

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

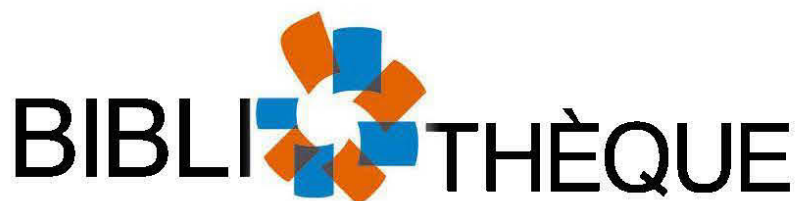
HYDROGÉOCHIMIE DES SOURCES ASSOCIÉES
AUX ESKERS DE L'ABITIBI, QUÉBEC

SABRINA CASTELLI

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 2012



Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Ce mémoire intitulé :

HYDROGÉOCHIMIE DES SOURCES ASSOCIÉES
AUX ESKERS DE L'ABITIBI, QUÉBEC

présenté par : CASTELLI Sabrina

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. PASQUIER Philippe, Ph.D., président

M. CLOUTIER Vincent, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. ROULEAU Alain, Ph.D., membre

DÉDICACE

À Guy Lemire

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de recherche monsieur Vincent Cloutier, Ph.D., pour avoir cru en moi dès notre première rencontre. Je lui suis reconnaissante pour ses conseils pertinents, judicieux ainsi que certaines interventions qui ont été appréciables pour finaliser ce projet.

Je remercie monsieur Philippe Pasquier, Ph.D., de l'École Polytechnique de Montréal qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie également monsieur Alain Rouleau, Ph.D., membre du jury, de l'Université du Québec à Chicoutimi qui a accepté d'examiner ce mémoire.

J'exprime toute ma reconnaissance à Daniel Blanchette, chargé de projet à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Je souligne la contribution financière du Fonds de recherche du Québec-Nature et Technologies (FRQNT), du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et des partenaires régionaux (Conférence régionale des élus de l'Abitibi-Témiscamingue, MRC d'Abitibi, MRC de la Vallée-de-l'Or, Ville de Rouyn-Noranda) dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES), ainsi que la Caisse Desjardins d'Amos et la Fondation de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (FUQAT) pour les bourses accordées.

Un remerciement particulier aux professeurs qui m'ont enseigné, messieurs Bruno Buisnière, Mostafa Benzaazoua, Mamert Mbonimpa, Robin Potvin, Vincent Cloutier de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue mais également messieurs Michel Aubertin et John Molson de l'École Polytechnique de Montréal s'assurant toujours de la compréhension de l'étudiant.

Je remercie également Linda Perron-Beauchemin, directrice du campus Amos, pour les discussions éclairées, et son équipe administrative pour leur soutien moral, ainsi que mes collègues et amis particulièrement Magalie Roy pour ses compétences en géomatique, Francesca Audet-Gagnon et Gérémi Robert pour leur aide lors des campagnes d'échantillonnage. De l'UQAT-campus Rouyn-Noranda je remercie Hassan Bouzahzah pour sa disponibilité, l'équipe de l'URSTM, Denis Bois, directeur de l'unité de recherche et de service en technologie minérale pour ses encouragements, mes chers amis Drissa Ouattara, Marie-Pier Ethier et Thomas Genty.

Un remerciement particulier à Olivier Pitre de la Société de l'Eau Souterraine de l'Abitibi-Témiscamingue.

Je remercie enfin tous ceux que j'ai rencontrés tout au long de ce parcours, grâce à leurs interventions variées ils m'ont permis d'avancer sur mon chemin.

RÉSUMÉ

Le passage du dernier glacier lors du Pléistocène et son retrait à l'Holocène il y a environ 9000 ans AA, ont permis avec l'érosion du socle rocheux, la mise en place de dépôts granulaires perméables dont les longues accumulations de sables et de graviers fluvioglaciaires que sont les eskers, ainsi que la Moraine d'Harricana. Certains eskers sont d'importants aquifères en raison de la présence d'argile glaciolacustre sur les flancs qui retient l'eau dans les formations granulaires.

La région de l'Abitibi a depuis longtemps été présentée comme ayant un potentiel hydrique important associé à des sources. Une étude réalisée par Champagne (1988) porte sur le potentiel aquicole en relation directe avec des sources de l'Abitibi. L'eau souterraine provenant de plusieurs eskers de l'Abitibi est aussi reconnue pour sa grande qualité. Lorsque l'on considère la vulnérabilité des aquifères présents dans les eskers et que plusieurs municipalités de la région s'approvisionnent en eau souterraine, il est important de connaître la ressource et d'en faire une bonne gestion.

L'objectif de ce projet de recherche est la caractérisation hydrogéochimique des sources associées aux eskers de l'Abitibi. Les objectifs spécifiques sont de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des sources afin d'établir le portrait de la qualité de l'eau, d'étudier la variabilité de la géochimie des sources dans la région, de réaliser un échantillonnage détaillé des sources les plus importantes afin d'évaluer la variabilité de la géochimie durant l'année et, à l'aide de traceurs environnementaux (deutérium ($\delta^2\text{H}$), oxygène-18 ($\delta^{18}\text{O}$), carbone-14 (^{14}C), carbone-13 ($\delta^{13}\text{C}$), tritium (^3H)), d'identifier l'origine et l'âge de l'eau. L'approche méthodologique consiste dans l'inventaire et l'intégration des données existantes permettant la sélection des sites à partir des connaissances actuelles des eskers de l'Abitibi.

L'échantillonnage des sources a commencé en 2009 et s'est terminé en 2011. Vingt-quatre (24) sources ont été sélectionnées et échantillonnées pour établir le portrait régional. Un suivi détaillé des sources les plus importantes a été réalisé à 9 sites. Les échantillons ont été analysés pour plusieurs paramètres chimiques incluant les constituants majeurs, mineurs et traces ainsi que les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). Certains échantillons ont été analysés pour le ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ et le tritium. Les précipitations ont été analysées pour $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ afin d'établir la droite locale des eaux météoriques de la région.

Les résultats démontrent que la qualité de l'eau des sources est très bonne sur le territoire, et que la géochimie est peu variable entre les sources. Le type d'eau Ca-HCO_3 caractérise l'ensemble des échantillons. Le faciès chimique de l'eau des sources est en lien avec l'environnement géologique et hydrogéologique de la région d'étude. La chimie des précipitations, la composition minéralogique de l'esker et la géochimie des sources indiquent que des processus d'interaction avec des minéraux contribuent à l'évolution de l'eau à partir de la recharge dans les eskers jusqu'aux sources. Le suivi temporel indique que les eaux de sources pourraient être influencées par les événements saisonniers.

Les analyses isotopiques pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des sources montrent une origine météorique. Les données de tritium indiquent que les sources sont caractérisées par une eau moderne, avec des âges de l'ordre d'une dizaine à quelques dizaines d'années. Les âges ^{14}C non corrigés sont surestimés et incohérents avec les données de tritium. Cette surestimation résulte de la dilution avec du carbone exempt de ^{14}C qui pourrait être causée par l'interaction eau-minéraux dont la dissolution de carbonates.

Ce projet permet d'établir un premier portrait régional de la géochimie des sources de l'Abitibi. Des travaux complémentaires, particulièrement l'intégration de la géochimie de l'eau souterraine des eskers et une caractérisation plus complète de la minéralogie des différents eskers, devraient être réalisés pour mieux comprendre l'évolution de l'eau souterraine des zones de recharge aux sources.

ABSTRACT

The passage of the last glacier during the Pleistocene and its retreat at the Holocene about 9000 years BP, left several granular deposits which consist of long accumulations of sand and gravel such as eskers and the Harricana Moraine. Some eskers are important aquifers due to the presence of glaciolacustrine clay over the esker flanks, thus maintaining water in the granular deposits.

The Abitibi region has long been presented as having an important water potential associated with major springs. A study by Champagne (1988) focuses on the aquaculture potential in direct relation with the springs of Abitibi. Groundwater from several eskers in Abitibi is also known for its high quality. When considering the vulnerability of aquifers present in eskers and that several municipalities of the region are supplied by groundwater, it is important to gain a better knowledge of the resources in order to support their management.

The objective of this project is the hydrogeochemical characterization of springs associated with eskers of Abitibi. The specific objectives are to determine the physicochemical characteristics of springs to establish the portrait of the water quality, to study the variability of the geochemistry of springs in the region, to make a detailed sampling of the major springs to assess the variability of the geochemistry during the year and, using environmental tracers (deuterium ($\delta^2\text{H}$), oxygen-18 ($\delta^{18}\text{O}$), carbon-14 (^{14}C) carbon-13 ($\delta^{13}\text{C}$), tritium (^3H)), to identify the origin and age of the water. The methodology consists of inventory and integration of existing data for the selection of sites from the current knowledge of the Abitibi eskers.

The sampling of springs started in 2009 and ended in 2011. Twenty-four (24) springs were selected and sampled to establish the regional portrait. Detailed monitoring of the major springs was conducted at 9 sites. The samples were analyzed for various chemical parameters including major constituents, minor and trace elements and stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). Some samples were analyzed for ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ and tritium. Precipitation samples were analyzed for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ to establish the local meteoric water line.

The results show that the water quality of the springs is very good in the territory, and that geochemistry varies little between springs. Water type Ca-HCO_3 characterizes all samples. The

geochemistry of springs is related to the geological and hydrogeological contexts of the study area. Precipitation chemistry, the mineralogical composition of the esker and the geochemistry of springs indicate that the interaction with minerals contributes to the evolution of water from the recharge in eskers to the springs. Temporal monitoring indicates that the chemistry of springs may be influenced by seasonal events.

Isotopic analyzes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of springs show a meteoric origin. Tritium data indicate that springs are characterized by modern water, with ages of the order of ten to a few tens of years. Uncorrected ^{14}C ages are overestimated and inconsistent with tritium data. This overestimation results from the dilution with ^{14}C -free carbon that could be caused by mineral-water interaction, as dissolution of carbonates.

This project enables to establish a first portrait of regional geochemistry in the Abitibi springs. Further work, especially the integration of the groundwater geochemistry of eskers and a more complete characterization of the mineralogy of various eskers, should be conducted to better understand the evolution of groundwater, from recharge areas to springs.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT.....	IX
TABLE DES MATIÈRES	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs général et spécifiques.....	3
1.3 Méthodologie	3
1.4 Structure du mémoire.....	4
CHAPITRE 2 LES SOURCES : HISTORIQUE, CLASSIFICATION ET IMPORTANCE EN HYDROGÉOLOGIE	5
2.1 Types de sources.....	5
2.2 Bref historique et classification des sources.....	7
2.2.1 Classification de Brian (1919).....	10
2.2.2 Classification de Meinzer (1923).....	11
2.2.3 Classification de Springer et Stevens (2009)	12
2.3 Hydrogéologie des sources.....	12
2.3.1 Importance de l'étude des sources	12

2.3.2	Études hydrogéochimiques sur les sources	13
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....		16
3.1	Localisation de la région d'étude	16
3.2	Définition des contextes géologiques et hydrogéologiques	18
3.3	Hydrogéochimie régionale	22
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE		23
4.1	Compilation des données existantes.....	23
4.2	Planification des travaux	23
4.3	Choix des sites et travaux d'échantillonnage	24
4.4	Matériel d'échantillonnage et prélèvements.....	27
4.5	Échantillonnage des sources.....	27
4.5.1	Paramètres physico-chimiques.....	28
4.5.2	Paramètres mesurés in situ	29
4.5.3	Arpentage des sources	29
4.5.4	Traceurs environnementaux	30
4.6	Méthodes d'analyse	31
4.6.1	Cartes à points et diagramme de Piper	31
4.6.2	Analyses statistiques et représentation des données	32
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....		34
5.1	Hydrogéochimie et qualité de l'eau des sources	34
5.1.1	Description et localisation des sites d'échantillonnage.....	34
5.1.2	Portrait régional de l'hydrogéochimie des sources	37
5.1.3	Analyse de l'hydrogéochimie régionale des sources	49
5.2	Suivi temporel	59

5.3 Isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$	67
5.3.1 Caractérisation isotopique des précipitations	67
5.3.2 Caractérisation isotopique des sources.....	68
5.4 Isotopes radioactifs et datation de l'eau	73
5.4.1 Tritium.....	73
5.4.2 Radiocarbone.....	78
CONCLUSION	82
RÉFÉRENCES.....	84
ANNEXES	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Classification des sources basée sur le taux de décharge moyen (Meinzer, 1923)...	12
Tableau 4.1: Liste des paramètres analysés (tiré de Bourque et Cloutier, 2001).....	25
Tableau 4.2: Paramètres physico-chimiques usuels mesurés ou évalués sur le terrain et matériel pour effectuer ces mesures (tiré de Bourque et Cloutier, 2001).....	29
Tableau 4.3: Données d'arpentage des sources.....	30
Tableau 4.4: Isotopes et leurs applications (adapté de Cloutier, 2004).....	31
Tableau 4.5: Logiciels utilisés pour le traitement de données géochimiques.	33
Tableau 5.1: Description et localisation des 24 sources échantillonnées.....	35
Tableau 5.2: Statistiques descriptives des paramètres analysés pour les sites échantillonnés de juillet à septembre 2009 (en mg/L lorsque non précisé).	38
Tableau 5.3: Statistiques descriptives des paramètres des 21 sources pour l'année 2009 (en mg/L lorsque non précisé).	51
Tableau 5.4: Composition des précipitations d'une station de mesure à Amos (mg/L).	55
Tableau 5.5: Composition chimique des principaux minéraux présents dans des échantillons prélevés dans une partie de l'esker Saint-Mathieu-Berry.	56
Tableau 5.6: Statistiques descriptives de paramètres chimiques pour l'esker Saint-Mathieu-Berry (SMB) et la Moraine Harricana (MH) pour l'année 2009 (en mg/L).	58
Tableau 5.7: Sources sélectionnées pour le suivi temporel.....	59
Tableau 5.8: $\delta^{18}\text{O}$ (‰) des sources sélectionnées pour le suivi temporel (juillet-octobre 2010)...	72
Tableau 5.9: Données de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau entre 2004 et 2010 pour source d'Amos (ABTE3465). ..	72
Tableau 5.10: Âges des échantillons selon leur contenu en tritium calculé directement en utilisant l'équation de désintégration et par graphique (figure 5.31).	76
Tableau 5.11: Âges des échantillons appliqués aux différents modèles.	80

