	-45,33	0,53	-9,06
INRS156	-3,13	-0,82	-0,66	0,07	-6,37	-1,55	-2,88	-19,78	-1,95	-49,25	0,55	-6,18
INRS157	-2,72	-0,72	-0,56	-0,12	-10,95	-1,96	-2,46	-25,27	-1,93	-38,07	0,36	-9,57
INRS158	-3,16	-1,18	-1,03	-0,66	-10,78	-2,62	-2,92	-26,83	-1,72	-32,12	-0,21	-10,89
INRS159	-2,04	-0,41	-0,25	0,28	-9,86	-0,79	-1,79	-20,07	-1,81	-46,88	0,75	-8,48
INRS160	-2,98	-0,03	0,13	0	-3,62	-0,25	-2,72	-29,74	-1,94	-29,25	0,48	-4,47
INRS161(X21)	-2,6	-0,84	-0,69	-0,28	-8,04	-1,24	-2,38	-22	-1,51	-39,12	0,15	-8,95
INRS162	-3,29	-0,12	0,03	-0,08	-3,26	-0,06	-3,04	-18,23	-1,95	-52,34	0,4	-4,35
INRS163	-3,52	-3,53	-3,38	-0,14	-22,34	-7,39	-3,27	-22,54	-1,85	-42,39	0,33	-17,43
INRS164	-2,66	-1,31	-1,15	0,09	-12,89	-2,91	-2,4	-23,37	-1,91	-41,54	0,57	-10,59

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Calcédoine	Chrysotile	Dolomite	Gypse	H2(g)	H2O(g)	O2(g)	Quartz	Sepiolite
INRS165	-2,63	-1,22	-1,07	0,11	-13,01	-2,64	-2,38	-24,99	-1,89	-38,12	0,58	-10,67
INRS166	-2,45	0,26	0,41	0,1	-3,76	0,32	-2,2	-26,99	-1,88	-33,98	0,57	-4,54
INRS167	-2,81	-2,86	-2,7	-0,42	-21,96	-6,73	-2,55	-32,47	-1,95	-23,86	0,06	-17,39
INRS168	-3,1	-1,89	-1,74	0,12	-16,05	-4,48	-2,84	-24,44	-1,96	-40,06	0,61	-12,51
INRS169	-2,81	-0,9	-0,74	-0,14	-7,39	-1,54	-2,56	-23,23	-1,92	-42	0,33	-7,27
INRS170	-2,86	-0,71	-0,55	0,14	-10,61	-2,01	-2,61	-24,14	-1,84	-39,09	0,6	-9,16
INRS171	-2,74	-1,64	-1,49	-0,11	-14,48	-3,79	-2,48	-22,63	-1,95	-43,55	0,37	-11,88
INRS172	-2,55	-0,86	-0,7	0,13	-9,7	-2	-2,3	-20,57	-1,91	-47,17	0,61	-8,39
INRS173	-3,14	-1,91	-1,75	-0,03	-13,11	-3,82	-2,88	-27,13	-1,98	-34,98	0,45	-10,76
INRS174	-2,93	-0,1	0,05	0,03	-3,44	0,04	-2,68	-26,04	-1,83	-35,26	0,5	-4,56
INRS175	-3	-0,05	0,11	0,14	-2,54	0,08	-2,75	-18,6	-1,93	-51,31	0,61	-3,57
INRS176	-2,88	-0,74	-0,59	0,17	-7,2	-1,67	-2,62	-25,88	-1,91	-36,56	0,65	-6,65
INRS177	-5,74	-0,55	-0,39	-0,13	-6,33	-0,82	-5,49	-26,2	-1,91	-35,89	0,35	-6,58
INRS178	-3,09	-0,9	-0,75	0,1	-8,46	-1,82	-2,84	-21,61	-1,93	-45,34	0,58	-7,56
INRS179	-3,87	-4,55	-4,4	-0,51	-27,47	-9,63	-3,63	-20,25	-1,75	-45,7	-0,05	-21,7
INRS180	-3,11	-3,66	-3,5	-0,02	-25,52	-7,94	-2,85	-23,86	-1,89	-40,27	0,45	-19,24
INRS181	-5,25	-0,71	-0,55	-0,11	-6,88	-1,71	-4,99	-21,88	-1,87	-44,04	0,36	-7,01
INRS182	-0,92	0,55	0,71	0,14	-4,34	1,32	-0,66	-14,25	-1,93	-60,1	0,62	-4,74
INRS183	-3,09	-0,23	-0,07	-0,09	-4,85	0,36	-2,83	-18,95	-1,93	-50,65	0,39	-5,48
INRS184	-3,29	-1,75	-1,59	0,07	-10,78	-3,53	-3,04	-22,76	-1,89	-42,58	0,55	-9,24
INRS185	-2,62	-0,49	-0,34	-0,05	-6,31	-0,75	-2,36	-18,71	-1,91	-50,89	0,43	-6,42
INRS186	-3,27	-0,79	-0,64	0,03	-9,21	-1,61	-3,01	-21,44	-1,87	-44,86	0,51	-8,33
INRS187	-5,69	-0,63	-0,48	-0,14	-7,55	-1,03	-5,43	-21,33	-1,9	-45,56	0,33	-7,42
INRS188	-2,75	-0,17	-0,01	-0,13	-6,58	-0,11	-2,5	-23,61	-1,91	-41,05	0,34	-6,76
INRS189	-4,84	-0,46	-0,3	-0,14	-6,27	-0,63	-4,58	-23,52	-1,94	-41,7	0,35	-6,46
INRS190	-2,09	-0,21	-0,06	-0,03	-7,51	-0,17	-1,85	-28,13	-1,7	-29,26	0,42	-7,71
INRS191	-2,05	-0,44	-0,29	-0,11	-8,37	-1,04	-1,79	-25,15	-1,92	-38,16	0,37	-7,87
INRS192	-2,86	-0,39	-0,23	-0,17	-5,36	-0,88	-2,61	-25,86	-1,82	-35,42	0,29	-6,22
INRS193	-3,82	-0,31	-0,16	0,13	-6,63	-0,33	-3,57	-22,96	-1,91	-42,41	0,61	-6,33
INRS194	-2,7	-0,4	-0,25	0,1	-6,96	-0,84	-2,45	-21,06	-1,88	-45,86	0,57	-6,68
INRS195	-2,94	-0,49	-0,34	0,05	-5,9	-0,74	-2,68	-21,64	-1,9	-44,87	0,52	-6,02
INRS196	-2,08	-0,13	0,03	-0,03	-5,33	-0,67	-1,82	-28,24	-1,92	-31,93	0,44	-5,73
INRS197	-2,08	-0,6	-0,45	0,22	-10	-1,36	-1,83	-28,35	-1,92	-31,75	0,7	-8,41
INRS198	-3,06	-0,23	-0,07	0,15	-5,72	-0,37	-2,8	-17,74	-1,94	-53,17	0,63	-5,64
INRS199	-2,1	-0,22	-0,06	0,09	-7,61	-0,61	-1,85	-23,68	-1,87	-40,44	0,56	-7,16
INRS201	-4	0,08	0,24	-0,18	-1,24	0,02	-3,74	-26,51	-1,96	-35,95	0,3	-3,14
INRS202	-1,59	-0,22	-0,06	0,27	-7,78	-0,72	-1,33	-21,72	-1,93	-45,11	0,74	-6,83
INRS203	-2,54	0,05	0,21	0,08	-3,13	0,38	-2,28	-26,3	-1,92	-35,88	0,56	-4,06
INRS204	-1,95	-0,3	-0,15	0,23	-9,09	-0,94	-1,69	-24,11	-1,9	-39,92	0,7	-7,85
INRS205	-2,12	0,24	0,4	0,2	-4,68	-0,14	-1,86	-18,52	-1,94	-51,62	0,68	-4,87
INRS206	-2,48	0,19	0,34	0,05	-4,24	0,47	-2,22	-19,14	-1,9	-49,96	0,53	-4,89
INRS207	-4,13	0,17	0,32	-0,08	-2,6	0,37	-3,87	-26,05	-1,92	-36,32	0,4	-3,99
INRS208	-1,73	0,24	0,39	0,24	-5,2	0,25	-1,48	-20,13	-1,86	-47,43	0,71	-5,32
INRS209	-1,51	-0,07	0,08	0,04	-8,34	-0,41	-1,26	-19,63	-1,92	-49,15	0,52	-7,61
INRS210	-5,48	-3,57	-3,42	0,24	-15,23	-6,97	-5,22	-30,35	-1,81	-26,35	0,7	-12,13
INRS211	-2,98	0,22	0,37	-0,1	-2,18	0,45	-2,72	-18,76	-1,9	-50,68	0,37	-3,78
INRS212	-2,83	0,12	0,27	0,06	-5,25	-0,33	-2,57	-20,22	-1,92	-48,04	0,53	-5,51
INRS213	-2,8	-0,12	0,03	0,13	-3,35	-0,2	-2,54	-21,09	-1,95	-46,61	0,62	-4,06
INRS214	-4	0,36	0,51	0,01	-2,11	0,78	-3,75	-25,51	-1,94	-37,73	0,49	-3,45
INRS215	-2,68	0,06	0,22	0,2	-3,96	0	-2,43	-24,55	-1,92	-39,39	0,68	-4,41
INRS216	-2,63	0,04	0,2	-0,04	-2,45	-0,08	-2,38	-30,15	-1,84	-27,11	0,43	-4,01
INRS217	-2,26	-0,06	0,1	0,13	-5,88	-0,21	-2,01	-18,29	-1,91	-51,71	0,6	-5,85
INRS218	-3,23	-0,05	0,11	-0,1	-1,97	0,06	-2,98	-17,99	-1,92	-52,52	0,38	-3,59
INRS219	-4,36	-0,05	0,11	0,24	-4,94	-0,24	-4,1	-18,64	-1,97	-51,82	0,72	-4,89
INRS220	-6,44	-1,79	-1,64	-0,02	-9,47	-3,43	-6,19	-29,79	-1,88	-28,34	0,45	-8,56
INRS221	-5,73	0,24	0,39	-0,21	-0,88	0,99	-5,48	-19,01	-1,89	-50,04	0,27	-3,11
INRS222	-3,93	0,38	0,54	-0,05	-1,16	1,01	-3,68	-17,78	-1,88	-52,36	0,42	-3,07
INRS223	-4,09	0,13	0,29	-0,03	-2,62	0,55	-3,84	-19,03	-1,86	-49,63	0,44	-4,06
INRS224	-6,04	-0,1	0,05	-0,22	-2,08	-0,27	-5,78	-29,71	-1,9	-28,83	0,26	-3,9
INRS225	-2,76	-0,35	-0,19	0	-8,16	-1,33	-2,5	-28,5	-1,92	-31,49	0,48	-7,53
INRS226	-1,93	-0,05	0,1	0,26	-6,02	0,03	-1,68	-20,5	-1,9	-47,15	0,74	-5,74
INRS227	-3,78	-0,11	0,05	-0,14	-1,12	-0,23	-3,52	-23,15	-1,91	-42,09	0,34	-3,1
INRS228	-1,91	-0,04	0,11	0,07	-7,68	-0,38	-1,65	-15,77	-1,89	-56,58	0,54	-7,18