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Différents types de source (modifiée de Kløve et al., 2011)	6
Figure 3.1: Localisation de la zone d'étude.	16
Figure 3.2: Carte des eskers et de la Moraine d'Harricana dans la zone d'étude (Carte des dépôts de surface de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (échelle 1 : 100 000) produites par la Commission Géologique du Canada (Veillette, 2004, carte 2019A; Thibaudeau et Veillette, 2005, carte 1996A; Paradis, 2005, carte 1991A; Paradis, 2007a, b, cartes 1992A, 2017A; Veillette et Thibaudeau, 2007, carte 1995A).	17
Figure 3.3: Carte de la géologie du Quaternaire de la zone d'étude (Carte des dépôts de surface de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (échelle 1 : 100 000) produites par la Commission Géologique du Canada (Veillette, 2004, carte 2019A; Thibaudeau et Veillette, 2005, carte 1996A; Paradis, 2005, carte 1991A; Paradis, 2007a, b, cartes 1992A, 2017A; Veillette et Thibaudeau, 2007, carte 1995A)).	20
Figure 3.4: La classification des eskers en quatre types (modifiée de Veillette et al., 2004).	22
Figure 4.1: Protocole d'échantillonnage (modifié de Castelli, 2010).	24
Figure 4.2: Localisation des sources échantillonnées (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	26
Figure 5.1: Localisation des sources échantillonnées en juillet et août 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	36
Figure 5.2: Distribution régionale de la conductivité spécifique en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	39
Figure 5.3: Distribution régionale du calcium en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	41

Figure 5.4: Distribution régionale du magnésium en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).....	42
Figure 5.5: Distribution régionale du sodium en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).....	43
Figure 5.6: Distribution régionale des chlorures en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).....	44
Figure 5.7: Distribution régionale des sulfates en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).....	45
Figure 5.8: Distribution régionale du pH en 2009 (juillet-août) (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).....	46
Figure 5.9: Diagramme de Piper des 24 sites de 2009 montrant le type d'eau Ca-HCO ₃	48
Figure 5.10: Variation des chlorures en fonction du sodium des 24 sites de 2009.	49
Figure 5.11: Graphique du Ca, Na, Mg et Cl (en mg/L) en fonction du pH des 21 sources en 2009.	52
Figure 5.12: Graphique du K, Si, Cl, Na, Mg, Ca, HCO ₃ ⁻ et SO ₄ ²⁻ (en mg/L) en fonction de la matière dissoute totale calculée des 21 sources en 2009.....	53
Figure 5.13: Graphique du Ca ²⁺ en fonction du HCO ₃ ⁻ (en mmol/L).	54
Figure 5.14: Graphique de la dureté calculée en fonction de la MDT calculée (en mg/L).....	57
Figure 5.15: Localisation des 9 sites sectionnés pour le suivi temporel (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	60
Figure 5.16: Suivi temporel pour le site ABTE 3469, Esker Saint-Mathieu-Berry, source Berry.	62

Figure 5.17: Suivi temporel pour le site ABTE 3475 Esker Authier, source Authier.	62
Figure 5.18: Suivi temporel pour le site ABTE 3465, Esker Saint-Mathieu-Berry, source Amos.	63
Figure 5.19: Suivi temporel pour le site ABTE 3490, Esker Saint-Mathieu-Berry, source Eska- Crep.	63
Figure 5.20: Suivi temporel pour le site ABTE 3488, moraine Harricana, source Matagami.	64
Figure 5.21: Suivi temporel pour le site ABTE3467, moraine Harricana, source Landrienne.	64
Figure 5.22: Suivi temporel pour le site ABTE 3478 Moraine Harricana, source Barraute pisciculture.	65
Figure 5.23: Suivi temporel pour le site ABTE 3479 moraine Harricana, source Barraute Buco.	65
Figure 5.24: Suivi temporel pour le site ABTE 3483 moraine Harricana, source Kachou.	66
Figure 5.25: Droite des Eaux Météoriques d'Amos (DEMA), 2010-2011.	68
Figure 5.26: Graphique des isotopes stables des sources échantillonnées en 2009 et lien avec la DEMA.	69
Figure 5.27: Distribution régionale de $\delta^{18}\text{O}$ en 2009 (juillet-septembre) (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	70
Figure 5.28: Graphique des isotopes stables des sites de suivi temporel échantillonnés en 2010 et lien avec la DEMA.	71
Figure 5.29: Tritium dans les précipitations Ottawa (1953 à 2007) selon les données de l'AIEA/ (2012).	74
Figure 5.30: Distribution régionale du tritium en 2010 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	75
Figure 5.31: Étendues des valeurs ^3H sur le site d'étude (juillet 2010).	77

Figure 5.32: Distribution régionale du radiocarbone en juillet 2010 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).	79
Figure 5.33: Variation du carbone-13 en fonction du carbone-14.	81

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AA	Avant aujourd’hui
AIEA	Agence Internationale de l’Énergie Atomique
CID	Carbone inorganique dissous
COD	Carbone organique dissous
FRQNT	Fonds de recherche du Québec-Nature et Technologies
FUQAT	Fondation de l’Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
LD	Limite de détection
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l’Environnement de la Faune et des Parcs
MDT	Matière dissoute total
MH	Moraine d’Harricana
MRC	Municipalité Régional de Comté
NTK	Azote total Kjeldahl
OD	Oxygène dissous
PACES	Programme d’Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines
SMB	Saint-Mathieu-Berry
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM	Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Clé de détermination des sources, Brian (1919)	90
Annexe 2	Classification de Springer et Stevens (2009)	93
Annexe 3	Organigramme présentant les étapes à suivre pour réaliser la caractérisation géochimique et le suivi du bruit de fond pour une caractérisation régionale	101
Annexe 4	Données isotopiques.....	102

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'eau souterraine représente une ressource essentielle et stratégique. Elle est souvent la source d'approvisionnement en eau de consommation la plus accessible, en raison de son abondance, de sa qualité et de sa proximité avec le lieu de consommation. Pour près de 21 % de la population du Québec, elle constitue la source privilégiée d'alimentation en eau potable (MDDEP, 2002). L'alimentation en eau potable comporte des enjeux importants comme celui de la santé des consommateurs et la question environnementale puisque l'eau est extraite des ressources naturelles.

La population grandissant sans cesse amène une augmentation et une concentration urbaine qui se reflète dans la quantité de la demande en eau souterraine. Par le fait même, l'augmentation de population peut induire des risques de contamination due aux activités humaines, particulièrement où la vulnérabilité de la nappe est élevée.

Pour protéger cette ressource ainsi que les écosystèmes, et dans le but d'en assurer sa pérennité et sa mise en valeur dans une perspective de développement durable, nous devons acquérir des connaissances approfondies de ses caractéristiques, de sa quantité et de sa qualité.

L'insuffisance de données et d'informations relatives à l'eau souterraine et la pression mise sur la ressource comme l'augmentation de la demande, la surexploitation, l'utilisation du territoire, confirme l'importance de développer les connaissances actuelles sur l'eau souterraine ayant comme finalité une gestion saine, efficace et éclairée de la ressource (CAC, 2009). Connaître le bruit de fond naturel de l'eau souterraine est un outil de compréhension des tendances de la pollution, des impacts sur les aquifères afin de pouvoir imposer des limites et d'espérer changer les mentalités environnementales (Edmunds et al., 2003).

Suite au passage des grands glaciers en Abitibi-Témiscamingue, il y a environ 9000 ans AA, ceux-ci ont laissé en place des dépôts qui caractérisent le territoire. Ce sont les eskers et les moraines. Les eskers ne sont pas particulier à la région de l'Abitibi. On en retrouve ailleurs là où les glaciers ont recouvert l'Amérique du nord, l'Europe et l'Asie.

En général, les eskers se présentent comme des formations géologiques composées de longs cordons sinueux de sables et de graviers aux pentes raides et de dimensions variables. Selon

Veillette et al. (2004), les eskers de l'Abitibi-Témiscamingue, et plus particulièrement ceux qui se trouvent en Abitibi ont la particularité de contenir une importante quantité d'eau souterraine d'excellente qualité, étant donné que ceux-ci sont partiellement ou totalement enfouis sous l'argile. C'est dans ce type d'esker que l'on retrouve les aquifères les plus importants et les sources à plus forts débits dans la région.

Selon White (2010) la chimie des eaux de sources n'est pas intrinsèquement différente de la chimie de l'eau souterraine et les mêmes principes s'appliquent. La qualité physico-chimique des eaux souterraines est influencée par la composition de l'aquifère et des processus chimiques et biologiques qui se produisent pendant l'infiltration et l'écoulement de l'eau.

Ce projet sur la caractérisation hydrogéochimique des sources associées aux eskers de l'Abitibi s'inscrit dans le cadre du Programme d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines (PACES) en Abitibi-Témiscamingue. Ce Programme du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) découle directement d'un engagement du Gouvernement du Québec visant à dresser un portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé, dans le but ultime de la protéger et d'en assurer la pérennité. Ceci permet par ailleurs de développer les partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire. Ce projet permet d'établir un premier portrait régional de la variabilité de la composition chimique des sources en fonction des contextes géologiques et hydrogéologiques de la région.

1.2 Objectifs général et spécifiques

L'objectif principal de ce projet de recherche est la caractérisation hydrogéochimique des sources associées aux eskers de l'Abitibi.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivant :

1. Déterminer les caractéristiques physico-chimiques des sources associées à des eskers de l'Abitibi afin d'établir le portrait de la qualité de l'eau.
2. Étudier la variabilité de la géochimie des sources en fonction du type et de la localisation géographique des eskers.
3. Réaliser un suivi détaillé des sources les plus importantes pour évaluer la variation géochimique de l'eau annuellement.
4. Identifier l'origine de l'eau des résurgences et le lien avec les précipitations.

1.3 Méthodologie

L'approche méthodologique qui a été appliquée pour atteindre les objectifs du projet de recherche inclue les phases suivantes :

- Inventorier et intégrer les données physico-chimiques existantes, sélectionner des sites d'échantillonnage à partir des connaissances actuelles des eskers de l'Abitibi et planifier des travaux d'échantillonnage (méthode d'échantillonnage, choix des paramètres chimiques et isotopiques, et des laboratoires d'analyses).
- Relever des paramètres physiques d'arpentage des sources principales associées aux eskers et à la Moraine d'Harricana.
- Procéder à l'échantillonnage régional des sources afin d'effectuer l'analyse des paramètres de chimie inorganique, des isotopes stables $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ et radioactifs ^3H et ^{14}C .
- Établir une station d'échantillonnage des précipitations pour l'analyse des isotopes stables afin de réaliser la droite locale des eaux météoriques pour la région permettant d'interpréter les résultats des isotopes stables de l'eau $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$.

1.4 Structure du mémoire

Le mémoire résultant des travaux de recherche à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue comporte six parties. L'introduction générale, une revue de littérature, la description de la région, la méthodologie, l'analyse et l'interprétation des résultats et finalement la conclusion et les recommandations.

Le premier chapitre présente une mise en contexte de la problématique, ainsi que les objectifs et la structure du mémoire.

Le deuxième chapitre présente les différents types de source, un bref historique et une classification des sources. On y trouve aussi un point qui traite en particulier de l'importance de l'étude des sources.

Le troisième chapitre présente la description et la localisation de la région, ainsi que la définition des contextes géologiques et hydrogéologiques de la région. On trouve également dans ce chapitre un point qui traite de l'hydrogéochimie régionale.

Le quatrième chapitre décrit les méthodes hydrogéochimiques et isotopiques qui ont été appliquées aux différents échantillons prélevés sur les sites d'études visités. La méthode physique de mesure d'arpentage est également présentée dans ce chapitre.

Le chapitre cinq présente l'analyse des données géochimiques menant à l'interprétation de l'hydrogéochimie de l'eau. L'interprétation et la discussion de l'analyse des données résultant du suivi spatiotemporel, du suivi des précipitations et des données des traceurs environnementaux se trouvent aussi dans le chapitre cinq.

Pour terminer, les conclusions et les recommandations seront présentées en dernier.

CHAPITRE 2 LES SOURCES : HISTORIQUE, CLASSIFICATION ET IMPORTANCE EN HYDROGÉOLOGIE

Pour la plupart des gens, l'eau de source est la manifestation la plus évidente, intéressante et visuelle de la présence de l'eau souterraine. Elle a longtemps été reconnue pour avoir des valeurs médicales ou thérapeutiques (Manga, 2001). L'eau de source est aussi associée dans l'esprit de la population à une pureté exceptionnelle, témoin d'une augmentation des parts de marché des usines d'embouteillage qui ont constaté une hausse rapide de leur chiffre d'affaire directement proportionnelle à la mise en tablette de leur produit. Elle joue également un rôle géographique dans l'importance de son emplacement pour la population particulièrement dans les zones arides (Manga, 2001). Tout au long de l'histoire, les sources d'eau ont eu un attrait spécial et important. Elles fournissent non seulement un apport d'eau potable, récréative ou de valeurs culturelles, mais elles sont aussi un moyen d'évaluer la qualité et l'origine de l'eau souterraine.

2.1 Types de sources

Une source se qualifie comme l'endroit où l'eau souterraine sort de la surface de la terre en quantité suffisante pour former un ruisseau (LaMoreaux et Tanner, 2001; Springer et al., 2008). Les résurgences d'eau souterraine alimentent d'importants réseaux d'eaux de surface comme des ruisseaux et des rivières. Les sources naturelles peuvent couler directement soit dans des lacs ou des océans. Des structures géologiques et des caractéristiques topographiques peuvent apporter l'eau à la surface, et donner naissance à des cours d'eau (figure 2.1). Les résurgences peuvent alors former des dépressions tout au long des contacts lithologiques où un roc perméable recouvre un roc de plus faible perméabilité, où il y a des joints, des fractures ou des failles, ou dans des régions de calcaire (Fetter, 2001). La résurgence de grande quantité d'eau souterraine requière la combinaison de plusieurs éléments comme une aire de recharge importante et un haut taux de recharge (Brian, 1919; Manga, 2001).

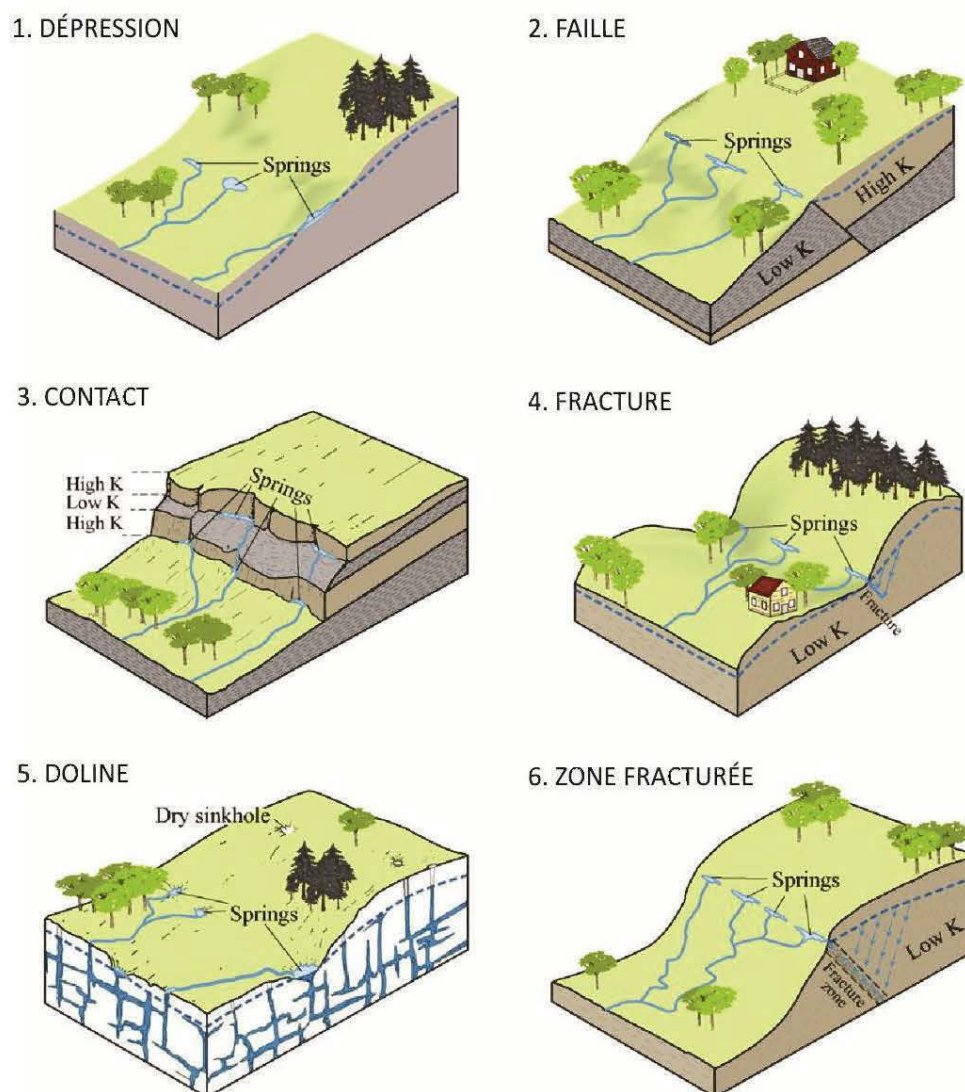


Figure 2.1: Différents types de source (modifiée de Kløve et al., 2011)

Les sources d'eau souterraine sont habituellement divisées en deux groupes principaux basés selon la nature de leur écoulement par rapport à l'aquifère duquel elles sont issues (Kresic, 2010). On distingue les sources à écoulement gravitaire et les sources profondes dites artésiennes. Les sources à écoulement gravitaire coulent sous les conditions non confinées où la surface du terrain intercepte le niveau hydrostatique de l'eau. Elles sont également appelées sources descendantes. Les sources artésiennes sont sous pression due aux conditions de confinement. Elles sont aussi

appelées sources ascendantes (Kresic, 2010). La structure géologique et la géomorphologie jouent un rôle important dans le type de source (Brian, 1919; Kresic, 2010).

2.2 Bref historique et classification des sources

Vers 550 Avant J-C, les Arabes et les Perses étaient déjà reconnus en ingénierie pour la construction de systèmes d'alimentation en eau. Différentes écoles de pensée se faisaient face mettant en opposition des idées sur l'origine de l'eau de source. Ils comprenaient les enjeux sur l'eau que nous connaissons aujourd'hui et ils accordaient une place particulière à l'eau de source (Alfaro et Wallace, 1994; LaMoreaux et Tanner, 2001). Par transfert technologique des Yougoslaves, les Turques construisaient le premier réseau d'alimentation à Sarajevo vers 1461 utilisant le système gravitaire à partir d'une source karstique (Alfaro et Wallace, 1994). Vers 1800, les chemins de fer se développent le long des routes où l'on peut retrouver des résurgences d'eau souterraine. Dans l'ouest américain où l'eau de surface est plus rare, l'eau de source prend alors toute son importance.

La première étude réalisée sur les sources est basée sur le critère le plus important, celui de la potabilité (LaMoreaux et Tanner, 2001; Springer et al., 2008). Ensuite vient celui de la variabilité du débit de la source au cours de l'année. Peut-elle alimenter un village, une ville, une région entière? Paramelle (1859) rédige un livre traitant l'origine des résurgences. On y trouve des réponses sur les opinions qu'il considère erronées sur l'origine des sources et il donne des réponses aux questions posées. Pour porter le nom de source, l'eau constituant le cours d'eau doit se soumettre à quelques conditions : 1) former un courant assez gros, 2) être en mouvement pendant une certaine durée et produire de l'eau la majeure partie de l'année, 3) la formation de ce courant doit être indépendante d'une forte pluie, 4) des courants d'eau sur le sol s'appellent des rigoles, des ruisseaux ou des rivières et ils ne portent pas le nom de sources même s'ils proviennent de sources. Paramelle (1859) explique leur formation et les différents types de sources. Il décrit les méthodes anciennes et modernes pour les découvrir. Au 17^{ième} siècle, la classification des sources se faisait de façon verbale basée sur une description de l'environnement, de la taille, de la température et de la potabilité de la source. Perrault (1967) publie des résultats d'une étude menée pendant trois ans ainsi que plusieurs autres informations. Des investigations de cette envergure auraient pu être faites n'importe quand au cours des 2000 années précédentes cependant la science n'avait pas atteint la maturité nécessaire à la vérification

des hypothèses par la mesure et l'observation (Nace, 1969; Perrault, 1967). Perrault est à l'origine de l'hydrologie scientifique moderne (Nace, 1969).

Keilhack (1912) offre une classification complète des sources (LaMoreaux et Tanner, 2001). Brian (1919) propose une classification principalement basée sur la structure géologique et hydrologique des sources en n'incluant pas dans sa classification la morphologie de celle-ci. Meinzer (1923), quant à lui propose différentes classifications des sources. Bien que la classification de Meinzer soit largement utilisée, elle n'est pas très accessible (Springer et Stevens, 2009; Springer et al., 2008).

Clarke (1924), considère trois critères importants pour une classification de sources comme la géologie, les propriétés physiques et la géochimie. Les principales catégories chimiques pour la classification des sources sont : les chlorures, les sulfates, les carbonates, les acides ainsi que les eaux nitrées, sulfatées, boratées et silicatées (LaMoreaux et Tanner, 2001).

Stiny (1933) consacre une partie de ses travaux sur l'origine et la classification des sources. Sa classification est basée sur l'écoulement et elle comprend trois grandes catégories : les sources à écoulement libre, les sources à débordement et les sources profondes ou dites artésiennes (LaMoreaux et Tanner, 2001). Une quatrième catégorie regroupe différentes sources d'eau souterraine qui ne peuvent pas entrer dans une des trois catégories précitées comme les sources en geysers, les sources sous-marines ou cavernueuses, les sources thermales et minérales (LaMoreaux et Tanner, 2001). D'autres classifications ont été développées plus spécifiquement pour des environnements particuliers notamment pour les sources d'origine karstique. On retrouve dans la littérature de nombreuses publications qui ont fait le point sur le type de sources d'eau souterraine que l'on rencontre dans différents endroits du monde.

Springer et al. (2008) présentent un système de classification permettant une meilleure gestion et une conservation des écosystèmes. Ils proposent une structure qui peut servir de modèle pour le développement d'une base de données afin de gérer les données recueillies in situ (Springer et Stevens 2009; Springer et al., 2008). Springer et al. (2008) conservent la classification de Meinzer (1923) en y intégrant les recommandations d'Alfaro et Wallace (1994). Ils proposent d'ajouter à la classification de Meinzer (1923) des variables écologiques et environnementales. Les recommandations d'Alfaro et Wallace (1994) consistent à la mise en place d'une structure

organisationnelle d'inventaire des données et d'une base de données globale utilisant un système de classification pour les résurgences (Springer et Stevens, 2009; Springer et al., 2008).

Plusieurs classifications des sources ont été proposées, les caractéristiques les plus couramment utilisées sont: 1) le taux de décharge et l'uniformité, 2) le type de source gravitaire ou profonde dite artésienne, 3) la structure géologique et géomorphologique contrôlant l'émergence, 4) la qualité de l'eau et la température (Kresic, 2010; Jang, 2010), et 5) une classification en fonction du type d'eau basée sur les ions majeurs (Minissale et al., 1997; Mariner et al., 2003; Afşin et al., 2006).

Suite à la revue de littérature, les classifications retenues sont la classification de Brian (1919), de Meinzer (1923) et de Springer et Stevens (2009) puisque ce sont les plus utilisées.

2.2.1 Classification de Brian (1919)

La classification de Brian (1919) est basée sur la structure géologique et l'hydrologie des sources. Brian (1919) divise les sources en deux classes : les sources gravitaires, et les sources non gravitaires.

I. Sources non gravitaire :

A et B. Les sources d'origine volcanique ou associées aux roches volcaniques, les eaux généralement chaudes hautement minéralisées contenant des gaz. Il est difficile de faire la différence entre la catégorie de gaz des conduits à l'intérieur des sources, ou des sources thermales avec les autres gaz.

C. Les sources provenant de fissures : dues aux fractures s'étendant à l'intérieur des parties plus profondes de la croûte, les eaux habituellement hautement minéralisées sont généralement tièdes et chaudes.

II Sources gravitaire :

A. Les sources par dépression formées à la surface du terrain interceptant la nappe phréatique dans une formation géologique poreuse. On distingue dans cette sous-catégorie les sources creuses, dans les vallées, en canaux et les sources frontières.

B. Les sources par contact formées par des formations géologiques poreuses reposant sur le roc imperméable.

C. Les sources artésiennes dues à des lits perméables entre des matériaux imperméables.

D. Les sources dans le roc imperméable, soit les sources tubulaires dues aux canaux plus ou moins arrondis dans le roc imperméable des systèmes karstiques dans les carbonates et les sources par fracture dues à des fractures composées de joints, de plans lités, de joints colonnaires, d'ouvertures dues à un clivage en fissilité schisteux, de plans inter-lités et de failles sédimentaires imperméables, ignées et de rocs métamorphiques.

L'annexe 1 présente la clé de détermination des sources basée sur la classification de Brian (1919).

2.2.2 Classification de Meinzer (1923)

La classification de Meinzer (1923) est basée sur le taux de décharge moyen que produit la résurgence. Ce taux moyen est exprimé dans les unités de mesure américaines qui sont encore largement utilisées de nos jours aux États-Unis (Kresic, 2010).

Meinzer (1923) définit deux classes de sources durables. Les sources durables continues et intermittentes. Une source est considérée comme durable si elle sort de la terre de façon continue ou intermittente ou si sa résurgence est naturellement intermittente ou sporadique. Il est à noter que les sources intermittentes peuvent avoir un écoulement régulier tel les geysers qui ont une périodicité d'environ une heure pour expulser leur CO₂. Les impacts humains peuvent affecter le taux de décharge de sources comme le pompage excessif. Lorsque le taux de décharge de la source est variable, il faut procéder à une série d'observations afin de pouvoir déterminer le taux de décharge moyen. Meinzer (1923) a développé huit classes de décharge, définies par la magnitude de décharge pour une source pendant un temps de mesure donné (tableau 2.1).

Ce système numérique est bâti dans une échelle qui satisfait la gamme complète de décharges des sources connues. Le système numérique est composé de niveaux numérotés de 1 à 8 pour des débits variant de plus de 10 m³/s (niveau 1) à moins de 10 cm³/s (niveau 8) (tableau 2.1). Par exemple, un score de 8 est attribué à la source de Ra El Ain en Syrie (Alfaro et Wallace, 1994) ce qui correspond à des sources qui laissent entrevoir de simples suintements, dans ce cas le flux est presque égal à la valeur de zéro. Étant donné que la résurgence ou décharge de plusieurs sources varient avec le temps, le taux d'écoulement pourrait changer en fonction de la durée du temps de mesure. Pour ces sources particulières, Meinzer (1923) a défini trois niveaux de variabilité de décharge : constante, semi-variable et variable. Cette classification requière de multiples mesures pour caractériser plusieurs paramètres de variabilité à long terme diurnes, saisonnier annuel, et interannuel (Springer et al., 2008).

Tableau 2.1: Classification des sources basée sur le taux de décharge moyen (Meinzer, 1923).

Classification basée sur le taux de décharge moyen	
Valeur numérique	Décharge en unités métrique
1	Plus de 10 m ³ /s
2	1 à 10 m ³ /s
3	0,1 à 1 m ³ /s
4	10 à 100 l/s
5	1 à 10 l/s
6	0,1 à 1 l/s
7	10 à 100 cm ³ /s
8	Moins de 10 cm ³ /s

2.2.3 Classification de Springer et Stevens (2009)

Springer et Stevens (2009) ont proposé la mise en place d'une structure organisationnelle d'inventaire des données et d'une base de données bien structurée regroupant les différentes catégories rencontrées dans d'autres classifications comme celle d'Alfaro et Wallace (1994) et de Meinzer (1923). Ils ont ajouté d'autres catégories ne figurant pas dans aucune classification jusqu'à présent comme les micros habitats et les écosystèmes. Cette classification présente plusieurs catégories basées sur des considérations géomorphologique, les caractéristiques d'écoulement, la qualité de l'eau et la géochimie, les habitats, et les variations climatiques et biologiques incluant les micros habitats ainsi que les aspects de gestion de l'eau et du territoire. L'annexe 2 présente la classification de Springer et Stevens (2009).

2.3 Hydrogéologie des sources

2.3.1 Importance de l'étude des sources

Selon Davis et al. (2001), la chimie des sources a été utilisée pour définir les origines possibles de l'eau aussi loin que l'on puisse aller au 17^{ième} siècle en Europe, ainsi qu'au 18^{ième} siècle aux États-Unis. Katz et Wicks (2001) ont intégré spatialement et temporellement l'eau souterraine d'aquifères en analysant leurs résurgences. Dans certaines régions, les résurgences fournissent les seules informations hydrogéologiques sur le système d'eau souterraine. Katz et Wicks (2001)

affirment également que depuis au moins deux siècles, l'hydrochimie a été utilisée pour identifier l'origine de l'eau souterraine. Cependant les progrès modernes en chimie analytique, combinés à de nouveaux outils pour quantifier l'hydrologie des systèmes d'eau de source, ont apporté des avancées sans précédents dans la compréhension des résurgences d'eau souterraine. Lee et Krothe (2001) mentionnent qu'il est nécessaire d'utiliser les données de la chimie et des traceurs isotopiques pour comprendre l'évolution géochimique et les mélanges d'eau dans les aquifères karstiques. La méthode de modélisation de l'eau souterraine est difficile à appliquer pour les mélanges d'eau pour ce type d'aquifère due à leur hétérogénéité étant donné que l'écoulement dans les fractures n'obéit pas à la loi de Darcy. Par conséquent, les isotopes et les concentrations ioniques peuvent être utilisés comme traceurs pour interpréter l'évolution chimique de l'eau.

2.3.2 Études hydrogéochimiques sur les sources

Selon Tóth (1999), les eaux souterraines ont un rôle important dans la nature de par leur capacité à interagir avec l'environnement et d'autre part dans la distribution spatiale généralisée de leur écoulement. L'eau souterraine est ainsi définie par Tóth (1999) comme un agent géologique important. L'interaction de l'eau souterraine avec son environnement, et son écoulement au sein de celui-ci se produisent simultanément. Les effets de l'écoulement souterrain se manifestent de la surface du sol jusqu'aux plus grandes profondeurs, pour des durées de temps très variables. La composition géochimique de l'eau est également fonction de la géologie du sous-sol, du temps de résidence de l'eau dans les formations aquifères, de la vitesse d'écoulement et des contaminations naturelles ou anthropiques. En suivant les concepts développés par Tóth (1999), l'étude de l'hydrogéochimie des résurgences a le potentiel d'apporter des connaissances très importantes sur l'évolution de l'eau souterraine depuis la recharge, le temps de résidence, l'influence des conditions géologiques et hydrogéologiques sur la géochimie de l'eau, et de permettre une évaluation de la qualité régionale de l'eau souterraine et des variations spatio-temporelles.