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Calcédoine	Chrysotile	Dolomite	Gypse	H2(g)	H2O(g)	O2(g)	Quartz	Sepiolite
INRS229	-5,64	-0,03	0,13	-0,24	-1,78	0,2	-5,39	-23,15	-1,85	-41,23	0,23	-3,87
INRS230	-4,66	-0,01	0,15	-0,17	-1,56	0,11	-4,41	-17,87	-1,87	-52,03	0,3	-3,56
INRS231	-1,62	0,12	0,28	0,28	-7,39	0,09	-1,36	-18,31	-1,9	-51,56	0,75	-6,63
INRS232	-2,09	-0,25	-0,1	0,08	-7,37	-0,88	-1,84	-20,6	-1,88	-46,74	0,56	-6,98
INRS233	-1,98	-0,29	-0,14	0,35	-5,95	-0,58	-1,73	-20,01	-1,88	-47,85	0,82	-5,61
INRS234	-2,01	-0,24	-0,09	0,23	-8,06	-0,7	-1,75	-20,1	-1,93	-48,39	0,71	-7,07
INRS235	-4,12	0,27	0,42	-0,24	0,11	0,63	-3,87	-19,67	-1,85	-48,14	0,23	-2,61
INRS236	-2,13	-0,18	-0,03	0,09	-5,92	-0,44	-1,87	-31,11	-1,93	-26,32	0,57	-5,9
INRS237	-1,92	-0,26	-0,11	0,02	-6,33	-0,78	-1,66	-18,68	-1,92	-51,08	0,5	-6,3
INRS238	-2,17	0,09	0,25	0,07	-3,86	0,18	-1,91	-17,9	-1,87	-52,05	0,54	-4,68
INRS239	-1,71	-0,02	0,14	0,14	-6,86	-0,03	-1,45	-21,25	-1,93	-46,12	0,62	-6,42
INRS240	-1,64	0,05	0,21	0,13	-7,63	-0,1	-1,38	-21,02	-1,91	-46,33	0,61	-6,99
INRS241	-2,29	0,31	0,46	0,11	-4,67	0,68	-2,04	-20,84	-1,86	-46,03	0,58	-5,18
INRS242	-2,41	-1,12	-0,97	-0,15	-13,08	-2,3	-2,16	-31,35	-1,88	-25,21	0,32	-11,18
INRS243	-2,52	-0,44	-0,28	-0,03	-7,64	-0,76	-2,27	-25,98	-1,94	-36,73	0,45	-7,22
INRS244	-2,01	-0,38	-0,23	0,06	-9,02	-0,78	-1,76	-22,49	-1,82	-42,21	0,53	-8,25
INRS245	-2,14	-0,57	-0,42	0,13	-8,81	-1,27	-1,88	-25,08	-1,84	-37,26	0,6	-7,96
INRS246	-2,29	-0,82	-0,66	-0,02	-12,17	-2,07	-2,04	-30,03	-1,87	-27,77	0,45	-10,37
INRS247	-1,92	-0,22	-0,07	0,13	-8,02	-0,47	-1,66	-21,16	-1,92	-46,1	0,61	-7,24
INRS248	-1,89	-0,17	-0,02	0,19	-8,39	-0,62	-1,64	-20,76	-1,92	-46,9	0,66	-7,4
INRS249	-4,32	0,52	0,67	0,08	0,05	1,52	-4,06	-19,95	-1,91	-48,37	0,55	-1,98
INRS250	-1,48	0,24	0,4	0,23	-4,79	0,57	-1,23	-21,61	-1,93	-45,3	0,7	-4,91
INRS251	-1,74	-0,2	-0,05	0,11	-7,04	-0,25	-1,48	-24,86	-1,92	-38,74	0,59	-6,61
INRS252	-0,91	0,04	0,2	-0,06	-5,57	0,16	-0,66	-23,05	-1,92	-42,36	0,42	-5,92
INRS253	-1,59	-0,2	-0,04	0,22	-7,28	-0,14	-1,34	-22,21	-1,89	-43,69	0,7	-6,66
INRS254	-2,09	0,27	0,43	0,29	-7,24	0,25	-1,83	-21,39	-1,92	-45,67	0,77	-6,45
INRS255	-2,22	0,05	0,2	-0,14	-5,34	0,27	-1,96	-22,12	-1,91	-44,14	0,34	-5,91
INRS256	-4,39	0,23	0,38	0,05	-4,71	0,46	-4,13	-21,32	-1,91	-45,7	0,52	-5,19
INRS257	-1,56	-0,13	0,03	0,17	-7,08	-0,17	-1,31	-20,49	-1,91	-47,37	0,65	-6,56
INRS258	-2	0,12	0,27	0,11	-3,74	0,37	-1,74	-20,18	-1,91	-47,99	0,59	-4,43
INRS259	-2,92	0,12	0,28	0,01	-1,67	0,34	-2,66	-31,52	-1,95	-25,74	0,49	-3,15
INRS260	-2,36	0,19	0,35	-0,05	-3,4	0,08	-2,11	-18,4	-1,96	-52,2	0,44	-4,35
INRS261	-2,77	-0,34	-0,18	-0,01	-5,99	-1,04	-2,52	-23,95	-1,9	-40,35	0,46	-6,17
INRS262	-1,87	-0,13	0,03	0,09	-5,82	-0,27	-1,62	-26,48	-1,9	-35,26	0,56	-5,89
INRS263	-3,5	-2,37	-2,21	0,14	-14	-4,98	-3,24	-24,62	-2,04	-40,71	0,64	-10,92
INRS264	-2,8	-0,28	-0,13	-0,06	-6,82	-1,11	-2,55	-28,03	-1,9	-32,1	0,41	-6,82
INRS265	-2,67	-0,13	0,02	0,04	-6,35	-0,94	-2,42	-20,35	-1,88	-47,26	0,51	-6,37
INRS266	-3,24	-4,08	-3,93	-0,16	-26,34	-8,36	-2,99	-25,39	-1,83	-36,44	0,3	-20,17
INRS267	-2,73	-2,92	-2,76	0,07	-20,82	-6,44	-2,48	-23,7	-1,94	-41,27	0,55	-15,84
INRS268	-3	-2,74	-2,58	-0,01	-18,52	-5,74	-2,75	-25,11	-1,94	-38,46	0,47	-14,44
INRS269	-3,37	-2,88	-2,73	-0,11	-21	-6,61	-3,12	-29,72	-1,92	-29	0,37	-16,3
INRS270	-3,31	-1,64	-1,48	0,01	-10,97	-3,15	-3,05	-26,08	-1,92	-36,27	0,49	-9,41
INRS271	-5,86	-0,03	0,13	0,07	-1,89	0,48	-5,61	-19,75	-1,9	-48,67	0,54	-3,31
INRS272	-5,22	-0,2	-0,05	0,08	-3,48	-0,02	-4,96	-20,43	-1,92	-47,64	0,55	-4,3
INRS273	-2,81	-1,69	-1,54	0,03	-13,51	-3,76	-2,55	-26,65	-1,82	-33,83	0,49	-11,32
INRS274	-3,8	-3,54	-3,39	-0,23	-18,53	-7,59	-3,55	-26,2	-1,81	-34,62	0,23	-15,12
INRS275	-2,92	-0,1	0,06	0,07	-2,7	-0,44	-2,67	-19,42	-1,92	-49,66	0,55	-3,78
INRS276	-2,5	0,44	0,6	0,22	-3,41	1,08	-2,24	-16,61	-1,94	-55,48	0,7	-3,98
INRS277	-5	0,13	0,29	-0,03	-2,13	0,43	-4,75	-22,4	-1,9	-43,43	0,44	-3,63
INRS278	-3,57	0,29	0,45	0,14	-2,47	0,93	-3,32	-17,78	-1,87	-52,22	0,61	-3,65
INRS279	-3,06	0,14	0,3	0	-3,77	0,09	-2,8	-20,56	-1,9	-47	0,47	-4,69
INRS280	-4,02	0,26	0,42	-0,06	0,05	0,59	-3,77	-20,83	-1,89	-46,4	0,41	-2,25
INRS281	-3,06	-0,97	-0,82	-0,1	-9,04	-1,74	-2,81	-31,68	-1,91	-25	0,37	-8,33
INRS282	-2,79	-1,33	-1,18	-0,07	-13,81	-3,26	-2,53	-29,61	-1,92	-29,2	0,41	-11,44
INRS283	-2,38	-0,03	0,13	0,22	-5,67	-0,22	-2,13	-21,45	-1,91	-45,37	0,7	-5,55
INRS284	-3,11	-0,18	-0,03	0,22	-5,08	-0,22	-2,85	-14,69	-1,92	-59,01	0,7	-5,13
INRS285	-2,13	-0,13	0,02	0,36	-8,52	-0,72	-1,88	-17,19	-1,91	-53,98	0,84	-7,2
INRS286	-2,88	0,03	0,19	0,13	-2,19	0,29	-2,63	-18,87	-1,91	-50,63	0,61	-3,37
INRS287(T5-B)	-4,53	0,07	0,23	0,17	-2,45	0,75	-4,28	-21,38	-1,94	-45,92	0,65	-3,41
INRS288(S9-D)	-2,92	-0,3	-0,16	-0,06	-8,11	-0,83	-2,7	-22	-1,51	-39,12	0,37	-8,62
INRS289(S8-C)	-4,5	0,51	0,66	0,16	-0,62	1,63	-4,25	-30,44	-1,86	-26,8	0,63	-2,4
INRS290(T9-B)	-1,91	0,26	0,41	-0,06	-4,99	0,16	-1,66	-28,25	-1,82	-30,59	0,4	-5,79
INRS291(T2-A)	-1,89	0,51	0,66	0,15	-4,23	0,83	-1,64	-25,99	-1,81	-35	0,62	-4,95