Les isotopes stables sont très utiles dans les études hydrogéochimiques. Selon Kresic (2010), l'oxygène-18 (^{18}O) et le deutérium (^2H) sont les isotopes les plus fréquemment utilisés lors d'études hydrologiques sur les sources.

Larsen et al. (2001) et Manga (2001) utilisent et interprètent les données d'isotopes stables obtenues à partir d'échantillons de résurgences pour fournir des informations concernant la composition, l'origine de l'eau souterraine et son chemin d'écoulement. Simpkins (1995) a utilisé

les isotopes stables de l'eau telle que $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et le traceur environnemental tritium (^3H) pour identifier l'âge et estimer la recharge de l'eau souterraine.

Les données isotopiques deviennent particulièrement importantes lorsque les eaux souterraines se présentent dans des cadres géologiques complexes (Davisson et al., 1999; Nativ et al., 1999). Larsen et al. (2001) ont échantillonné des résurgences d'eau souterraine de la région du bassin de Tecopa au Nevada, dans le sud-est de la Californie, aux États-Unis. Dans cette étude, l'hydrochimie et les compositions en isotopes stables de l'oxygène, de l'hydrogène et du bore des sources sont utilisées pour déterminer chimiquement et isotopiquement les eaux souterraines différentes, les interactions chimiques qui interfèrent et le chemin d'écoulement de l'eau souterraine.

Swanson et al. (2001) utilisent les caractéristiques géochimiques et les âges apparents des eaux souterraines échantillonnées pour déterminer le point de décharge de 9 sources situées dans le sud d'un bassin versant proche de Dane County dans le Wisconsin aux États-Unis.

Kortelainen et Karhu (2004) ont participé à deux programmes de recherche allant de 1995 à 2001 sur la composition isotopique en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des eaux souterraines finnoises. Ils ont démontré la tendance saisonnière et régionale du ratio isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ pouvant ainsi exprimer une moyenne annuelle des précipitations. Une étude d'envergure a été réalisée étant donné qu'environ mille échantillons ont été prélevés sur une étendue géographique couvrant dix-neuf sites d'étude. Dans le sud de la Finlande, les sites échantillonnés étaient pour la plupart des sources naturelles et dans le nord les échantillons étaient prélevés d'un ensemble de puits creusés et de sources naturelles. Les aquifères sélectionnés étaient généralement non confinés et composés de tills, de formations morainiques et de formations fluvioglaciales tels les eskers. Les résultats de cette étude ont fourni la première tendance régionale de données sur la composition isotopique des précipitations en Finlande.

Selon Jang (2010), les techniques de calculs statistiques multivariées d'analyses en composantes principales sont des moyens efficaces de manipulation, d'interprétation et de représentation des données concernant l'hydrochimie et les origines géologiques des sources. Jang (2010) a utilisé l'analyse en composantes principales et l'analyse de classification automatique hiérarchique pour diviser les compositions d'eau de source thermale et minérale en plusieurs groupes et pour interpréter les processus affectant la composition de l'eau. Jang (2010) met en évidence seulement les caractéristiques hydrochimiques des sources basées sur des origines géologiques différentes.

Les propriétés hydrochimiques de quelques sources ne peuvent pas être caractérisées due à leurs systèmes de circulations complexes ou de part un mélange avec d'autres sources d'eau.

Swanson et al. (2001) ont appliqué la classification automatique hiérarchique pour caractériser les données géochimiques des sources et expliquer les origines de l'eau de source.

Selon Rademacher et al. (2001), une évolution chimique a été démontrée dans les eaux de résurgence du bassin de Sagehen dans la Sierra Nevada, en Californie, aux États-Unis. Les réactions d'altération primaire ont été déterminées en utilisant un calcul de balance de masse et une compréhension de la géologie locale. Ces études concluent qu'il existe une forte corrélation entre l'écoulement permanent de la source, la conductivité et la chimie de l'eau.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

3.1 Localisation de la région d'étude

Cette étude est réalisée dans la région centre nord de l'Abitibi-Témiscamingue (figure 3.1). C'est dans ce secteur qu'on retrouve les eskers les plus volumineux du nord-ouest québécois et qui constituent d'importants aquifères (Veillette et al., 2004).

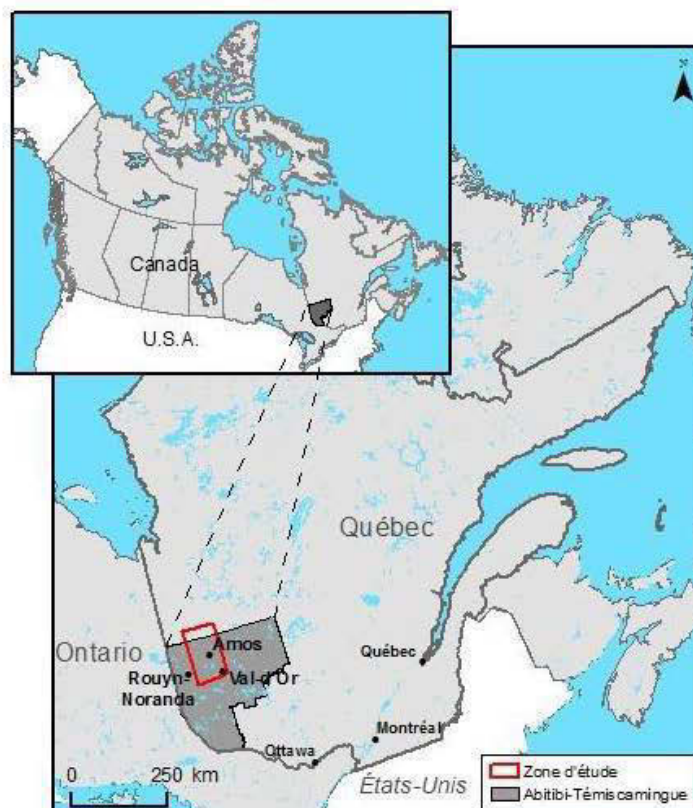


Figure 3.1: Localisation de la zone d'étude.

La zone d'étude comprend une partie du territoire de la municipalité de la Baie-James, de la MRC d'Abitibi-Ouest, de la Ville de Rouyn-Noranda, de la MRC de la Vallée-de-l'Or et de la MRC d'Abitibi (figure 3.2). Les sources échantillonnées sont associées aux formations géologiques suivantes : l'esker Vaudray-Joannès, l'esker de Launay, l'esker Saint-Mathieu-Berry et la Moraine d'Harricana. La plupart des cours d'eau de la zone d'étude coulent vers le nord dans le bassin hydrographique de la Baie-James, excepté pour la partie sud-ouest de la région, laquelle fait partie du bassin hydrographique du Saint-Laurent.

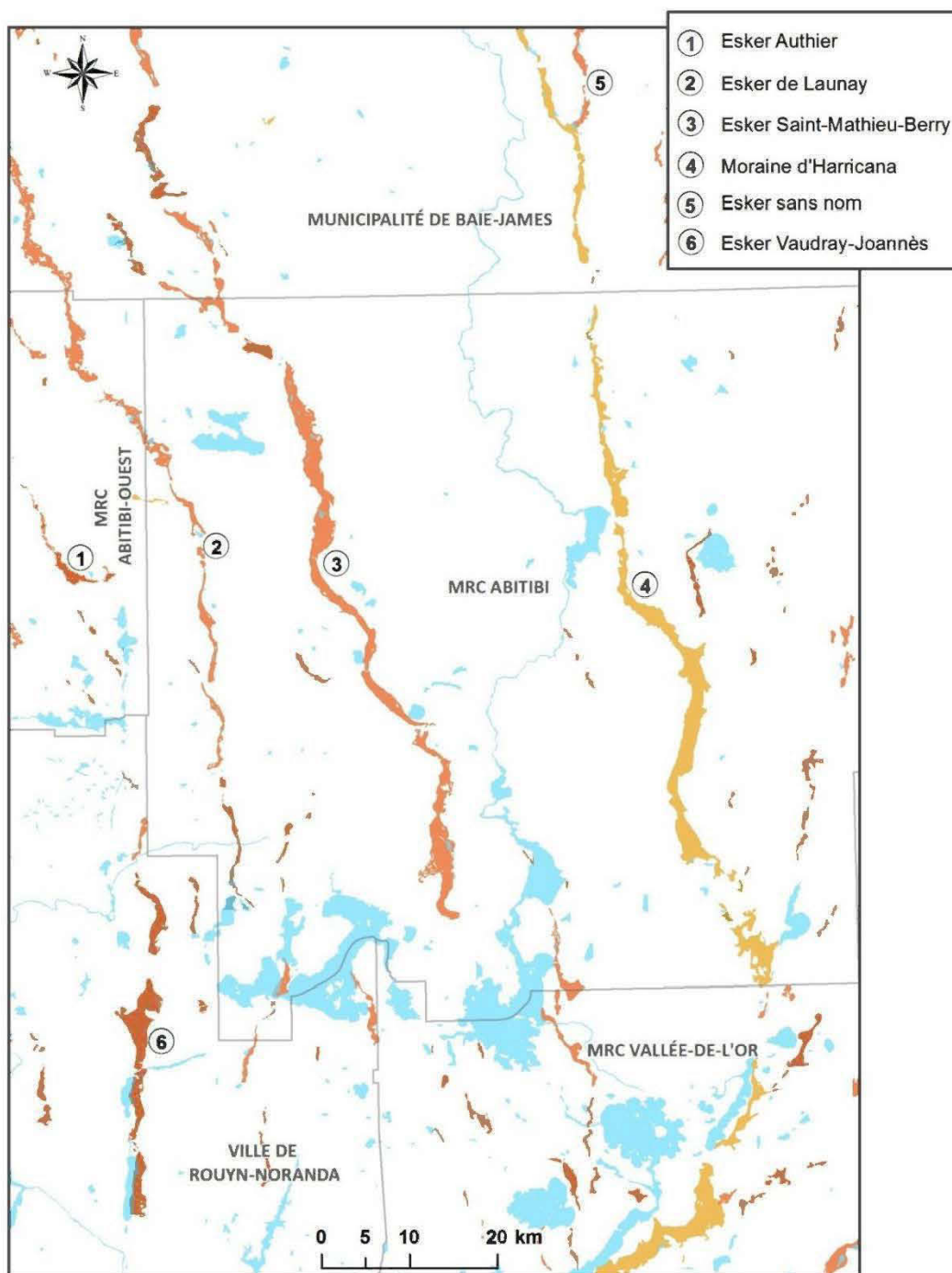


Figure 3.2: Carte des eskers et de la Moraine d'Harricana dans la zone d'étude (Carte des dépôts de surface de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (échelle 1 : 100 000) produites par la Commission Géologique du Canada (Veillette, 2004, carte 2019A; Thibaudeau et Veillette, 2005, carte 1996A; Paradis, 2005, carte 1991A; Paradis, 2007a, b, cartes 1992A, 2017A; Veillette et Thibaudeau, 2007, carte 1995A)).

3.2 Définition des contextes géologiques et hydrogéologiques

Selon Veillette et al. (2004), il y a environ 9 000 ans AA, lors de la dernière glaciation, le retrait du glacier s'est effectué vers le nord-ouest et vers le nord-est de part et d'autre de la Moraine d'Harricana (figure 3.2). Ce style de déglaciation, explique l'orientation des eskers, nord-ouest - sud-est à l'ouest de la Moraine d'Harricana et nord-est - sud-ouest à l'est de celle-ci (Veillette et al., 2004; Nadeau, 2011). Six eskers importants traversent la zone d'étude. Ce sont d'ouest en est, l'esker d'Authier, l'esker Vaudray-Joannès, l'esker de Launay, l'esker Saint-Mathieu-Berry, la Moraine d'Harricana ainsi que l'esker sans nom. La figure 3.2 présente la carte des eskers et de la Moraine d'Harricana dans la zone d'étude. La Moraine d'Harricana est incluse dans les eskers, car d'un point de vue purement sédimentologique c'est un esker mis en place en position interlobaire (Veillette et al., 2004).

Selon Veillette et al. (2004) le passage du glacier a modifié le relief et le paysage de l'Abitibi. Cet événement a entraîné l'érosion du socle rocheux et a également mis en place plusieurs types de dépôts granulaires. Un type de dépôt qui caractérise le territoire d'étude est représenté par les formations fluvioglaciaires comme les eskers et la Moraine d'Harricana. Lors de la déglaciation, la submersion par le lac glaciaire Ojibway a laissé une forte empreinte sur le territoire comme des gradins d'érosion glaciolacustres et des cordons de plages sur les flancs d'eskers ainsi que sur les pourtours des collines témoignant de la présence de cet ancien lac. Les eskers mis en place au contact d'eaux glaciolacustres profondes comme celles de la région d'Abitibi, forment des épandages subaquatiques dont le style de sédimentation diffère nettement de celui des eskers formés en milieu subaérien. L'esker mis en place en milieu subaérien ou dans des plans d'eau de faibles dimensions montre une crête sinueuse, avec des flancs à pente raide. Les eskers de la région, formés en milieu glaciolacustre, montrent des sommets aplanis par l'action des vagues, des contours souvent flous et des sommets et des flancs totalement ou partiellement masqués par des sables littoraux ou par des sédiments à grain fin du faciès d'eau profonde. La présence prolongée d'un grand plan d'eau en région est indiquée par la grande quantité de sédiments à grains fins. Les sédiments d'eau profonde qui forment la plaine argileuse sont caractéristiques du paysage Abitibien. Certains eskers sont d'importants aquifères en raison de la présence d'argile glaciolacustre sur leurs flancs qui retient l'eau dans les formations granulaires. La distribution des dépôts du Quaternaire (figure 3.3), résultat de la dernière glaciation Abitibienne, fait de celle-ci une région contrastée avec une faible superficie de dépôts granulaires (eskers et moraines)

affleurant, une importante surface imperméable d'argile et ainsi, une zone de recharge réduite. Le reste du territoire est partagé par les unités principales tels les dépôts organiques, le roc affleurant, le till et les sédiments sublittoraux.

L'ordre de mise en place des dépôts du quaternaire explique d'une part les propriétés hydrogéologiques des sédiments et d'autre part le potentiel aquifère des eskers de la région d'étude.

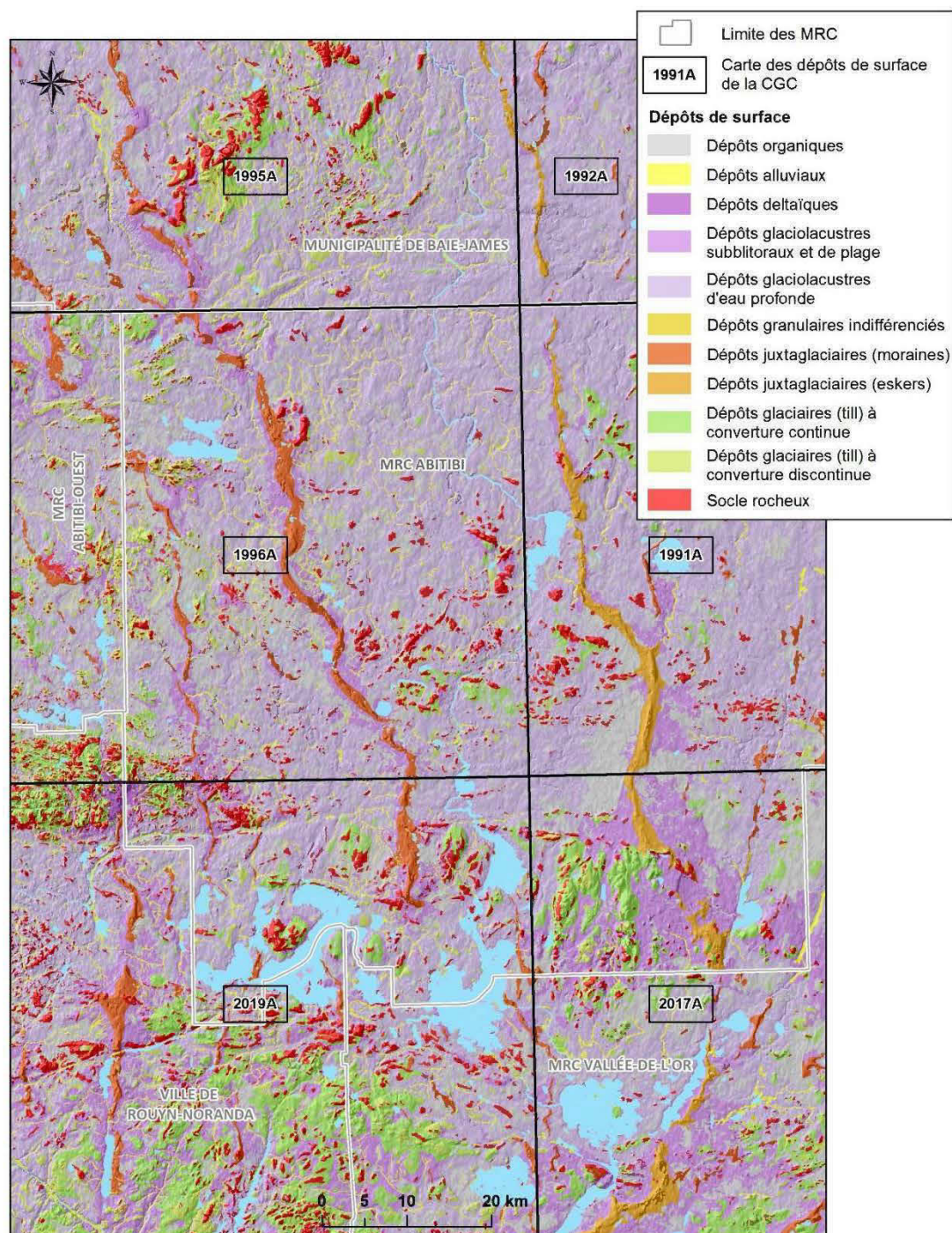


Figure 3.3: Carte de la géologie du Quaternaire de la zone d'étude (Carte des dépôts de surface de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (échelle 1 : 100 000) produites par la Commission Géologique du Canada (Veillette, 2004, carte 2019A; Thibaudeau et Veillette, 2005, carte 1996A; Paradis, 2005, carte 1991A; Paradis, 2007a, b, cartes 1992A, 2017A; Veillette et Thibaudeau, 2007, carte 1995A)).

Veillette et al. (2004) a présenté une classification des eskers établie selon leur stratigraphie et leur structure interne (figure 3.4). Elle met en évidence la caractéristique sédimentologique des eskers abitibiens du milieu glaciolacustre et explique le potentiel aquifère. L'esker de type A a été mis en place au-dessus du plus haut niveau atteint par le lac Ojibway. Sa crête est assez bien formée, ses flancs sont à pentes raides et il est constitué uniquement de sédiments juxtaglaciaires. L'esker de type B a été mis en place sous le niveau du lac Ojibway, mais au-dessus du plus haut niveau atteint par l'argile. L'argile est généralement absente à une altitude supérieure à 320 mètres dans la région de l'Abitibi, cependant le lac Ojibway a atteint des niveaux avoisinant les 400 mètres d'altitude (Veillette, 1994). Les eskers de type B présentent des sommets aplanis par l'action des vagues et on constate la redistribution de sables littoraux sur les flancs de l'esker. Les eskers de type A et B ont un potentiel aquifère faible. Les eskers ciblés pour le besoins de cette étude sont des eskers de type C. L'esker de ce type a atteint son développement maximum sous des tranches d'eau de 50 mètres ou plus d'épaisseur. On y retrouve les aquifères les plus importants et les sources à plus forts débits de la région. L'argile fait fonction de parois imperméables retenant ainsi l'eau souterraine dans la masse granulaire. Elle recouvre partiellement la base des dépôts fluvioglaciaires. Lors de la phase d'exondation, des sables littoraux sont redistribués sur les flancs par-dessus l'argile. Les sources font résurgences au contact de l'argile. L'esker de type D est totalement enfoui sous l'argile. Il est possible de retrouver sur un même esker plusieurs types cités plus haut situés à des endroits différents. Les eskers de Launay, Saint-Mathieu-Berry et la Moraine d'Harricana présentent un type C.

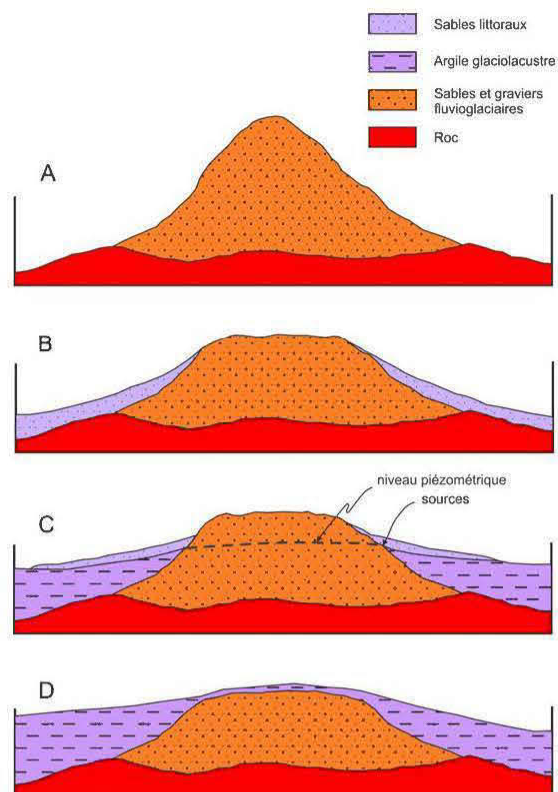


Figure 3.4: La classification des eskers en quatre types (modifiée de Veillette et al., 2004).

3.3 Hydrogéochimie régionale

Dans l'étude réalisée par Cloutier et al. (2007), portant sur l'hydrogéochimie régionale du roc fracturé du Bouclier canadien et des formations fluvioglaciaires de l'Abitibi au Québec, les données géochimiques et les cartes de distribution de paramètres montrent que la chimie de l'eau souterraine est influencée par les contextes géologiques notamment pour des paramètres comme le fer, le manganèse, l'arsenic, le fluor, la dureté et le pH. Dans cette même étude, d'autres paramètres sont aussi contrôlés par les contextes hydrogéologiques incluant la conductivité spécifique et les ions majeurs. L'étude démontre une différence dans la chimie de l'eau souterraine des eskers et celui des unités de roc fracturé. Cloutier et al. (2007) mentionnent que la chimie de l'eau peut être significativement différente d'un esker à l'autre, ainsi que la qualité peut-être variable à l'intérieur d'un même esker, des détails sur la géochimie des différents eskers sont alors requis pour expliquer les variabilités hydrochimiques entre les eskers.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Compilation des données existantes

L'étude des données existantes est la première étape à réaliser lors d'une étude hydrogéochimique. Son objectif est de classer l'information initiale dans le but de savoir de quelle information nous disposons pour poursuivre. La compilation de ces données géologiques et hydrogéologiques peut mener à l'évaluation et la mise en œuvre de travaux de terrain essentiels à la collecte de nouvelles données nécessaires pour le projet. Dans le cas dudit projet, les travaux effectués par Champagne (1988) sur le potentiel aquicole en relations avec certaines sources gravitaires de l'Abitibi, ont servi de point de départ pour le choix des sites les plus intéressants et la planification des travaux.

4.2 Planification des travaux

L'échantillonnage de l'eau des sources demande un suivi rigoureux des manipulations effectuées sur le terrain. Pour ce faire, il est important de suivre un protocole d'échantillonnage dans lequel est décrite la méthodologie qui est appliquée tout au long des prélèvements afin de s'assurer de l'intégrité des échantillons. La méthodologie utilisée dans le cadre de ce projet est décrite dans Bourque et Cloutier (2001). La figure 4.1 présente un organigramme décrivant les étapes à respecter lors de l'échantillonnage des sources (Castelli, 2010).

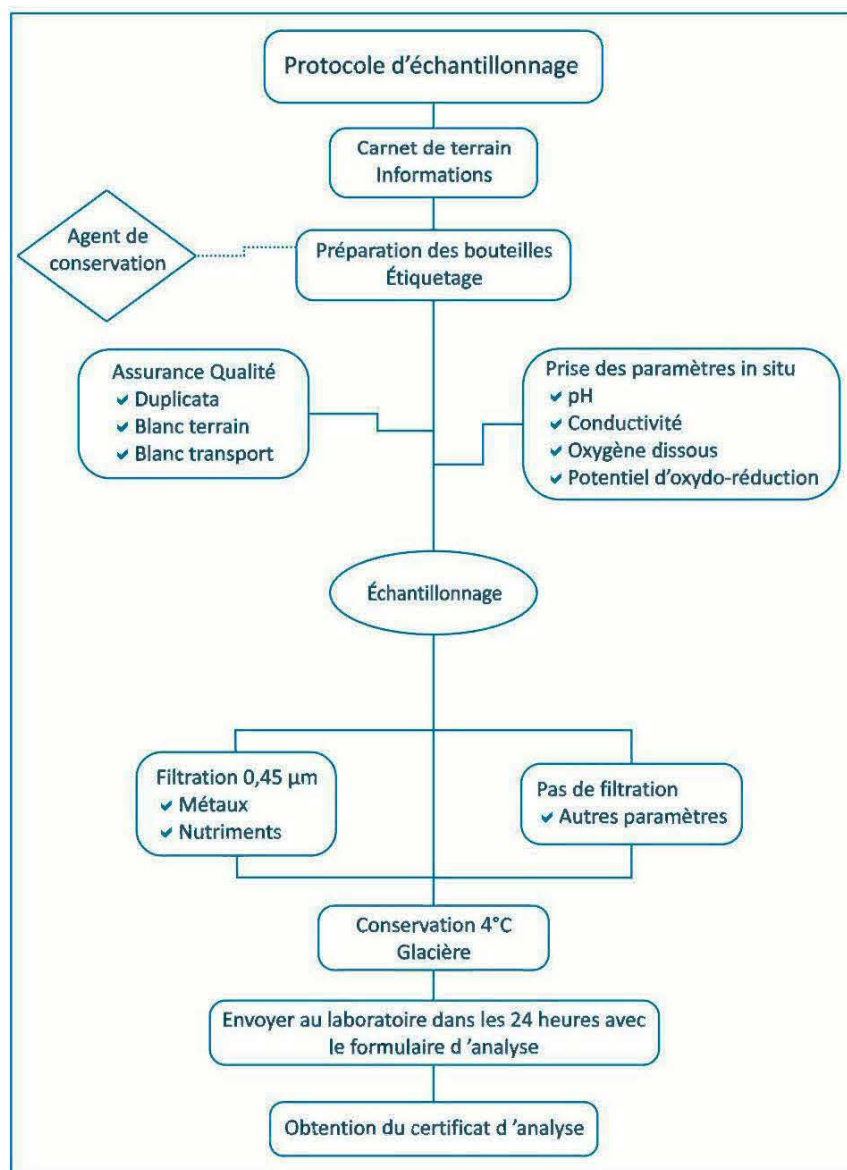


Figure 4.1: Protocole d'échantillonnage (modifié de Castelli, 2010).

4.3 Choix des sites et travaux d'échantillonnage

Le choix des sites a été fait en se basant sur l'étude des sources réalisée par Champagne (1988). Les travaux d'échantillonnage se sont déroulés de juillet 2009 à septembre 2011. Ces travaux ont permis de recueillir 96 échantillons d'eau répartis sur trente (30) sources. Les échantillons ont été analysés pour plusieurs paramètres chimiques, incluant les constituants majeurs (Ca, Mg, Na, K, HCO₃ (alcalinité totale), Cl, SO₄), mineurs (Br, F, Fe, Mn, NH₄, NO₂, NO₃, P inorganique, Si, Sulfures), traces (Al, Sb, Ag, Ba, Be, Bi, B, Cd, Cu, Sn, Li, Ni, Pb, Se, Sr, Ti, U, V, Zn), les

isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) et radioactifs, (^{14}C et tritium), ainsi que CID, COD, NTK et P total afin d'évaluer l'apport de la matière organique (tableau 4.1). Les paramètres pH, température, conductivité électrique spécifique, oxygène dissous et le potentiel d'oxydoréduction ont été mesurés sur place à l'aide d'une sonde multi-paramètres après que ceux-ci soient demeurés stables pour au moins 30 secondes. Tous les échantillons d'eau de source ont été filtrés avec des filtres Waterra 0.45 μm hautes capacité et performance.

Tableau 4.1: Liste des paramètres analysés (tiré de Bourque et Cloutier, 2001).

Paramètres	Bouteille ¹	Agent de conservation	Filtration ²
Ag, Al, As, B, Ba, Br, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Se, Si, Sr, Zn, U	60 ml, P 125 ml, P	Acide nitrique	0.45 μm , P
Hg	15 ml, P	Acide nitrique + solution d'Or	0.45 μm , P
Cl, F, SO_4 , Alcalinité totale, Couleur	500 ml, P	aucun	aucune
NO_2 - NO_3 , NH_4 , N-total	125 ml, P	Acide sulfurique	0.45 μm , N
CID, COD	125 ml, P	aucun	aucune
E. coli, Coliformes totaux, Colonies atypiques	250 ml, P	Thiosulfate de sodium	aucune
Phosphore inorganique total	250 ml, P	Acide sulfurique	0.45 μm , N
Cyanures totaux	250 ml, P	NaOH	aucune
Sulfures totaux	250 ml, P	Acétate de zinc + NaOH	aucune
$\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$	60 ml, P	aucun	aucune
^3H , $\delta^{13}\text{C}$	1 L, P	aucun	aucune
^{14}C	250 ml, V 1 L, P	aucun	aucune

1: P = Plastique V = Verre

2: P = Polyéthylène N = Nitrocellulose

La distribution géographique de l'ensemble des 30 sites d'échantillonnage est présentée à la figure 4.2. Le portrait régional a été réalisé sur un ensemble de 24 sources en 2009. Un suivi temporel a été effectué sur les 9 sources qui présentent des débits plus importants, afin d'obtenir des données à la période d'étiage et de recharge. Ce suivi temporel a débuté en 2010 et s'est poursuivi en 2011.