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Calcédoine	Chrysotile	Dolomite	Gypse	H2(g)	H2O(g)	O2(g)	Quartz	Sepiolite
INRS292(X12)	-2,11	-0,06	0,09	0,33	-9,23	-0,58	-1,85	-24,23	-1,83	-38,8	0,79	-7,94
INRS293	-2,22	-0,23	-0,08	0,25	-11,14	-1,11	-1,97	-22,78	-1,83	-41,75	0,72	-9,34
INRS294(T6-E)	-1,9	0,38	0,53	0,34	-4,84	0,65	-1,65	-30,02	-1,85	-27,5	0,81	-4,95
INRS295	-2,84	-0,08	0,08	0,05	-4,99	-0,25	-2,58	-26,69	-1,95	-35,42	0,53	-5,28
INRS296(S03)	-2,86	0,88	1,03	0,43	-1,69	2,25	-2,6	-29,16	-1,84	-29,06	0,89	-2,73
INRS300	-2,54	-0,83	-0,68	0	-8,88	-1,98	-2,28	-28,65	-1,92	-31,19	0,47	-8,03
INRS301	-2,22	-0,28	-0,12	0,14	-6,42	-0,93	-1,96	-29,55	-1,88	-28,81	0,61	-6,26
P01	-2,51	0,27	0,43	-0,1	-2,72	0,84	-2,25	-34,12	-1,94	-20,4	0,38	-4,05
P02_ROC	-2,82	-0,14	0,02	0,23	-3,01	-0,02	-2,56	-29,68	-1,94	-29,3	0,71	-3,71
P02_SED	-2,51	-0,12	0,03	0,19	-7,94	-0,62	-2,26	-33,88	-1,82	-19,35	0,65	-7,35
P03	-0,51	0,01	0,16	-0,05	-7,29	-0,82	-0,26	-18,45	-1,96	-52,07	0,44	-6,95
P04	-3,81	-0,83	-0,67	-0,13	-11,31	-1,93	-3,56	-19,55	-1,93	-49,42	0,35	-9,85
P05	-4,26	-0,53	-0,38	-0,25	-7,37	-0,93	-4	-28,05	-1,91	-32,26	0,22	-7,47
P06	-2,93	0,18	0,34	-0,08	-2,77	0,25	-2,67	-30,47	-1,92	-27,55	0,4	-4,08
P07	-4,76	0,04	0,19	-0,18	-2,22	-0,03	-4,51	-33,46	-1,93	-21,62	0,3	-3,87
P08	-0,29	0,51	0,67	0,04	-3,55	0,74	-0,04	-13,15	-1,95	-62,51	0,53	-4,34
P09	-2,92	-0,2	-0,04	0,1	-3,72	-0,33	-2,66	-28,95	-1,95	-30,95	0,59	-4,35
P10	-2,5	0,09	0,25	-0,03	-12,88	-2,73	-2,25	-29,92	-1,98	-29,32	0,46	-10,61
P11	-3,37	-0,04	0,12	-0,72	-3,18	0,04	-3,12	-16,85	-1,94	-54,99	-0,24	-5,39
P12	-3,71	-0,45	-0,3	-0,41	-4,93	-0,42	-3,45	-18,84	-1,94	-51,02	0,07	-6,04
P13	-4,42	0,01	0,16	-0,17	-2,96	0,7	-4,17	-19,27	-1,95	-50,31	0,31	-4,29
P14_ROC	-4,86	1,07	1,23	0,07	1,91	2,35	-4,61	-30,15	-1,95	-28,52	0,55	-0,65
P14_SED	-2,41	0,98	1,14	0,11	2,05	1,78	-2,15	-31,74	-1,93	-25,13	0,59	-0,53
P15	-4,36	-0,17	-0,01	-0,21	-0,63	-0,47	-4,1	-33,37	-1,92	-21,64	0,27	-2,89
P16	-3,47	-0,32	-0,16	-0,09	-3,47	-0,47	-3,21	-41	-1,95	-6,81	0,39	-4,5
P17	-4,49	0,07	0,22	-0,68	-5,19	-0,04	-4,24	-18,96	-1,92	-50,47	-0,2	-6,72
P18_ROC	-3,38	0,97	1,13	-0,49	1,58	2,02	-3,13	-29,57	-2,02	-30,55	0	-1,64
P18_SED	-2,81	0,57	0,73	0,09	-0,75	0,91	-2,55	-34,99	-1,93	-18,62	0,57	-2,42
P19	-2,98	0,13	0,29	-0,24	3,37	0,96	-2,73	-32,05	-1,9	-24,09	0,24	-0,31
P20	-3,31	0,2	0,35	-0,27	-0,66	0,42	-3,05	-23,45	-1,97	-42,14	0,21	-2,89
P21	-2,39	-0,28	-0,12	-0,05	-5,5	-0,78	-2,14	-21,16	-1,91	-46,03	0,43	-5,87
P22_ROC	-3,12	0,27	0,42	-0,15	-0,79	0,25	-2,86	-34,27	-1,89	-19,55	0,33	-2,95
P22_SED	-2,88	-0,38	-0,22	-0,04	-5,7	-1,12	-2,63	-35,29	-1,95	-18,24	0,44	-5,91
P23	-4,04	0,48	0,64	-0,43	-0,97	1,31	-3,79	-20,27	-1,94	-48,15	0,05	-3,44
P24	-3,33	-0,45	-0,29	0,14	-5,12	-1,02	-3,07	-27,05	-1,96	-34,9	0,62	-5,2
P25	-3,6	0,73	0,87	-0,12	-0,93	2,52	-3,38	-23,68	-1,51	-35,76	0,31	-3,94
PUITS_MSH	-2,92	0,49	0,65	-0,07	1,5	0,66	-2,66	-32,8	-1,96	-23,35	0,41	-1,14
RS01	-0,19	0,29	0,45	0,2	-6,33	0,55	0,07	-30,2	-1,99	-28,87	0,68	-5,85
RS01_49'	-0,54	0,31	0,45	--	--	1,21	-0,32	-23,06	-1,51	-37,01	--	--
RS01_59'	-0,48	0,61	0,75	--	--	1,71	-0,26	-23,68	-1,51	-35,77	--	--
RS01_75'	-0,33	0,62	0,77	--	--	1,61	-0,12	-23,4	-1,51	-36,32	--	--
RS02_32'	-2,19	0,36	0,5	--	--	1,36	-1,97	-24,4	-1,51	-34,32	--	--
RS02_54'	-1,79	0,51	0,66	--	--	1,64	-1,58	-24,4	-1,51	-34,32	--	--
RS02_ROC	-3,11	-1,59	-1,43	-0,48	-13,58	-3,39	-2,86	-20,95	-1,91	-46,47	-0,01	-11,99
RS02_SED	-3,23	-0,82	-0,67	0,15	-9,75	-1,57	-2,98	-22,47	-1,93	-43,67	0,63	-8,33
RS04	-4,26	0,21	0,37	0,09	-10,57	-1,31	-4	-18,28	-1,97	-52,56	0,58	-8,88
RS05_ROC	-3,76	0,15	0,31	0,02	-1,81	0,32	-3,5	-21,06	-2	-47,37	0,51	-3,09
RS05_SED	-2,1	0,67	0,83	0,03	1,51	1,21	-1,84	-20,06	-2,06	-50,14	0,52	-0,72
SOURCE_MSH	-3,71	-2,36	-2,2	0,07	-11,02	-4,55	-3,46	-29,84	-1,92	-28,78	0,54	-9,34
X07	-1,7	-0,11	0,04	-0,26	-7,26	-0,57	-1,45	-37,43	-1,86	-12,8	0,21	-7,54
X22	-2,41	-0,45	-0,3	0,02	-10,63	-1,46	-2,16	-30,63	-1,85	-26,27	0,49	-9,34
X23	-2,18	-1,04	-0,89	0,16	-12,52	-2,49	-1,94	-36,3	-1,73	-13,36	0,61	-10,66
X24	-5,26	-0,02	0,14	0,36	-8,01	0	-5,01	-31,39	-1,89	-25,29	0,83	-6,93

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	SiO ₂ (a)	Talc	Halite	CO ₂ (g)	Strontianite
INRS101	-0,57	-1,18	-7,15	-2,32	-1,3
INRS102	-0,76	-1,52	-8,04	-2,89	-1,23
INRS103	-0,62	-4,83	-7,38	-1,3	-1,16
INRS105	-0,94	-2,93	-7,6	-2,25	-0,97
INRS106	-1,11	1,3	-7,76	-3,57	-0,53
INRS107	-1,03	-1,12	-6,38	-2,67	-0,13
INRS108	-1,16	-14,12	-7,09	-1,24	-3,63
INRS109	-0,85	-0,14	-7,1	-2,98	-0,58
INRS110	-0,67	-5,59	-7,69	-1,92	-1,72
INRS111	-0,7	-3,01	-6,75	-1,89	-0,84
INRS112	-1	-0,8	-6,74	-3,12	-0,56
INRS113	-1,06	0,61	-6,77	-3,04	-0,2
INRS114	-1	0,27	-5,69	-2,76	-0,06
INRS115	-1,11	-4,35	-7,71	-2,36	-1,04
INRS116	-1,17	-4,57	-7,46	-2,44	-1,5
INRS117	-0,91	-7,01	-6,87	-2,24	-2,98
INRS118	-1,12	-4,92	-6,58	-1,99	-0,63
INRS119	-0,95	-3,38	-7,9	-2,18	-0,92
INRS120	-0,8	-4,97	-9,65	-2,22	-2,14
INRS121	-1,02	-16,42	-10,27	-1,41	-4,71
INRS122	-0,82	-3,39	-7,43	-1,99	-1,52
INRS123	-1,01	-3,52	-7,36	-2,32	-0,97
INRS124	-0,9	-2,87	-8,35	-2,27	-1,81
INRS125	-1	-5,71	-9,43	-2,28	-1,37
INRS126	-1,04	-7,2	-8,43	-2,3	-1,44
INRS127	-0,68	-4,33	-4,6	-1,34	-1,2
INRS128	-0,91	-1,23	-4,77	-2,18	-0,26
INRS129	-0,7	-1,21	-5,29	-2,12	-0,94
INRS130	-0,91	-1,74	-6,78	-2,21	-0,68
INRS131	-0,8	-0,98	-8,5	-2,21	-0,83
INRS132	-0,7	-4,78	-7,36	-2,06	-2,14
INRS133	-0,81	-4,67	-5,81	-1,67	-1,27
INRS134	-0,92	-5,99	-7,4	-1,54	-2,07
INRS135	-1,06	-4,81	-8,25	-1,85	-1,52
INRS136	-0,83	-3,52	-7,53	-2,02	-1,41
INRS137	-0,73	-5,07	-6,59	-1,26	-2,26
INRS138	-0,91	-6,51	-7,69	-1,67	-1,91
INRS139	-0,65	-5,57	-8,16	-1,65	-1,95
INRS140	-0,87	0,12	-7,24	-2,75	-0,32
INRS141	-0,76	-2,71	-7,76	-2,5	-1,06
INRS142	-0,75	-2,26	-7,13	-2,45	-1,75
INRS143	-0,8	-0,03	-8,03	-2,63	-0,93
INRS144	-0,86	-8,03	-7,64	-1,56	-2,29
INRS145	-0,89	-5,49	-6,92	-1,32	-1,44
INRS146	-0,61	-4,06	-6,71	-1,41	-1,19
INRS147	-0,74	-2,53	-8,91	-2,16	-1,59
INRS148	-0,82	-3,68	-8,52	-2,26	-1,75
INRS149	-0,83	-0,54	-9,17	-2,72	-1,07
INRS150	-0,82	-5,28	-8,55	-1,97	-1,55
INRS151	-1,23	-16,18	-9,1	-1,19	-3,98
INRS152	-0,82	-6,23	-8,59	-1,92	-1,87
INRS153	-1,01	-0,35	-6,42	-2,96	-0,6
INRS154	-0,87	-0,62	-9,06	-2,71	-1,52
INRS155	-0,83	-6,87	-6,84	-1,67	-1,97
INRS156	-0,83	-2,76	-10,12	-2,71	-2,47
INRS157	-1,01	-7,7	-8,79	-1,8	-2,63
INRS158	-1,53	-8,5	-8,67	-2,22	-2,87
INRS159	-0,6	-5,76	-6,64	-0,93	-2,13
INRS160	-0,9	-0,15	-9,59	-3,15	-1,41
INRS161(X21)	-1,12	-4,91	-7,29	-1,62	-1,77
INRS162	-0,98	0,05	-8,11	-3,05	-1,23
INRS163	-1,03	-19,11	-8,33	-0,57	-4,61
INRS164	-0,8	-9,22	-8,37	-1,36	-2,57