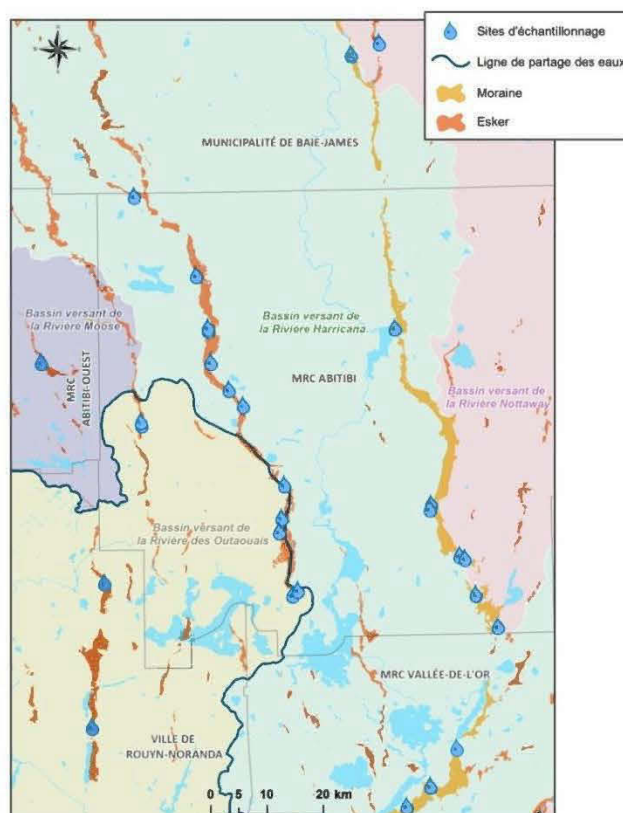


Figure 4.2: Localisation des sources échantillonnées (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Le contrôle de la qualité des échantillons est effectué par le prélèvement de duplicatas. Les échantillons et les duplicatas recueillis sont envoyés au laboratoire pour les analyses en même temps, mais identifiés différemment. En général les duplicatas représentent 10 % du nombre total des échantillons prélevés, pour une étude régionale 5% des échantillons sont prélevés. À la réception des certificats d'analyses, une comparaison des analyses chimiques faites en laboratoire est alors effectuée entre l'échantillon et son duplicata. La qualité des analyses chimiques est vérifiée par le calcul de l'électroneutralité afin de détecter des erreurs d'analyses. Selon le guide méthodologique de Bourque et al. (2008), lorsque l'équilibre cations/anions représente une erreur

inférieure à $\pm 5\%$ le résultat est accepté. Cependant si l'erreur se situe entre 5 et 10%, les résultats sont utilisés sous réserve, parfois simplement rejetés ou font l'objet d'une vérification en laboratoire d'analyse. Sur 96 échantillons, 4 ne respectaient pas la règle du 10% et 5 échantillons se situaient entre 5% et 10%. Ces échantillons provenaient tous des sources faisant parties du suivi mensuel. Le nombre des échantillons inférieurs à une erreur de $\pm 5\%$ représente 91%.

Le contrôle de la qualité des données est aussi réalisé par la comparaison à des blancs de méthode. Les blancs de méthode permettent de mesurer le niveau de contamination analytique associée à la verrerie, aux réactifs et aux impuretés extrinsèques telles que la poussière. La plupart des procédures analytiques en nécessitent l'utilisation. Des blancs de transport sont exigés seulement pour l'analyse de paramètres organiques volatils.

4.4 Matériel d'échantillonnage et prélèvements

Le laboratoire a mis à notre disposition les bouteilles de prélèvement contenant des agents de préservation permettant de réaliser l'échantillonnage. Il fournit également le matériel de transport requis pour l'acheminement et la conservation des échantillons, tel que les boîtes réfrigérantes. Suite à leur prélèvement, les bouteilles sont conservées à 4°C jusqu'au moment de l'analyse en laboratoire à l'aide de bloc réfrigérants dans des boîtes réfrigérantes. Le remplissage des bouteilles avec des agents de préservation doit être fait de manière à ne pas faire déborder l'eau d'échantillonnage, et sans rinçage préalable. Les bouteilles ne contenant pas d'agent de préservation sont remplies jusqu'à l'épaule après les avoir rincées deux fois à l'eau d'échantillonnage.

4.5 Échantillonnage des sources

L'utilisation de traceurs physico-chimique, isotopique est un moyen très puissant de connaissance des eaux souterraines (Gilli et al., 2008). En effet, en tout point d'observation tel un piézomètre, un point de captage et un point de résurgence, l'hydrogéochimie de l'eau donne des indications sur l'origine et l'évolution de l'eau souterraine. Lors de campagnes d'échantillonnage pour évaluer la qualité des ressources en eau souterraine ou pour la caractérisation hydrogéochimique de celle-ci, il est impératif de s'assurer de l'intégrité des échantillons. Différentes procédures sont élaborées concernant l'échantillonnage et la conservation en vue d'analyse de l'eau souterraine. Un programme de contrôle de la qualité documenté doit être mis en place afin de s'assurer de la

validité des procédures de mesure, de la calibration des appareils et des analyses en laboratoire. Chaque registre d'appareil contient les éléments comme l'identification de l'appareil, le numéro d'inventaire, le numéro de série et de modèle, l'année d'achat et la date de mise en service, la localisation, les instructions d'entretien, les procédures de fonctionnement et de calibration s'il y a lieu. En général, l'entretien et la calibration des équipements sont effectués avant le départ sur le terrain par le responsable de l'équipe d'échantillonnage.

Chaque échantillon fait l'objet d'une identification unique enregistrée dans un carnet de terrain en copie papier mais également informatisée. L'échantillon est identifié comme suit : le nom du préleveur, la date, le lieu, l'origine du prélèvement, l'heure, et un code d'identification. Les échantillons recueillis sont envoyés au laboratoire d'analyses externes en vue de déterminer les concentrations des paramètres ciblés pouvant se trouver dans l'eau souterraine.

4.5.1 Paramètres physico-chimiques

L'organigramme proposé à l'annexe 3 présente une série d'étape à suivre pour réaliser la caractérisation géochimique et le suivi du bruit de fond de l'eau souterraine.

La chimie des eaux de source est non intrinsèquement différente de la chimie de l'eau souterraine et les mêmes principes s'appliquent. Les cations dominants de l'eau de source sont Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} et les anions dominants sont HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} (White, 2010). Les ions majeurs peuvent être utilisés pour faire des regroupements des échantillons de l'eau de source, souterraine et de surface. Les trois groupes principaux sont les eaux carbonatées où les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} tendent à être les ions dominant, les eaux sulfatées, où Mg^{2+} est en quantité plus grande que Ca^{2+} avec présence d'ions alcalins, et les eaux chlorées où les ions alcalins sont dominants. La chimie dominante dépend habituellement de la géologie de l'aquifère, des processus géochimiques, des possibles mélanges d'eau, ainsi que du temps de résidence. Les critères de distinction d'une source à une autre sont la concentration relative des anions dominants HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} , le mélange relatif des ions alcalins, Na^+ et K^+ , et les ions alcalino-terreux, Ca^{2+} et Mg^{2+} , la concentration total des espèces dissoutes, la température et la présence des gaz dissous, spécialement H_2S et CO_2 en excès (White, 2010).

4.5.2 Paramètres mesurés in situ

Certains paramètres doivent préférablement être mesurés sur le terrain parce qu'ils évoluent rapidement dans le temps. Ces paramètres sont présentés au tableau 4.2 de même que les appareils permettant d'effectuer les mesures.

Tableau 4.2: Paramètres physico-chimiques usuels mesurés ou évalués sur le terrain et matériel pour effectuer ces mesures (tiré de Bourque et Cloutier, 2001).

Paramètre physico-chimique mesuré	Matériel nécessaire	Précision	Critères de stabilité
Température (°C)	Thermomètre en verre	± 0.1	± 0.2
pH (/)	Sonde YSI modèle 556 MPS	± 0.1	± 0.2
Conductivité électrique (µS/cm)	Sonde YSI modèle 556 MPS	± 2% sur une suite de 3 mesures	± 4% sur une suite de 3 mesures
Oxygène dissous (mg/L)	Sonde YSI modèle 556 MPS	± 0.2 mg/L	± 0.4 mg/L
Potentiel d'oxydo-réduction (mV)	Sonde YSI modèle 556 MPS	± 0.1mV	± 0.6 mV
Couleur	Évaluation subjective		
Odeur	Évaluation subjective		
Turbidité	Évaluation subjective		

L'appareil utilisé pour mesurer la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous, le potentiel d'oxydo-réduction est une sonde multi-paramètres de marque YSI modèle 556 MPS.

Des estimations de la salinité et des matières ou solides dissoutes totales sont également faites à partir des mesures de la conductivité (multiplication de la conductivité par 55 à 65% par exemple pour estimer la valeur de la matière dissoute total) (Blanchette, 2006).

4.5.3 Arpentage des sources

La particularité des sources de l'étude est qu'elles font résurgence à plus de 300 mètres d'altitude. Parmi les 24 sites échantillonnés en 2009, les 18 sites accessibles ont été arpentés.

L'arpentage a été réalisé à l'aide de l'appareil GNSS (Global Navigation R8 Satellite System) de Trimble. La précision de l'appareil a été calculée lors d'une étude interne réalisée par Dallaire et

Nadeau (2009), sur une série de 30 mesures relevées à l'intérieur d'une surface plane de 1m². Ces mesures ont été effectuées sans bornes géodésiques. La précision sur la mesure d'altitude donne une valeur égale à ± 1 cm. Pour les mesures d'arpentages effectuées sur les sources, les bornes géodésiques étaient facilement identifiables sur le terrain, la précision est donc meilleur. Le tableau 4.3 présente les données d'arpentage.

Tableau 4.3: Données d'arpentage des sources.

Nom du point	Altitude (m)	X UTM-NAD 83	Y UTM-NAD 83	Précision cm	Précision cm	Zone
ABTE3475-Authier	315,08	5404707.592	221951.41	2.8	6.2	17
ABTE3490Eska-Crép	302.09	5374588.306	262945.28	1.9	2.7	17
ABTE3478-Barraute	371.03	5365550.494	295054.772	0.9	1.4	18
ABTE3479-BarrBuco	346.07	5359077.337	296567.149	6.7	11.6	18
ABTE 3483-Kachou	312.84	5325528.565	286601.644	1.2	2.2	18
ABTE 3482-Gabriel	300.45	5332038.827	291642.053	3.9	7.4	18
ABTE34667-Landrienne	329.74	5375478.183	289634.721	2.8	4.4	18
ABTE3465-Source Amos	307.31	5380440.966	263825.018	1.5	2.1	17
ABTE3469-Berry	314.81	5409022.32	251844.959	0.8	1.3	17
ABTE3488-Matagami-lac	N/A					18
ABTE3487-Coco Tremblay	N/A					17
ABTE3502-Joannès	316.19	5339471.718	227193.747	1.7	5.6	17
ABTE3485-Mont-Brun	301.61	5364964.274	230872.089	0.9	1.4	17
ABTE3492-Pisciculture	312.13	5372181.802	262393.177	1.4	3.3	17
ABTE3486-Cazan	N/A					18
ABTE3474-Launay fermier	312.96	5393139.597	239006.429	2.4	6.7	17
ABTE3472-Berry	312.15	5418462.226	250354.354	1	2.8	17
ABTE3491-Lac La Motte	320.00	5360836.4	264097.547	2.6	4.7	18
ABTE3466-Trécesson	303.81	5394921.388	257317.496	5.3	8.1	17
ABTE3480-Lac Vert	314.33	5353190.05	300221.815	2	6.8	18

4.5.4 Traceurs environnementaux

Les isotopes stables de l'eau $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ peuvent être utilisés pour déterminer l'origine de l'eau. Les isotopes radioactifs ^3H et ^{14}C sont utilisés dans la datation de l'eau souterraine, une information très importante lors d'une étude hydrogéologique régionale. Le tableau 4.4 présente quelques applications de ces traceurs utilisés en hydrogéologie.

Tableau 4.4: Isotopes et leurs applications (adapté de Cloutier, 2004).

Traceurs	Applications
Isotopes Stables	
$\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$	- Source, origine, temps de résidence et processus d'évolution des eaux souterraines (Long et al., 1988; Banner et al., 1989; Desaulniers et Cherry, 1989; Matray et al., 1994) - Mélanges d'eaux souterraines (Weaver et al., 1995) - Caractérisation de la recharge (Ayalon et al., 1998; Rosen et al., 1999; Cane et Clark, 1998; Landon et al., 2000; Lee et al., 1999; Abbott et al., 2000) - Diffusion dans les argiles (Desaulniers et Cherry, 1981; Hiscock et al., 1996)
Isotopes Radioactifs	
^3H (tritium)	- Datation de l'eau de 0 à 50 ans ($t_{1/2} = 12.43$ ans) (Fritz et al., 1991) - Caractérisation de la recharge (Robertson et Cherry, 1989)
^{14}C	- Datation de l'eau de 1000 à 40000 ans ($t_{1/2} = 5,715$ ans) (Back et al., 1983; Plummer et al. 1990; Drimmie et al., 1991; Le Gal La Salle et al., 1996; Clark, et al., 1998) - Calage de modèles, taux de réactions et vitesse d'écoulement (Parkhurst et al., 1996)

4.6 Méthodes d'analyse

La représentation graphique et cartographique des résultats d'analyses physico-chimiques aide à la compréhension des caractéristiques hydrogéochimiques qui ont une variabilité spatio-temporelle.

4.6.1 Cartes à points et diagramme de Piper

Les cartes à points fournissent des indices sur la qualité de l'eau souterraine et sur les caractéristiques géochimiques. Elles montrent de façon géographique l'étendue des variations des concentrations chimiques d'un élément en particulier, la grosseur des points est proportionnelle à la concentration et le point est placé sur le site d'échantillonnage. La proportionnalité entre les points et la concentration d'un élément peut être exprimée, en fonction de son logarithme, de sa racine carrée ou de son carré. On peut dès lors déterminer les principales caractéristiques géochimiques de l'eau et distinguer des tendances particulières attribuées à certains secteurs.

Le diagramme de Piper (Piper, 1944) permet de présenter plusieurs échantillons sur un même graphique. Les concentrations d'ions majeurs sont placées sur deux triangles différents

équilatéraux et reproduit sur un losange placés entre ces triangles. Les différents types d'eau sont définis à l'aide de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ , les cations majeurs, localisés dans le triangle de gauche et HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , les anions majeurs à droite. Le losange central du diagramme est une combinaison des fractions des cations et des anions. Le diagramme de Piper est considéré pour la classification des faciès hydrogéochimique de l'eau ayant pour but l'étude de l'évolution de l'eau souterraine (Van Camp et Walraevens, 2008).

4.6.2 Analyses statistiques et représentation des données

Plusieurs logiciels sont utilisés pour traiter et présenter des données géochimiques. Les résultats du projet des Basses-Laurentides (Cloutier, 2004) et Châteauguay (Blanchette, 2006) ont été analysés et traités en suivant la méthodologie basée sur l'application successive de deux logiciels présentés dans le tableau 4.5.

Il est important d'effectuer des calculs de paramètres statistiques comme la moyenne, la médiane, le minimum, le maximum, l'écart-type, la variance afin de faire ressortir les caractéristiques des différentes formations aquifères (Simard et Des Rosiers, 1980). Suite au calcul statistique, il est possible d'évaluer la variabilité de la qualité de l'eau à partir des résultats des différents paramètres analysés. Dans les calculs statistiques, les concentrations sont égales à la moitié des limites de détection lorsque les concentrations sont inférieures à celle-ci (Farnham et al., 2002).

De façon pratique, il peut être nécessaire de fournir une étendue de valeur et pas simplement une moyenne des concentrations bien que les valeurs normatives peuvent être utiles comme lignes directrices. Les valeurs communes utilisées dans les paramètres statistiques comme la médiane au lieu de la moyenne sont préférables pour comparer différentes série de données car elles sont moins affectées par les valeurs excentrées (Edmunds et al., 2003).

Les données géochimiques ont été intégrées dans le logiciel AquaChem version 2011.1.83 (Schumberger Water Services, 2011) et dans le logiciel Statistica 9.0. (StatSoft 2009). Le logiciel AquaChem est utilisé pour constituer une base de données hydrogéochimique. Il permet de réaliser la vérification des analyses chimiques, la comparaison aux normes de la qualité concernant l'eau potable, de déterminer les types d'eau et de calculer des statistiques.

Tableau 4.5: Logiciels utilisés pour le traitement de données géochimiques.

AQUACHEM version 2011.1.40	Base de données hydrogéochimiques Permet entre autres de vérifier la qualité des analyses chimiques, de produire des graphiques, de comparer les résultats aux normes de qualité, de déterminer les types d'eau et de faire des statistiques. Modélisation hydrogéochimique
STATISTICA 9.0	Caractéristique de la composition chimique des eaux souterraines.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Ce chapitre présente les résultats de la caractérisation hydrogéochimique des sources associées aux eskers de l'Abitibi. D'un ensemble de 30 sites choisis parmi l'étude aquicole de Champagne (1988), 24 sites ont été sélectionnés et échantillonnés pour réaliser le portrait régional de la qualité de l'eau des sources de juillet à septembre 2009. Un suivi détaillé des sources les plus importantes a aussi été réalisé à 9 sites pour la période de juillet 2009 à octobre 2011 afin d'évaluer la variabilité géochimique saisonnière de l'eau, mais également pour identifier l'origine de l'eau souterraine qui fait résurgence aux sources.

5.1 Hydrogéochimie et qualité de l'eau des sources

5.1.1 Description et localisation des sites d'échantillonnage

Le tableau 5.1 présente une description des 24 sites échantillonnés de juillet à septembre 2009, de l'environnement ainsi que la localisation des sources sur les différents eskers. Le tableau présente aussi les 9 sites sélectionnés pour réaliser le suivi temporel. La figure 5.1 présente la localisation des sites d'échantillonnage et le lien entre les sources et les eskers, soit de l'ouest vers l'est : l'esker d'Authier (1 site : abte3475), l'esker de Vaudray-Joannès (2 sites : abte3485, abte3502), l'esker de Launay (1 site : abte3474), l'esker Saint-Mathieu-Berry (10 sites : abte3481, abte3472, abte3469, abte3477, abte3466, abte3465, abte3490, abte3492, abte3491, abte3484), la Moraine d'Harricana (9 sites : abte3488, abte3476, abte3467, abte3478, abte3479, abte3480, abte3482, abte3483, abte3486) et l'esker sans nom (1 site : abte3487).

Tableau 5.1: Description et localisation des 24 sources échantillonnées.

Sites ID	Localisation de la source Esker ou Moraine	Description du site
ABTE3465*	Flanc de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Source d'Amos. Après la calvette, en aval de la résurgence (15 m) fort débit sortant de la calvette. 12 km d'Amos.
ABTE3466	Flanc de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Petite source dans la terre coulant en ruisseau vers le lac. 22 km d'Amos.
ABTE3467*	Flanc de la Moraine d'Harricana	Ruisseau, en aval de la résurgence (30 mètres). Mousses et troncs d'arbres dans le lieu d'échantillonnage. 29 km d'Amos.
ABTE3469*	Flanc de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Ruisseau, aval de la résurgence (150 m). 52 km d'Amos.
ABTE3472	Sur l'esker Saint -Mathieu-Berry	Petite source, intermittente. 52 km d'Amos.
ABTE3474	À proximité de l'esker de Launay	Source aménagée. Gros débit au tuyau. Source échantillonnée en amont du tuyau. Deux résurgences visibles, petite chute d'eau venant du lac en parallèle avec les résurgences. Échantillonnée à la résurgence la plus proche du tuyau, (4m). 35 km d'Amos.
ABTE3475*	À proximité de l'esker d'Authier	Source alimentée par le lit (sous l'eau). 75 km d'Amos.
ABTE3476	À proximité de la Moraine d'Harricana	Petite source, échantillonnée en aval de la résurgence. Végétation luxuriante. Alimentation sous l'eau. Accès difficile, longue marche dans un bois dense. 39 km d'Amos.
ABTE3477	Au pied de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Dans une ancienne forêt buchée, eau de couleur brunâtre très clair, petite odeur mais pas de soufre. Bonne source. 25 km d'Amos.
ABTE3478*	Sur le flanc de la Moraine d'Harricana	Plusieurs résurgences (3) rejoignent le bassin. Couleur bleutée. Alimentation sous l'eau. Échantillonnée dans le bassin. Non loin d'une mine. 62 km d'Amos.
ABTE3479*	À proximité de la Moraine d'Harricana	Échantillonnée dans le petit réservoir créé naturellement à la résurgence de la source au pied de la paroi végétative plus haut que le tuyau. Gros débit. 46 km d'Amos.
ABTE3480	Flanc de la Moraine d'Harricana	À la résurgence (au pied d'un feuillus dans le boisé). Source aménagée. 70 km d'Amos.
ABTE3481	Sur l'esker Saint -Mathieu-Berry	Petite source, petit débit. Barrage de castor. 80 km d'Amos.
ABTE3482	Sur la Moraine d'Harricana	Trois résurgences visibles, échantillonnée à la résurgence principale. Environnement de la source pollué par des déchets variés. (à moins de 200 m, entreposage de rebuts métallique, 400 m parc industriel, 2 km scierie), affleurement rocheux aux alentours. 70 km d'Amos.
ABTE3483*	À proximité de la Moraine d'Harricana	Échantillonnée dans le bassin. Couleur bleutée. Alimentation sous l'eau. 85 km d'Amos.
ABTE3484	Au pied de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Petite source, intermittente. Échantillonnée à la résurgence. 18 km d'Amos.
ABTE3485	Flanc de l'esker Vaudray-Joannès	Source captée dans un baril, aménagée, en débordement. Point de résurgence non visible. 93 km d'Amos.
ABTE3486	Flancs de la Moraine d'Harricana	Résurgence sous l'eau, échantillonnée en aval de la source principale (à 170m de Cassan). 86 km d'Amos.
ABTE3487	Sur esker sans nom près de Matagami	Source captée, échantillonnée avant le lac. 90 km d'Amos.
ABTE3488*	Flancs de la Moraine d'Harricana	Source captée, échantillonnée avant le lac. À proximité de la route du nord, contamination anthropique possible par sel déglacant. 90 km d'Amos.
ABTE3490*	Flanc de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Source Eska-Crép. Dans le bassin, échantillonné avant la calvette. 18 km d'Amos.
ABTE3491	Flanc de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Petit suintement, résurgence sortant du sol, à la seringue. 18 km d'Amos.
ABTE3492	Flanc de l'esker Saint -Mathieu-Berry	Pisciculture. Échantillonnée à une des résurgences diffuses qui nourrissent le lac. 18 km d'Amos.
ABTE3502	Flancs de l'esker Vaudray-Joannès	Source aménagée, échantillonnée au tuyau. 75 km d'Amos.

Note : Site ID* = site utilisé pour le suivi temporelle (9 sites).

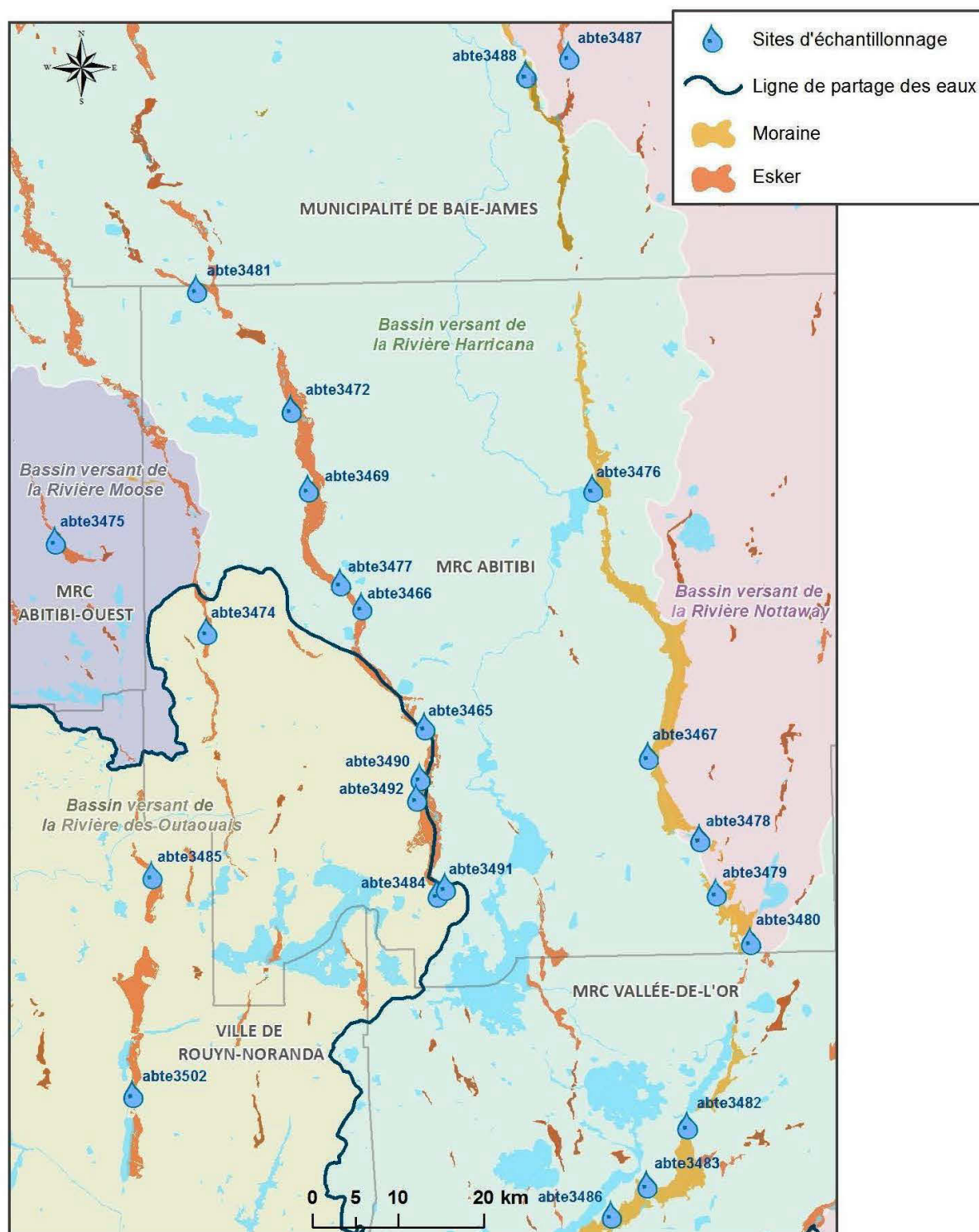


Figure 5.1: Localisation des sources échantillonnées en juillet et août 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

5.1.2 Portrait régional de l'hydrogéochimie des sources

Pour l'ensemble des 24 sites, les paramètres chimiques analysés incluent les constituants majeurs (Ca, Mg, Na, K, HCO_3 (alcalinité totale), Cl, SO_4), mineurs (Br, F, Fe, Mn, NH_4 , NO_2 , NO_3 , P inorganique, Si, Sulfures), traces (Al, Sb, Ag, Ba, Be, Bi, B, Cd, Cu, Sn, Li, Ni, Pb, Se, Sr, Ti, U, V, Zn), les isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$), ainsi que CID, COD, NTK et P total afin d'évaluer l'apport de la matière organique. Les paramètres pH, température, conductivité électrique spécifique, oxygène dissous et le potentiel d'oxydoréduction ont été mesurés sur le terrain. Les statistiques descriptives pour les données de juillet à septembre 2009 sont présentées au tableau 5.2.

De façon générale, la qualité de l'eau des sources est très bonne aux sites échantillonnés en 2009. Cependant, sur le territoire visé, des dépassements ont été relevés selon les normes du Québec (MDDEP, 2008) et les recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau potable de Santé Canada (2012). En effet, les résultats d'analyses chimiques effectuées sur les 24 échantillons indiquent des variations de la composition et de la qualité de l'eau et des dépassements des objectifs esthétiques pour les paramètres Al (1), Fe (2), Mn (1) et le pH (2). La dureté totale calculée est inférieure à 200 mg/L pour l'ensemble des échantillons, soit un maximum de 132 mg/L CaCO_3 avec une valeur moyenne de 50 mg/L (tableau 5.2). La matière dissoute totale (MDT) calculée est inférieure à 500 mg/L, soit un maximum de 259 mg/L avec une valeur moyenne de 101 mg/L.

La carte à point de la distribution régionale de la conductivité spécifique pour 2009 montre des valeurs de conductivité qui varient de 53 à 329 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une valeur moyenne de 122 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 5.2; tableau 5.2). La conductivité représente l'ensemble des minéraux dissous présents dans la solution. Une eau douce aura une conductivité plus basse par rapport à une eau de dureté plus haute qui affichera une conductivité plus élevée. La quantité de sels dissous va également nous donner une information sur la qualité de l'eau. Les eaux de source étant des eaux peu minéralisées dans la région d'étude, les valeurs de conductivité rencontrées sont basses. Cependant 3 des 24 sites échantillonnés en 2009 (abte3474, abte3488, abte3482) présentent des conductivités supérieures à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 5.2).

Tableau 5.2: Statistiques descriptives des paramètres analysés pour les sites échantillonnés de juillet à septembre 2009 (en mg/L lorsque non précisé).