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	SiO ₂ (a)	Talc	Halite	CO ₂ (g)	Strontianite
INRS165	-0,78	-9,29	-8,38	-1,11	-2,65
INRS166	-0,79	-0,05	-9,1	-2,72	-1,03
INRS167	-1,32	-19,33	-10,75	-0,98	-4,12
INRS168	-0,77	-12,33	-8,93	-1,31	-3,77
INRS169	-1,04	-4,19	-8,15	-2,4	-1,5
INRS170	-0,75	-6,81	-10,36	-1,72	-2,55
INRS171	-1,01	-11,23	-8,38	-1,54	-3,16
INRS172	-0,76	-5,96	-8,59	-1,94	-2,15
INRS173	-0,93	-9,72	-10,45	-1,73	-3,35
INRS174	-0,85	0,16	-8,25	-2,74	-1,57
INRS175	-0,76	1,21	-9,83	-3,06	-0,91
INRS176	-0,72	-3,38	-7,84	-2,53	-1,78
INRS177	-1,02	-3,1	-6,22	-2,36	-0,97
INRS178	-0,8	-4,78	-9,5	-2,16	-1,81
INRS179	-1,38	-24,92	-11,34	-0,22	-6,07
INRS180	-0,91	-22,06	-10,52	0,12	-5,19
INRS181	-1	-3,59	-6,23	-2,86	-0,96
INRS182	-0,75	-0,58	-6,1	-1,82	-0,04
INRS183	-0,99	-1,55	-4,47	-1,98	-0,36
INRS184	-0,82	-7,13	-8,74	-2,24	-2,88
INRS185	-0,94	-2,92	-6,54	-2,3	-0,99
INRS186	-0,85	-5,63	-7,14	-1,8	-2,1
INRS187	-1,03	-4,33	-6,57	-2,09	-1,08
INRS188	-1,02	-3,36	-4,44	-1,95	-0,51
INRS189	-1,03	-3,07	-5,54	-2,31	-0,56
INRS190	-0,89	-3,96	-6,69	-1,38	-1,85
INRS191	-1	-5,11	-8,1	-2,01	-1,77
INRS192	-1,05	-2,17	-6,61	-2,85	-1
INRS193	-0,76	-2,87	-6,99	-1,83	-0,32
INRS194	-0,79	-3,26	-7,67	-2,14	-1,59
INRS195	-0,84	-2,31	-7,74	-2,35	-1,42
INRS196	-0,93	-1,91	-7,29	-2,91	-1,45
INRS197	-0,68	-6,07	-8,2	-1,41	-1,46
INRS198	-0,74	-1,94	-7,06	-2,27	-0,47
INRS199	-0,8	-3,92	-8,82	-1,87	-1,3
INRS201	-1,08	1,86	-6,88	-3,93	-0,01
INRS202	-0,63	-3,76	-6,51	-1,87	-1,11
INRS203	-0,82	0,51	-8,2	-2,71	-0,23
INRS204	-0,66	-5,13	-8,23	-1,56	-1,46
INRS205	-0,7	-0,82	-8,01	-2,82	-1,08
INRS206	-0,84	-0,64	-6,77	-2,39	-0,24
INRS207	-0,97	0,72	-7,4	-3,1	0
INRS208	-0,65	-1,21	-7,53	-2,17	-0,67
INRS209	-0,85	-4,77	-7,74	-1,65	-1,17
INRS210	-0,64	-11,21	-6,59	-2,19	-4,31
INRS211	-0,99	1,11	-5,89	-3,22	0,18
INRS212	-0,84	-1,66	-6,63	-2,78	-0,63
INRS213	-0,76	0,38	-8,45	-3,02	-0,79
INRS214	-0,89	1,38	-5,25	-3,01	0,35
INRS215	-0,69	-0,07	-7,5	-2,74	-0,32
INRS216	-0,93	0,99	-6,55	-3,38	-0,13
INRS217	-0,77	-2,13	-7,34	-2,23	-0,99
INRS218	-1	1,31	-7,79	-3,43	-0,11
INRS219	-0,66	-1,01	-7,86	-2,55	-0,88
INRS220	-0,91	-6,01	-6,99	-2,58	-2,81
INRS221	-1,1	2,21	-8,06	-3,19	-0,22
INRS222	-0,94	2,25	-6,68	-3,11	-0,19
INRS223	-0,92	0,83	-6,61	-2,81	-0,32
INRS224	-1,11	0,98	-6,07	-3,73	-0,31
INRS225	-0,89	-4,67	-8,8	-2,39	-1,56
INRS226	-0,63	-1,99	-7,41	-1,84	-1,5
INRS227	-1,03	2,09	-7,93	-3,96	-0,83
INRS228	-0,82	-4,05	-7,2	-1,84	-1,13

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Échantillon	SiO ₂ (a)	Talc	Halite	CO ₂ (g)	Strontianite
INRS229	-1,12	1,27	-7,21	-3,4	-0,6
INRS230	-1,05	1,62	-7,17	-3,55	-0,55
INRS231	-0,61	-3,34	-6,81	-1,49	-0,67
INRS232	-0,81	-3,7	-6,86	-2,2	-1,65
INRS233	-0,54	-1,75	-7,61	-2,16	-1,25
INRS234	-0,66	-4,12	-6,6	-1,75	-1,2
INRS235	-1,12	3,16	-7,72	-3,89	-0,31
INRS236	-0,81	-2,26	-7,63	-2,35	-1,11
INRS237	-0,88	-2,8	-8,42	-2,52	-1,55
INRS238	-0,82	-0,21	-7,62	-2,66	-0,85
INRS239	-0,76	-3,1	-7,75	-1,78	-1,05
INRS240	-0,76	-3,88	-7,58	-1,64	-1,41
INRS241	-0,78	-0,94	-7,26	-2,08	0,01
INRS242	-1,04	-9,88	-8,8	-1,01	-2,91
INRS243	-0,93	-4,23	-9,88	-1,93	-1,95
INRS244	-0,82	-5,36	-7,39	-1,39	-1,59
INRS245	-0,75	-5,02	-8,99	-1,73	-1,75
INRS246	-0,9	-8,69	-9,35	-1,29	-2,22
INRS247	-0,76	-4,27	-7,53	-1,61	-0,84
INRS248	-0,71	-4,53	-6,97	-1,64	-1,24
INRS249	-0,82	3,69	-7,91	-3,08	0,51
INRS250	-0,67	-0,86	-6,43	-2,06	-0,41
INRS251	-0,78	-3,32	-7,26	-1,75	-0,56
INRS252	-0,95	-2,2	-7,84	-2,19	-0,54
INRS253	-0,67	-3,34	-7,77	-1,47	-0,83
INRS254	-0,6	-3,17	-6,02	-1,54	-0,83
INRS255	-1,03	-2,12	-9,06	-2,21	-1,33
INRS256	-0,85	-1,13	-7,46	-2,29	-0,08
INRS257	-0,72	-3,24	-5,3	-1,68	-1,65
INRS258	-0,78	-0,02	-8,05	-2,54	0,21
INRS259	-0,89	1,81	-9,1	-3,37	-0,17
INRS260	-0,95	-0,03	-9,26	-3,17	-1,17
INRS261	-0,91	-2,53	-9,76	-2,83	-1,22
INRS262	-0,81	-2,15	-7,76	-2,26	-1,21
INRS263	-0,76	-10,28	-9,23	-2,07	-3,8
INRS264	-0,95	-3,45	-9,29	-2,7	-1,78
INRS265	-0,85	-2,77	-9,8	-2,75	-1,44
INRS266	-1,04	-23,12	-9,17	0,35	-5,48
INRS267	-0,83	-17,21	-10,7	-0,68	-4,57
INRS268	-0,91	-15,08	-10,34	-0,98	-4,28
INRS269	-1	-17,74	-10,24	-0,93	-4,86
INRS270	-0,88	-7,46	-8,87	-1,97	-1,99
INRS271	-0,82	1,75	-6,27	-2,92	-0,46
INRS272	-0,82	0,16	-6,34	-2,73	-0,45
INRS273	-0,85	-9,92	-7,17	-1,58	-3,16
INRS274	-1,11	-15,45	-10,57	-2,05	-5,14
INRS275	-0,82	0,93	-10,01	-3,52	-1,26
INRS276	-0,68	0,5	-6,85	-2,22	-0,23
INRS277	-0,92	1,3	-7,52	-3,13	0,01
INRS278	-0,75	1,32	-7,31	-2,53	-0,26
INRS279	-0,89	-0,27	-6,11	-2,91	-0,04
INRS280	-0,95	3,43	-7,62	-3,83	-0,13
INRS281	-1	-5,76	-7,25	-1,94	-1,11
INRS282	-0,96	-10,46	-8,59	-1,49	-2,57
INRS283	-0,67	-1,72	-7,7	-2,27	-0,34
INRS284	-0,67	-1,14	-7,2	-2,32	-0,36
INRS285	-0,53	-4,3	-6,68	-1,63	-1,03
INRS286	-0,76	1,55	-8,96	-3,04	-0,57
INRS287(T5-B)	-0,72	1,38	-5,09	-2,53	-0,31
INRS288(S9-D)	-0,9	-4,53	-9,26	-1,56	-1,3
INRS289(S8-C)	-0,72	3,22	-7,95	-2,64	-0,19
INRS290(T9-B)	-0,94	-1,57	-8,27	-2,5	-0,96
INRS291(T2-A)	-0,72	-0,37	-8,06	-2,19	-0,76

Tableau E.5: Indices de saturation (SI)

Echantillon	SiO2(a)	Talc	Halite	CO2(g)	Strontianite
INRS292(X12)	-0,55	-5,04	-8,69	-1,27	-1,46
INRS293	-0,63	-7,11	-8,85	-1,04	-1,77
INRS294(T6-E)	-0,55	-0,65	-7,71	-1,95	-0,51
INRS295	-0,84	-1,41	-8,13	-2,62	-0,79
INRS296(S03)	-0,46	2,69	-8,19	-1,83	-0,36
INRS300	-0,9	-5,4	-6,89	-2,32	-1,43
INRS301	-0,75	-2,64	-8,78	-2,51	-1,36
P01	-0,99	0,57	-4,72	-2,73	0,22
P02_ROC	-0,67	0,91	-9,46	-2,87	-1,24
P02_SED	-0,69	-4,03	-9,05	-1,75	-1,6
P03	-0,94	-3,91	-5,31	-2,59	-1,01
P04	-1,02	-8,09	-9,84	-1,55	-1,88
P05	-1,15	-4,39	-7,96	-2,22	-0,58
P06	-0,97	0,55	-7,6	-3,19	-0,18
P07	-1,07	0,91	-6,43	-3,57	-0,47
P08	-0,85	0,01	-3,33	-2,71	-0,44
P09	-0,79	-0,05	-9,65	-2,96	-1,13
P10	-0,93	-9,47	-10,06	-2,72	-1,56
P11	-1,62	-1,15	-9,18	-3,48	-0,89
P12	-1,31	-2,27	-6,36	-2,73	-0,96
P13	-1,07	0,17	-4,93	-2,59	-0,07
P14_ROC	-0,83	5,52	-5,58	-3,46	0,47
P14_SED	-0,79	5,74	-8,75	-3,95	-0,77
P15	-1,1	2,44	-8,62	-4,35	-0,25
P16	-0,99	-0,18	-6,31	-3,21	-0,59
P17	-1,57	-3,07	-8,19	-2,95	-0,27
P18_ROC	-1,4	4,04	-5,95	-4,01	0,64
P18_SED	-0,8	2,92	-8,12	-3,49	-0,83
P19	-1,13	6,39	-7,47	-4,56	-0,64
P20	-1,17	2,26	-9,2	-3,91	-0,84
P21	-0,94	-2,1	-7,71	-2,82	-1,48
P22_ROC	-1,04	2,42	-9,39	-3,95	-0,81
P22_SED	-0,94	-2,31	-8,84	-3,02	-1,77
P23	-1,33	1,64	-4,67	-3,28	0,66
P24	-0,76	-1,39	-8,7	-2,94	-1,68
P25	-0,96	2,52	-3,98	-1,68	0,32
PUITS_MSH	-0,97	4,82	-7,87	-4,54	0,48
RS01	-0,7	-2,48	-3,95	-1,68	-0,74
RS01_49'	--	--	-3,47	-2,24	-0,81
RS01_59'	--	--	-3,54	-2,58	-0,49
RS01_75'	--	--	-3,71	-2,41	-0,52
RS02_32'	--	--	-7,11	-2,47	-0,79
RS02_54'	--	--	-7,01	-2,55	-0,57
RS02_ROC	-1,38	-11,06	-7,08	-1,72	-2,6
RS02_SED	-0,74	-5,96	-7,17	-1,54	-1,79
RS04	-0,81	-6,92	-4,55	-2,11	-0,3
RS05_ROC	-0,89	1,67	-7,65	-3,41	-0,46
RS05_SED	-0,89	4,97	-7,75	-4,19	-0,26
SOURCE_MSH	-0,83	-7,4	-10,24	-2,6	-3,41
X07	-1,15	-4,27	-8,77	-2,28	-1,49
X22	-0,86	-7,07	-8,02	-1,51	-1,91
X23	-0,71	-8,62	-9	-1,12	-2,51
X24	-0,53	-3,79	-7,22	-1,17	-1,83

ANNEXE F

TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES

F.1 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES

Tableau F.1 : Fichier d'entrée (190 éch. x 16 paramètres) pour l'analyse statistique multivariée avec *Statistica 6.1*

Tableau F.2 : Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP)

Tableau F.1: Fichier d'entrée (190 éch.x 16 paramètres) pour l'analyse statistique multivariée avec *Statistica 6.1*

ID	pH	pe	TDS (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	Ba (mg/L)	B (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	K (mg/L)	Si (mg/L)	Na (mg/L)	Sr (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
INRS102	7,96	2,53	246,90	145,41	0,08	0,11	0,024	19	7,9	4,3	0,12	1,4	7	38	0,54	15
INRS103	6,93	3,37	947,66	560,60	12	0,096	0,066	140	44	32	0,067	16	9,7	35	2,5	99
INRS105	7,44	4,78	441,93	194,72	0,04	0,088	0,047	74	33	28	0,035	0,78	4,7	27	2,9	74
INRS106	8,73	1,08	318,70	188,19	0,03	0,089	0,04	15	9,5	3,2	0,027	0,84	3,3	61	0,39	27
INRS107	8,15	2,98	732,90	386,58	0,04	0,066	0,08	9,4	78	6,7	0,1	0,47	3,8	190	2,1	50
INRS108	6,1	8,76	253,97	85,40	0,01	0,08	0,019	28	63	3,1	0,0007	2,1	3	44	0,25	22
INRS109	8,08	1,39	323,99	157,22	0,04	0,14	0,017	22	50	9,8	0,018	0,48	5,7	53	1,8	18
INRS110	7,11	3,07	340,10	194,93	0,33	0,73	0,051	51	34	7,6	0,46	1	8,6	20	0,99	13
INRS111	7,31	3,09	797,52	340,97	0,54	0,098	0,049	84	80	32	0,14	3,2	7,9	80	3,6	160
INRS112	8,22	7,96	365,74	156,73	0,01	0,099	0,065	19	77	4,9	0,011	0,55	4,1	80	1,4	17
INRS113	8,79	2,88	1118,00	762,10	0,4	0,2	0,57	2,4	21	1,7	0,0016	1,9	3,7	290	0,24	0,5
INRS114	8,58	0,79	1513,72	880,30	0,97	0,25	0,75	3,8	190	2,8	0,0063	5,6	4,2	400	0,49	0,2
INRS115	7,53	6,09	301,77	182,49	0,03	0,033	0,014	12	17	11	0,013	0,23	3,1	38	1,9	34
INRS116	7,67	0,13	334,46	206,63	0,03	0,013	0,036	8,7	20	5,2	0,021	0,28	2,8	58	0,41	29
INRS117	7,5	5,77	400,86	219,01	0,01	0,0033	0,0051	2,5	45	0,76	0,022	1,2	5,1	100	0,019	21
INRS120	7,26	2,26	205,54	133,97	0,04	0,091	0,0025	26	0,81	8,8	0,072	0,42	6,3	8,9	0,36	13
INRS122	7,31	1,94	463,30	267,91	0,08	0,11	0,023	37	41	31	0,0078	1,2	6	31	0,8	41
INRS123	7,63	6,74	614,22	255,33	0,18	0,033	0,075	15	13	11	0,008	0,6	4	120	1,6	190
INRS125	7,36	3,87	213,19	146,09	0,04	0,02	0,013	20	0,52	5,2	0,049	0,57	4,1	23	1,5	8,8
INRS126	7,35	3,49	203,84	133,92	0,01	0,11	0,012	11	3,3	2	0,028	0,39	3,7	36	1,4	9,1
INRS127	6,96	3,41	3158,26	597,13	4,2	0,93	0,047	220	1500	60	2,8	9,8	8,4	720	2,8	33
INRS128	7,98	1,63	2603,73	872,47	1,8	1,4	0,8	14	950	12	0,025	8,5	4,9	730	1,4	0,8
INRS129	7,75	3,15	1488,31	546,52	1,5	0,6	0,7	8	450	11	0,011	12	8,6	440	0,63	0,2
INRS130	7,82	3,69	749,93	509,88	1,9	1,6	0,5	10	39	12	0,022	16	5	150	0,91	0,1
INRS131	7,69	2,55	508,10	376,77	1,4	1,5	0,3	20	2,1	27	0,029	15	6,4	52	1,1	0,3
INRS132	7,26	3,31	319,19	194,86	0,87	0,33	0,1	18	30	6,9	0,079	3,6	8,2	48	0,25	0,05
INRS133	7,37	3,47	1189,57	657,47	1,7	0,72	0,47	13	190	9,2	0,037	5,6	6,2	300	0,58	0,05
INRS134	6,93	5,12	546,00	316,87	0,07	0,14	0,05	58	48	32	0,087	4,7	4,8	29	0,48	47
INRS135	7,23	3,73	469,73	304,50	0,09	0,058	0,067	46	8,8	29	0,022	5,6	3,5	22	0,85	46
INRS136	7,38	3,27	494,06	292,19	0,1	0,052	0,047	38	19	21	0,012	2	5,8	54	0,82	55
INRS137	6,85	3,10	1150,47	524,09	0,03	0,12	0,0063	170	200	60	0,68	1,1	7,5	49	0,28	130
INRS138	7	6,71	507,67	268,08	0,05	0,074	0,012	87	34	12	0,8	1,5	5,1	21	0,66	73
INRS139	6,96	3,92	402,07	255,92	0,01	0,14	0,0058	61	17	16	0,53	0,96	8,9	14	0,66	18
INRS140	7,94	2,42	386,98	193,89	0,01	0,13	0,01	39	62	20	0,029	0,69	5,7	32	3,8	26
INRS141*	7,56	2,46	279,97	133,75	0,01	0,11	0,0054	31	21	6,4	0,096	0,97	7,7	28	2,1	42
INRS142	7,5	5,12	463,91	146,01	0,01	0,0027	0,0025	78	160	24	0,0009	1,4	7,1	16	0,57	23
INRS143	7,87	3,55	334,18	218,39	0,02	0,099	0,011	22	13	24	0,012	1	6,4	24	0,95	17
INRS144	6,78	5,78	380,47	207,22	0,04	0,2	0,013	59	36	9	0,077	5,2	5,6	22	0,55	30
INRS145	6,87	6,44	776,77	438,74	0,41	0,096	0,1	70	59	34	0,08	2,6	5,7	75	1,7	85
INRS146	6,97	2,88	981,35	475,26	0,3	0,42	0,12	140	140	46	0,14	6,4	10	52	2,6	100
INRS147	7,47	4,82	372,35	255,56	0,06	0,11	0,0051	51	5,9	19	0,016	0,55	7,4	7	0,46	17
INRS148	7,48	7,07	343,38	206,87	0,05	0,018	0,0053	59	13	9	0,06	0,92	6,2	7,9	0,38	33
INRS149	7,88	1,88	277,63	181,98	0,14	0,088	0,033	20	1,3	18	0,013	2,8	5,9	17	0,8	23
INRS150	7,22	10,01	313,22	219,25	0,03	0,14	0,012	41	7,9	9,4	0,67	1,1	6	12	1	9,5
INRS151	5,99	9,77	133,62	74,44	0,04	0,093	0,011	28	4	1,8	0,0026	3	2,4	6,3	0,16	11
INRS152	7,16	10,42	347,97	219,28	0,04	0,074	0,011	65	13	6,2	0,071	0,85	6	6,6	0,57	24
INRS153	8,24	4,94	542,31	241,10	0,12	0,039	0,11	14	100	7,7	0,007	0,39	3,9	130	0,87	38
INRS154	7,95	8,94	391,55	218,18	0,2	0,019	0,0056	37	0,92	14	0,11	0,38	5,5	32	0,22	76
INRS155	6,96	3,58	509,01	243,73	0,06	0,051	0,0092	59	100	8,9	0,26	1,4	6	50	0,68	33
INRS156	7,65	2,12	164,59	106,98	0,05	0,0088	0,0072	19	0,69	9	0,08	0,47	5,9	3,5	0,085	12
INRS157	7,02	5,34	308,14	207,15	0,03	0,009	0,0025	57	8,2	6,6	0,0009	1,1	3,9	6,6	0,14	13
INRS160	8,18	6,35	200,17	132,76	0,08	0,012	0,0025	29	1,9	7,2	0,13	0,63	5,1	4,4	0,24	12
INRS162	8,15	0,92	243,70	157,03	1,3	0,83	0,009	22	15	13	0,031	1,2	4,2	17	0,34	8
INRS163	5,23	5,80	110,97	52,79	0,01	0,052	0,0025	16	17	2,5	0,0016	0,38	4	8,8	0,28	5,3
INRS164	6,53	4,92	298,42	182,88	0,06	0,36	0,0058	50	16	9,3	0,085	0,62	6,4	8,9	0,56	17
INRS165	6,41	5,81	376,52	243,85	0,02	0,064	0,0062	62	16	14	0,0002	1,1	6,8	9	0,47	16
INRS166	7,96	5,29	343,27	218,09	0,02	0,055	0,0071	59	3,3	13	0,027	0,64	6,8	8,3	0,62	25
INRS167	5,7	10,00	113,14	63,53	0,01	0,0064	0,0025	25	0,63	0,94	0,0024	0,21	1,9	0,89	0,27	18
INRS168*	6,27	5,64	189,38	110,98	0,01	0,0028	0,0025	38	13	3	0,0002	0,6	6,6	2,9	0,099	6,8
INRS169	7,48	3,94	253,36	146,02	0,1	0,11	0,021	18	7,6	12	0,059	0,52	3,7	31	0,9	30
INRS171	6,52	4,55	208,56	118,27	0,01	0,012	0,0071	36	15	4,4	0,25	0,44	3,9	9,1	0,22	17
INRS172	7,05	3,09	275,17	158,40	0,05	0,044	0,0025	49	15	9,3	0,27	0,58	7	5,8	0,51	22
INRS173	6,61	6,57	144,29	92,66	0,02	0,013	0,0025	20	0,63	8,2	0,0028	0,36	4,5	1,8	0,14	11
INRS174	7,89	4,94	285,05	169,73	0,04	0,052	0,0025	35	25	20	0,11	0,69	6,1	7,6	0,25	13
INRS175	8,16	1,08	238,86	156,96	0,05	0,056	0,0079	25	0,44	14	0,022	0,71	7,1	11	0,68	14
INRS176*	7,64	5,05	282,99	158,04	0,01	0,0047	0,013	16	9,7	3,9	0,028	1,4	7,7	49	0,3	28
INRS177	8,07	4,79	1019,30	653,34	0,63	0,21	0,51	2,9	84	2	0,0018	3,3	3,9	260	0,22	0,3

Tableau F.1: Fichier d'entrée (190 éch.x 16 paramètres) pour l'analyse statistique multivariée avec Statistica 6.1

INRS178	7,24	3,39	218,53	146,15	0,08	0,057	0,0025	30	1,7	11	0,029	0,51	6,4	6,1	0,74	9,2
INRS180	4,74	6,88	132,79	84,03	0,03	0,001	0,0025	25	0,61	2,1	0,01	0,35	5,1	1,6	0,15	9,3
INRS181	8,47	2,36	867,08	513,80	0,82	0,036	0,85	0,98	88	0,17	0,0019	1,7	4,3	240	0,11	2,7
INRS182	7,56	-0,41	2435,37	778,56	2,8	0,023	0,57	180	87	110	0,24	23	7	380	9,1	860
INRS183	7,79	1,60	3458,30	910,87	2,9	2,8	0,99	13	1200	32	0,0034	24	4,1	1200	1,9	66
INRS184	7,17	4,02	188,38	101,10	0,04	0,0064	0,021	6,6	1,5	2,2	0,013	1,4	6,3	39	0,1	23
INRS185	7,85	1,44	926,02	449,04	0,82	0,19	0,36	8,6	42	5,3	0,0083	8,9	4,7	250	0,55	150
INRS186	7,42	3,16	778,68	511,20	0,09	0,029	0,23	8,3	13	2,7	0,018	0,92	5,9	200	0,084	29
INRS187	7,86	2,68	1106,04	752,36	0,71	0,39	0,66	3,4	33	2,1	0,0035	3,1	3,8	300	0,24	0,3
INRS188	7,6	4,01	3254,01	620,23	1,5	0,18	0,86	32	1300	19	0,0068	17	3,8	1200	2,9	56
INRS189	8	3,57	1339,98	642,13	0,81	0,35	0,69	4,8	270	3,6	0,0029	5,7	3,7	400	0,74	1,7
INRS191	7,25	5,07	415,54	219,23	0,19	0,073	0,031	66	21	17	0,16	8,5	4	13	0,62	62
INRS192	8,19	4,57	603,00	265,22	0,54	0,036	0,39	6,7	52	1,7	0,0069	4	3,9	170	0,35	92
INRS193	7,37	3,92	657,86	438,29	1,1	2,5	0,22	34	37	25	0,017	7,6	7,1	98	6,8	2,1
INRS194	7,37	3,02	365,16	206,95	0,1	0,15	0,027	52	39	17	0,061	0,53	6,7	19	0,7	16
INRS195	7,65	3,03	383,60	243,13	0,13	0,049	0,042	19	10	12	0,053	1,1	5,9	62	0,46	23
INRS196	7,8	6,02	380,54	98,33	0,08	0,032	0,014	85	110	12	0,0035	2,5	4,8	16	0,82	46
INRS197*	6,82	7,00	535,91	329,09	0,36	0,17	0,045	85	13	22	0,076	2,5	8,5	17	2,4	49
INRS198	7,69	1,12	525,40	328,17	0,79	0,39	0,3	26	31	12	0,0048	0,77	7,2	97	3	14
INRS199	7,24	4,41	473,38	292,29	0,21	0,16	0,021	81	5,3	19	0,88	3,1	6,7	10	1,4	48
INRS201	9,2	3,84	484,37	265,45	0,46	0,074	0,5	2,6	34	0,69	0,013	0,52	3,7	130	0,37	16
INRS202	7,13	3,55	799,98	243,66	0,54	0,15	0,12	160	160	31	0,058	3	9,4	72	4,1	110
INRS203	8,05	4,85	470,52	278,36	0,47	1,2	0,11	26	2,8	18	0,05	4	6,2	78	2,7	48
INRS206	7,87	1,62	677,42	388,25	1,2	0,3	0,81	40	50	18	0,074	5,6	5,9	120	3	41
INRS207	8,46	4,35	425,06	287,08	0,96	0,74	0,29	12	16	4,8	0,016	3,9	4,4	84	1,6	2,3
INRS208	7,57	2,39	640,76	316,21	0,41	0,19	0,053	110	51	22	0,068	2,4	9,5	21	2,8	97
INRS209	7,14	2,55	776,28	402,03	0,43	0,14	0,059	130	24	26	0,53	3,7	5,7	28	2,1	150
INRS210	7,46	7,44	496,03	219,01	0,02	0,001	0,0091	0,025	64	0,012	0,0009	0,11	10	140	0,001	51
INRS211	8,62	0,73	848,12	332,01	0,81	0,51	0,24	9,9	200	3,6	0,0067	1	4,3	230	1,8	53
INRS212	8,04	1,97	481,70	229,98	0,07	0,19	0,053	36	88	3,7	0,11	1,7	5,9	91	1,3	17
INRS213	8,08	2,34	243,52	145,15	0,21	0,09	0,037	28	12	12	0,03	0,73	6,9	9,7	1,2	20
INRS214	8,26	4,27	1296,26	240,98	1	8,9	0,28	48	640	21	0,018	0,96	5,2	330	9,3	1,3
INRS215	8	4,07	388,82	230,13	0,43	0,33	0,11	34	24	9,5	0,15	4,1	8,2	44	2,8	24
INRS216	8,65	6,18	636,21	236,18	0,03	0,02	0,11	8	60	1,8	0,038	1,2	5,3	170	1,1	140
INRS217	7,59	1,48	509,12	291,88	0,55	0,26	0,045	55	31	16	0,12	2,5	7	51	1,3	46
INRS218	8,58	0,39	297,30	178,29	0,05	0,031	0,023	8,7	8,8	4,6	0,015	0,31	4,2	60	1,5	23
INRS219	7,81	1,43	349,76	230,72	0,52	0,18	0,025	42	22	12	0,17	2,5	8,5	21	1,2	0,4
INRS220	8,18	6,43	723,49	494,79	0,19	0,0078	0,37	0,15	19	0,075	0,0004	2,2	5,2	190	0,0029	1
INRS221	8,79	0,68	751,40	526,61	0,42	0,3	0,48	4,4	1,7	4,9	0,003	4	3,5	180	0,29	0,2
INRS222	8,69	0,19	773,63	495,42	0,71	0,36	0,56	7,9	39	4,7	0,0061	2,2	5	190	0,41	7
INRS223	8,48	0,99	900,41	597,10	0,61	0,19	0,44	5,8	40	3,7	0,012	3,3	5,2	220	0,41	6,8
INRS224	9,33	5,27	1128,97	618,68	0,62	0,021	0,91	0,79	100	0,22	0,0023	1,8	3,8	310	0,079	0,8
INRS225	7,53	6,40	263,74	170,32	0,05	0,028	0,021	49	8,2	4,2	0,0021	1,1	5,2	6,4	0,6	13
INRS226	7,31	2,81	692,95	377,48	0,16	0,17	0,022	91	52	44	0,19	4,2	9,7	27	0,66	76
INRS227	9,11	2,35	330,70	190,49	0,28	0,0039	0,13	2,4	4,9	0,82	0,0055	1,3	4,2	80	0,085	25
INRS228	7,31	0,55	670,37	377,48	0,22	0,2	0,094	89	43	16	0,045	3,1	6,2	53	1,5	75
INRS230	8,93	0,00	485,69	310,62	0,43	0,091	0,27	2,7	19	1,2	0,0041	1,8	4	120	0,15	3,2
INRS231	7,12	1,94	1056,09	560,42	1,4	0,44	0,12	160	100	40	0,69	6	9,9	58	5,2	110
INRS233	7,43	2,46	490,45	231,24	0,28	0,24	0,03	57	48	20	0,37	2,1	12	18	1,3	88
INRS234	7,15	2,76	739,74	328,93	0,22	0,54	0,081	100	150	23	0,56	1,9	8,7	61	2,2	56
INRS235	9,16	0,65	397,07	253,91	0,27	0,074	0,18	3,8	7,4	1,5	0,0021	1,2	3,7	87	0,19	7,8
INRS236	7,61	7,56	436,26	231,05	0,3	0,14	0,052	50	26	16	0,026	2,1	6,3	31	1,2	66
INRS237	7,62	1,64	356,07	158,07	0,11	0,078	0,016	59	15	12	0,66	1,4	5,4	8,6	0,61	90
INRS238*	7,91	0,99	420,28	218,23	0,37	0,13	0,053	47	25	16	0,026	2,1	6,4	33	1,1	64
INRS239	7,29	3,17	754,45	426,24	0,29	0,21	0,071	99	24	37	0,53	5,7	7	27	1,8	120
INRS241	7,6	2,71	694,65	425,59	1,1	1,1	0,15	88	57	35	0,1	4,9	7	35	9,3	33
INRS242	6,4	8,88	440,92	304,81	0,04	0,035	0,015	65	9,5	20	0,0098	0,65	3,8	5,8	0,22	27
INRS243	7,28	5,42	398,21	280,11	0,09	0,074	0,012	48	0,7	24	0,04	1,6	4,7	6,4	0,29	27
INRS244	6,9	4,19	674,91	402,17	0,44	0,11	0,031	90	40	28	0,66	2,4	6,6	37	1,2	61
INRS246	6,65	8,01	418,68	280,38	0,05	0,057	0,016	79	4,1	10	0,0017	1,2	5,2	3,8	0,65	29
INRS247	7,1	3,31	688,27	402,06	0,69	0,2	0,027	94	46	33	0,024	1,9	7	23	4,6	73
INRS248	7,11	3,12	728,50	377,68	0,19	0,37	0,021	110	90	22	0,068	1,6	7,9	43	1,9	67
INRS249	8,49	1,42	463,31	334,43	0,96	1,5	0,23	23	9	25	0,0081	3,3	6,4	47	4,4	0,9
INRS250	7,52	3,13	1059,30	389,35	0,21	0,088	0,024	130	200	58	0,047	2,7	8,6	70	5,7	190
INRS251	7,21	4,97	751,94	377,60	0,19	0,089	0,093	86	61	46	0,0059	3,6	6,7	33	7,6	130
INRS252	7,44	3,89	1228,90	243,42	0,18	0,012	0,38	190	9,5	82	0,0046	3,9	4,5	60	9,8	630
INRS253	7,05	3,87	924,77	499,57	0,31	0,055	0,088	99	32	64	0,04	11	8,8	20	4,7	180
INRS254	7,21	3,32	1295,96	633,40	1,6	0,65	0,026	170	260	32	0,36	2,5	10	140	2,7	36
INRS255	7,64	3,26	511,15	340,43	0,16	0,054	0,068	55	1,8	30	0,0061	4,8	3,8	17	0,47	53

Tableau F.1: Fichier d'entrée (190 éch.x 16 paramètres) pour l'analyse statistique multivariée avec *Statistica 6.1*

INRS256	7,8	2,73	576,49	412,84	1,8	1,8	0,21	46	20	17	0,045	5,1	5,8	61	4,5	0,4
INRS257	7,18	2,92	1778,45	426,35	0,05	0,06	0,008	120	650	53	0,047	2,2	7,7	310	0,72	200
INRS258	7,84	2,14	482,91	254,87	0,17	0,06	0,08	56	13	28	0,013	2,3	6,8	24	14	89
INRS259	8,42	6,97	227,60	143,77	0,01	0,06	0,005	23	1,6	11	0,023	0,55	5,2	16	2,3	18
INRS260	8,22	0,93	254,79	144,73	0,05	0,014	0,0025	45	3,9	8,8	0,076	0,54	4,5	4,6	0,38	36
INRS261	7,83	3,95	194,76	121,36	0,07	0,061	0,0025	33	1,1	5,1	0,15	0,51	5,1	5,2	0,87	17
INRS262	7,52	5,46	493,77	231,16	0,05	0,094	0,019	72	36	25	0,026	4,4	6,4	17	1,2	94
INRS263	6,64	5,32	92,52	46,34	0,08	0,0033	0,0025	13	6,7	3,3	0,033	0,39	6,4	2,7	0,091	6,4
INRS264	7,74	5,99	212,08	133,61	0,03	0,041	0,013	42	4	4,3	0,0002	0,61	4,6	4,2	0,27	13
INRS265	7,83	2,24	229,12	145,62	0,03	0,17	0,0025	44	1,3	3,3	0,18	0,57	5,9	4	0,45	17
INRS266	4,44	7,95	118,39	68,06	0,05	0,026	0,012	21	5,9	4,3	0,01	1,2	3,9	3,7	0,18	8,1
INRS267	5,51	6,02	145,80	80,66	0,03	0,009	0,0025	27	0,4	2,5	0,24	0,2	5,9	1,6	0,12	21
INRS268	5,8	6,42	132,69	79,35	0,03	0,0039	0,0025	21	0,5	4,3	0,0096	0,25	4,9	2,9	0,12	14
INRS269	5,69	8,73	107,76	68,41	0,03	0,0042	0,0025	21	1,2	1,1	0,0004	0,52	4	1,5	0,045	5,6
INRS270	7,02	5,73	213,70	134,04	0,46	0,054	0,043	9,5	1,2	4,7	0,0064	0,83	5,3	36	0,86	16
INRS271	8,44	1,37	742,06	418,96	2,1	0,32	0,34	6,1	110	7,4	0,0097	8,2	6,3	170	0,44	0,1
INRS273	6,52	6,56	266,49	101,20	0,01	0,01	0,0025	33	55	4,4	0,0058	0,83	6,1	42	0,24	17
INRS275	8,37	1,28	154,10	88,74	0,04	0,011	0,0025	23	0,61	4,9	0,046	0,99	6,2	5,1	0,32	16
INRS276	7,83	0,45	843,09	534,18	1	1,3	0,31	64	51	38	0,12	8,6	8,4	99	2,7	28
INRS277	8,45	2,62	392,46	263,19	0,71	0,48	0,19	12	13	6,2	0,011	5	5	77	1,8	0,3
INRS278	8,02	0,83	567,84	387,36	0,58	1,2	0,18	33	24	25	0,016	4,9	7,5	71	1,9	3,7
INRS279	8,52	1,68	1035,67	536,69	1,2	0,28	0,37	6,8	94	1,5	0,015	3,1	5,4	300	0,88	70
INRS280	9,04	1,31	351,79	215,22	0,46	0,19	0,26	5,6	9,5	2,2	0,0054	1,7	5,1	84	0,43	6,2
INRS281	7,26	8,18	423,05	255,76	0,02	0,072	0,059	15	21	8,8	0,029	0,41	4,1	91	2,2	22
INRS282	6,64	7,78	265,92	170,67	0,02	0,13	0,026	38	4,2	3,6	0,03	5	4,4	20	0,45	15
INRS283	7,65	2,93	493,97	303,92	0,09	0,23	0,032	48	12	12	0,12	2,3	8,8	58	4,8	38
INRS284	7,72	-0,36	501,05	315,92	0,85	1,9	0,28	27	27	14	0,014	5,4	8,7	80	3,6	12
INRS285	7,12	1,41	769,36	402,04	0,64	1,3	0,036	110	91	14	0,23	5,3	12	83	2,8	38
INRS286	8,2	1,18	282,69	180,94	1,5	0,22	0,088	24	2,3	15	0,037	7,3	7,1	16	1,2	20
INRS293	6,68	4,53	789,61	548,54	0,15	0,23	0,19	160	6,9	12	2	10	10	7,6	0,99	23
INRS295*	7,91	5,16	370,47	242,58	0,24	0,15	0,094	29	5	8,9	0,2	2,5	5,7	50	1,1	19
INRS300	7,49	6,51	422,32	182,52	0,12	0,05	0,053	18	45	3,2	0,067	1,3	5,1	98	0,91	63
INRS301	7,62	6,85	295,65	158,05	0,12	0,21	0,012	50	8,4	7,4	0,24	0,8	7,4	6,7	0,85	48
P01	8,38	8,25	2649,64	636,35	1,1	0,029	1	15	920	11	0,011	8,6	4,1	850	2,6	190
P02_ROC	8	6,50	264,81	169,57	0,1	0,029	0,0025	28	2,1	19	0,0092	1,1	8,6	5,5	0,44	20
P03	7,59	1,55	2961,34	145,95	0,9	0,0048	1,6	310	340	17	0,36	8,6	4,4	630	5,7	1500
P06	8,5	6,41	437,07	262,69	0,33	0,078	0,14	13	8,7	3,7	0,026	2	4,4	97	1,1	35
P07	9,2	7,16	1043,83	629,71	0,47	0,027	0,91	1,3	48	0,35	0,0045	2,5	3,9	280	0,067	8,3
P08*	7,65	-1,02	13837,43	158,05	5,3	0,016	1,2	1200	6600	220	2,1	48	5,1	3900	26	1700
P09	8,03	6,11	225,65	145,28	0,09	0,033	0,025	26	0,74	12	0,034	0,99	6,4	9,9	0,6	16
P13	8,26	1,30	2076,03	650,90	1,7	2	0,49	9,2	670	17	0,033	11	3,4	700	1,5	3,1
P14_ROC	9,08	5,69	1371,75	634,04	1,8	0,97	0,38	19	260	11	0,068	4,5	6,5	380	0,83	0,5
P15	9,54	6,81	449,47	246,86	0,58	0,11	0,35	0,86	0,74	0,21	0,0026	0,83	4,2	110	0,12	23
P16	8,57	11,32	637,53	297,64	0,29	0,0044	0,21	3,5	95	1,9	0,0035	1,3	4,2	180	0,36	42
P18_ROC	9,2	5,25	720,80	244,50	0,2	0,91	0,025	27	230	13	0,21	1,2	1,7	170	2,2	7,7
P19	9,38	6,34	323,11	101,84	0,09	0,011	0,046	5	15	8,6	0,003	7,1	3,7	76	0,16	84
P20	8,89	2,68	203,11	127,52	0,12	0,015	0,033	11	0,69	4,5	0,1	3,8	2,8	29	0,19	14
P21	7,76	2,69	296,30	109,30	0,2	0,061	0,023	55	66	12	0,45	3,5	4,7	10	0,7	30
P22_ROC	8,82	7,95	155,33	94,21	0,18	0,069	0,012	18	1,2	3,3	0,048	1,5	4	11	0,3	13
P23*	8,95	1,13	2670,39	714,88	1,7	2,3	0,46	6,6	980	5,2	0,17	5,3	2	900	1,8	13
P24	7,88	5,35	183,87	109,18	0,08	0,16	0,012	27	14	7,9	0,13	0,48	6,8	4,6	0,31	5,6
PUITS_MSH	9,37	6,66	250,43	105,12	0,06	0,001	0,015	11	7,8	2	0,0042	2	5	56	2	39
RS05_ROC	8,82	1,61	525,33	351,54	0,21	0,18	0,3	5,3	6,2	2,2	0,014	1,7	5,2	120	0,23	13
SOURCE_MSH	7,05	7,49	66,89	32,90	0,05	0,0053	0,021	6,1	0,93	3,3	0,0006	1	6	1,9	0,11	7,9

* Les résultats présentés pour cet échantillon sont ceux du duplicata compte tenu que ce dernier présentait un meilleur bilan ionique.

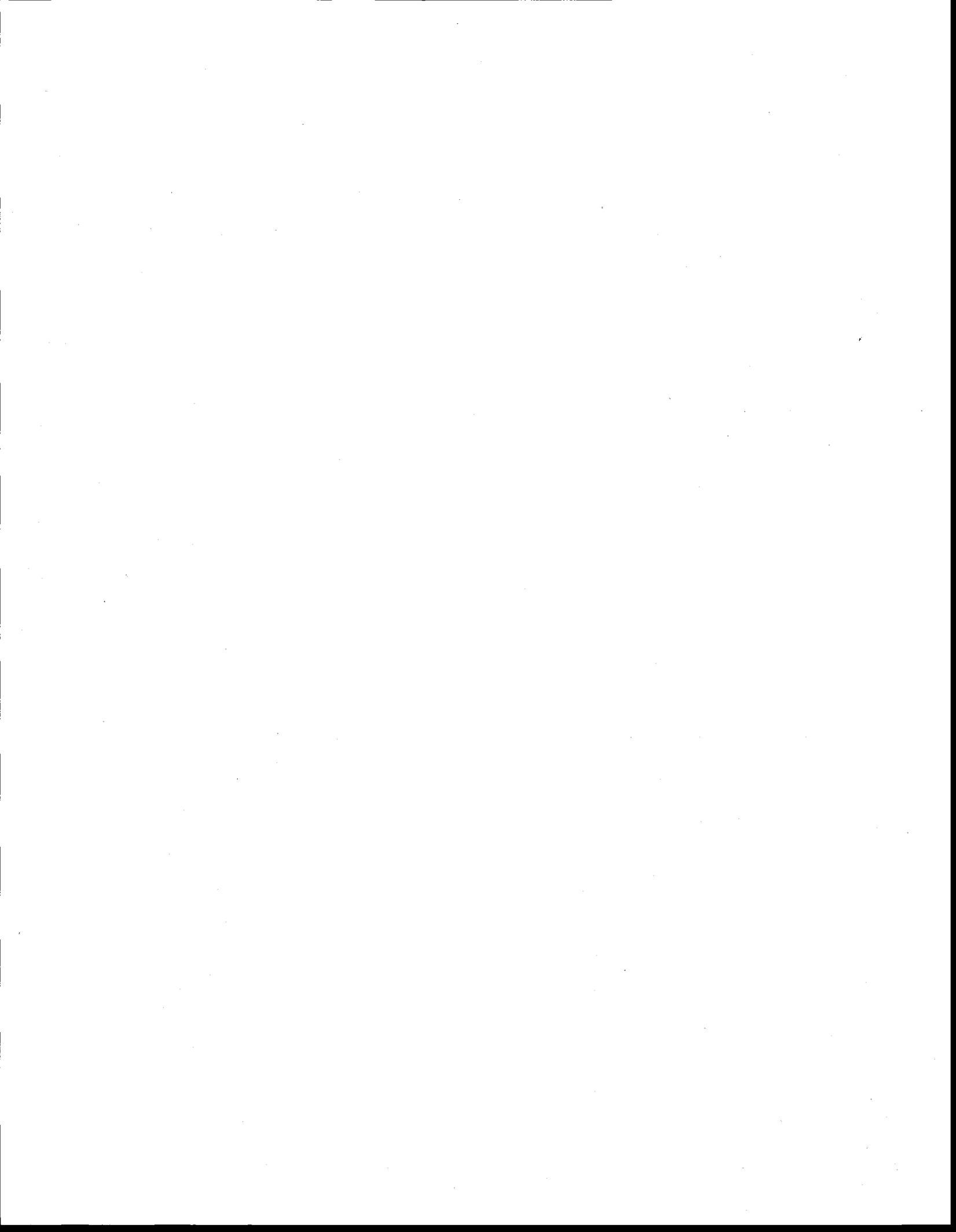


Tableau F.2: Résultats de l'analyse en composante principale (ACP)

Paramètre	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5	Facteur 6	Facteur 7	Facteur 8	Facteur 9	Facteur 10	Facteur 11	Facteur 12	Facteur 13	Facteur 14	Facteur 15	Facteur 16
pH	-0,38404	0,53514	0,11729	0,59414	-0,05368	-0,00416	-0,14049	-0,31039	0,06521	0,25669	-0,04224	0,07424	-0,04542	0,02324	-0,01826	-0,00384
pe	0,54919	0,04401	-0,38123	-0,47488	-0,15635	0,09912	-0,42106	-0,32998	0,05003	0,03438	0,01793	0,01405	0,02961	0,00777	-0,00390	-0,00170
TDS	-0,89856	0,06452	-0,33214	-0,07495	0,10977	0,05251	0,02698	0,03461	-0,10382	0,08210	0,09007	0,01812	-0,00550	-0,02369	-0,11849	0,12315
HCO ₃	-0,83409	0,18067	-0,01520	-0,16386	0,17213	0,06425	-0,02916	-0,09501	-0,42168	0,06704	0,03734	-0,02077	-0,08051	-0,04334	0,07244	-0,05659
NH ₄	-0,83049	0,14538	0,19132	-0,06856	-0,01918	-0,25145	-0,19356	0,07185	0,08882	-0,15377	0,14902	0,28910	0,02636	-0,05610	0,01085	-0,01830
Ba	-0,69294	-0,09999	0,48937	-0,14107	-0,19860	0,29750	-0,00988	-0,11360	-0,07442	-0,16153	-0,26124	0,06608	0,04323	0,01606	-0,05317	0,01754
B	-0,80784	0,43876	-0,05150	-0,01980	-0,09871	-0,17432	-0,08720	-0,00172	0,01732	-0,18319	0,05103	-0,13595	-0,05058	0,21567	0,00930	0,00206
Ca	-0,16215	-0,93694	-0,05772	-0,06344	-0,16443	-0,02825	0,03557	0,03482	0,00600	0,09465	0,03917	0,04718	-0,12108	0,04755	-0,14967	-0,07812
Cl	-0,73332	0,01731	-0,39252	-0,16725	0,14087	0,32481	0,22417	0,02153	0,25632	0,05580	-0,06025	0,12349	-0,07985	0,03858	0,09024	-0,01121
Mg	-0,42228	-0,80235	0,04286	-0,01499	-0,22065	-0,06554	0,11479	-0,05474	-0,08256	0,20565	0,07059	0,04820	0,18640	0,09380	0,08077	0,01436
Mn	-0,28588	-0,62922	0,12340	0,24969	0,22078	0,33120	-0,46024	0,25358	0,03831	0,00948	0,04727	-0,07123	0,00066	0,01440	0,03303	0,00670
K	-0,79258	-0,05906	-0,00638	-0,22424	-0,09290	-0,37007	-0,15394	0,17127	0,11531	0,19407	-0,22150	-0,11614	-0,02110	-0,06902	0,02560	0,00456
Si	-0,18153	-0,52502	0,29009	-0,13532	0,66453	-0,17269	0,04901	-0,31141	0,11647	-0,02863	-0,00159	-0,05298	0,01752	0,01558	-0,01909	0,00453
Na	-0,80280	0,42233	-0,26797	0,08308	0,06088	0,12654	0,04865	0,00182	0,08601	-0,03063	0,03294	-0,12539	0,18823	-0,05293	-0,07832	-0,08275
Sr	-0,60339	-0,56985	0,00173	0,15778	-0,35619	0,03014	0,07751	-0,24173	0,10375	-0,15726	0,11743	-0,14971	-0,07135	-0,11819	0,05314	0,02211
SO ₄	0,01640	-0,54462	-0,64767	0,36538	0,10326	-0,18471	-0,06404	-0,05600	-0,12419	-0,19965	-0,18784	0,08197	0,02516	0,00179	0,01438	-0,00157
Valeur	6,2688	3,5454	1,2983	0,9644	0,8544	0,6370	0,5589	0,4904	0,3435	0,3201	0,2163	0,1989	0,1123	0,0875	0,0710	0,0329
% variance totale	39,1798	22,1591	8,1145	6,0278	5,3397	3,9810	3,4929	3,0649	2,1471	2,0004	1,3517	1,2433	0,7016	0,5468	0,4438	0,2056
Valeur cumulative	6,2688	9,8142	11,1125	12,0770	12,9313	13,5683	14,1272	14,6175	14,9611	15,2811	15,4974	15,6963	15,8086	15,8961	15,9671	16,0000
% cumulative	39,1798	61,3388	69,4534	75,4811	80,8208	84,8018	88,2947	91,3596	93,5068	95,5072	96,8589	98,1021	98,8037	99,3506	99,7944	100,0000