Paramètres	N	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
Alcalinité	24	55.08	21.00	200.00	39.08
Al	24	0.0210	0.0005	0.1700	0.0388
Sb	24	0.0008	0.0005	0.0030	0.0006
Ag	24	0.00032	0.00014	0.00088	0.0001
As	24	0.0007	0.0005	0.0021	0.0004
NH ₄	24	0.023	0.010	0.280	0.055
Ba	24	0.007	0.005	0.023	0.005
Be	24	0.0005	0.0003	0.0005	0.0001
Bi	24	0.0006	0.0001	0.0027	0.0005
B	24	0.0115	0.0059	0.0300	0.0058
Br	24	0.0583	0.0500	0.2500	0.0408
Cd	24	0.0005	0.0001	0.0005	0.0001
Ca	24	16.9	6.6	46.8	9.7
Cl	24	3.6	0.4	28.2	7.3
Cr	24	0.0019	0.0003	0.0040	0.0010
Co	24	0.00048	0.00025	0.00050	0.0001
Cu	24	0.00081	0.00025	0.00800	0.0015
Sn	24	0.00110	0.00050	0.01300	0.0026
Fe	24	0.1131	0.0150	0.7400	0.1767
F	24	0.09583	0.05000	0.10000	0.0141
Li	24	0.0042	0.0005	0.0650	0.0130
Mg	24	2.6	0.9	10.3	2.1
Mn	24	0.009	0.002	0.128	0.026
Mo	24	0.0006	0.0003	0.0010	0.0002
Ni	24	0.0007	0.0005	0.0020	0.0005
NO ₃ +NO ₂	24	0.11	0.01	1.31	0.26
P inorganique	24	0.019	0.015	0.040	0.007
Pb	24	0.0005	0.0001	0.0020	0.0003
K	24	0.7	0.3	1.8	0.5
Se	24	0.0005	0.0005	0.0005	0.0000
Si	24	4.71	2.66	6.55	0.94
Na	24	3.3	0.9	18.2	4.3
Sr	24	0.0379	0.0100	0.1200	0.0277
SO ₄	24	5.7	2.2	12.5	2.4
Sulfure	24	0.019	0.010	0.020	0.003
Ti	24	0.0008	0.0005	0.0030	0.0005
U	24	0.0023	0.0005	0.0025	0.0006
V	24	0.0145	0.0010	0.0300	0.0050
Zn	24	0.0059	0.0025	0.0200	0.0037
Température	24	6.1	4.7	11.1	1.6
pH terrain	24	7.40	5.92	8.46	0.72
Conductivité	24	0.122	0.050	0.329	0.076
Oxygène dissous	24	9.67	0.41	12.94	2.80
E référence (mV)	24	259.25	251.29	261.62	2.64
ORP	24	125.55	42.10	198.30	40.98
Eh (mV)	24	384.80	297.05	458.54	41.22
Hg	22	0.0001	0.0001	0.0003	0.0001
NTK	22	3.01	0.25	25.00	5.10
Phosphore total	22	0.022	0.015	0.060	0.014
Oxygène dissous (%)	24	77.65	3.90	103.70	21.78
CID	22	14.39	2.00	36.00	9.15
COD	22	2.09	0.50	12.00	3.22
Couleur Vraie	22	9.64	0.50	62.00	19.50
Dureté total calculée	22	50	21	132	27
MDT calculé	22	101	54	259	50

N : nombre d'échantillons

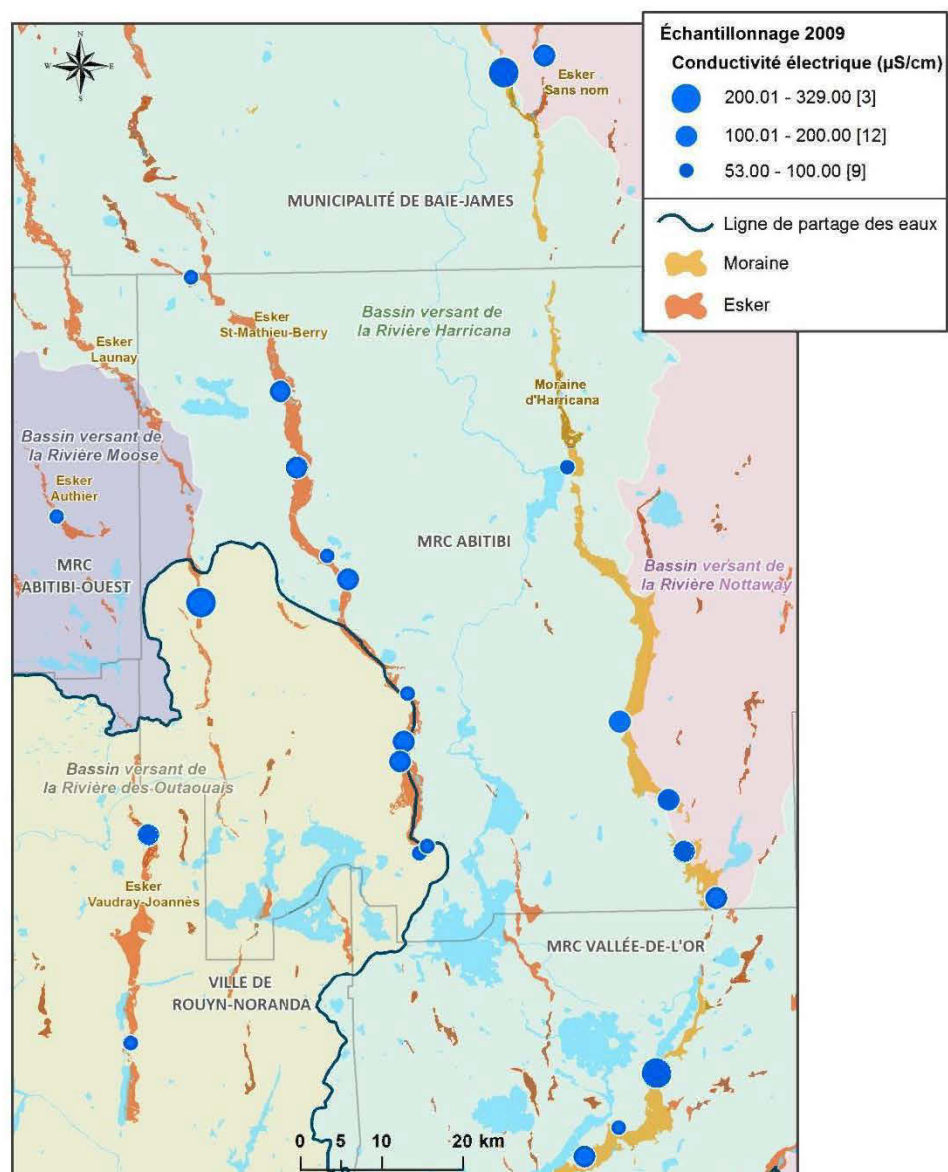


Figure 5.2: Distribution régionale de la conductivité spécifique en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Des cartes à points représentant la distribution d'éléments majeurs, incluant Ca, Mg, Na, Cl, et SO₄ pour l'année 2009, ont été réalisées afin de visualiser les variations géographiques de la chimie et de la qualité de l'eau des sources sur le territoire d'étude (figures 5.3-5.7). Les trois sites avec une conductivité supérieure à 200 µS/cm (figure 5.3) montrent aussi des concentrations plus élevées en calcium (figure 5.3), en sodium (figure 5.5), et en chlorures (figure 5.6).

Le calcium (figure 5.3) et les sulfates (figure 5.7) présentent une distribution sur le territoire plus variable que les autres éléments majeurs. Les concentrations en magnésium sont généralement faibles (inférieures à 2 mg/L pour 14 des 24 sites). Toutefois, les sources associées à l'esker Saint-Mathieu-Berry ont des valeurs en magnésium généralement plus élevées que celles associées à la Moraine d'Harricana (figure 5.4).

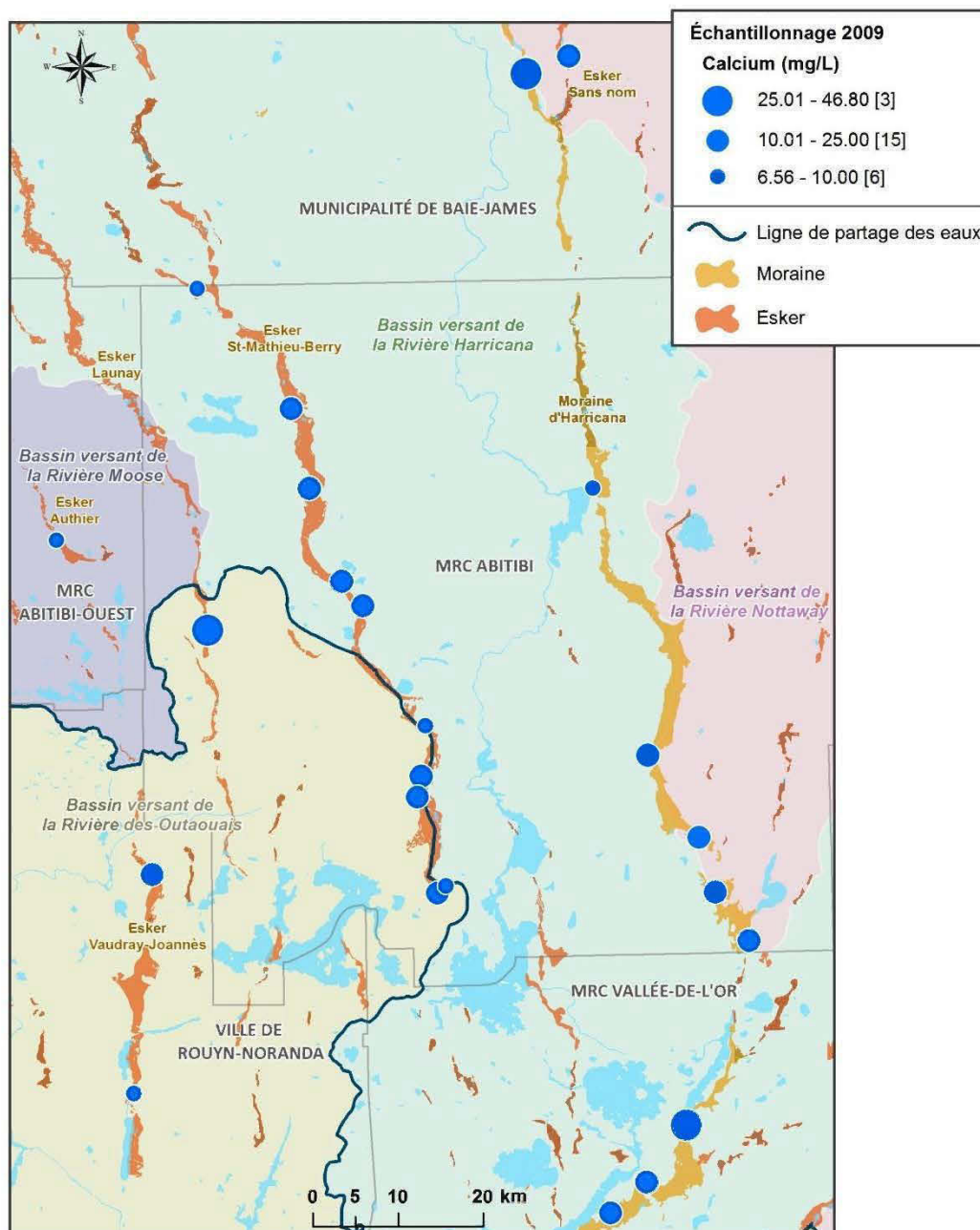


Figure 5.3: Distribution régionale du calcium en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

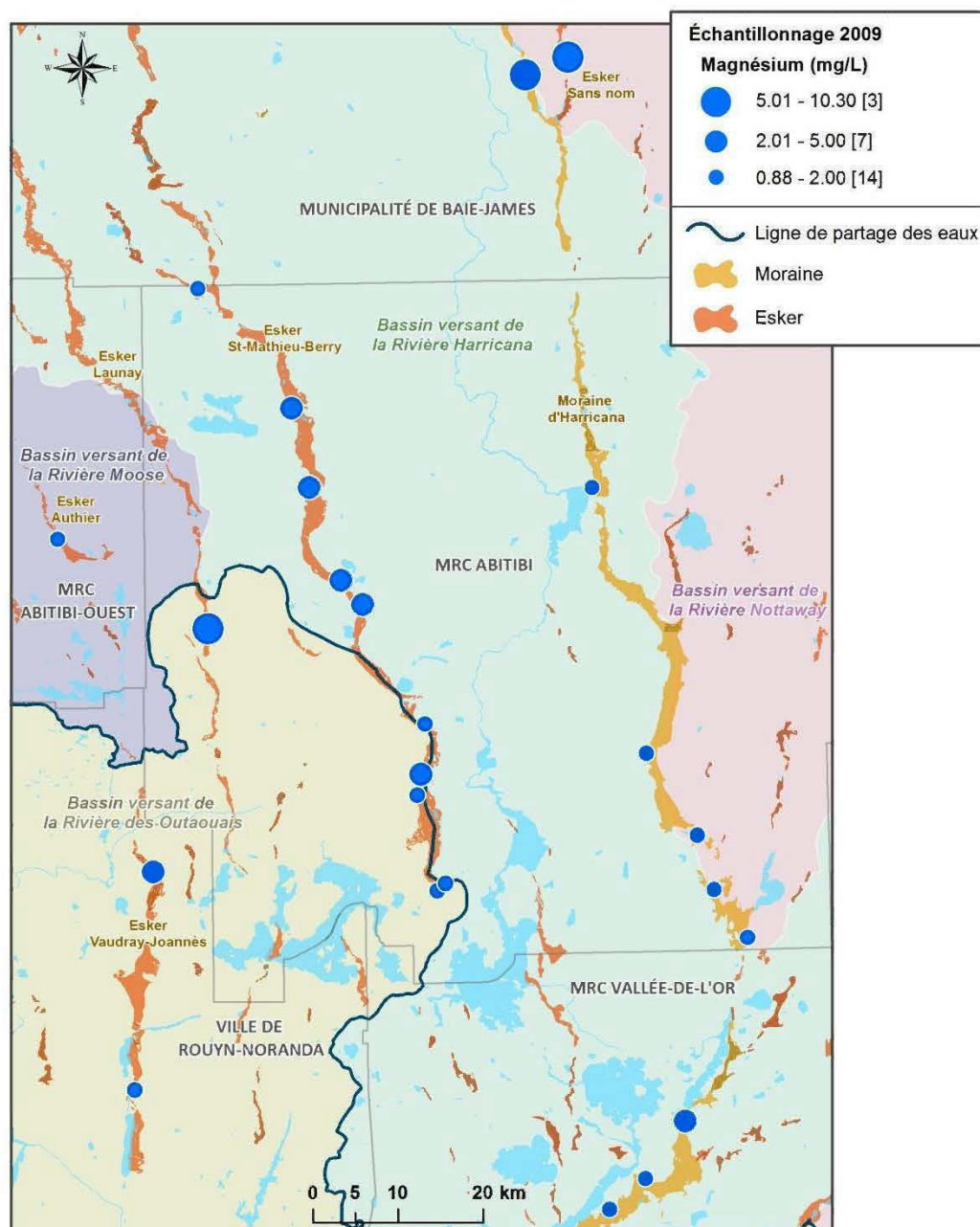


Figure 5.4: Distribution régionale du magnésium en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

À l'exception des 3 sites abte3474, abte3488 et abte3482, les concentrations en sodium et chlorures sont très faibles sur le territoire, la majorité des échantillons ayant une concentration inférieure à 2 mg/L pour le sodium (figure 5.5) et à 1 mg/L pour les chlorures (figures 5.6).

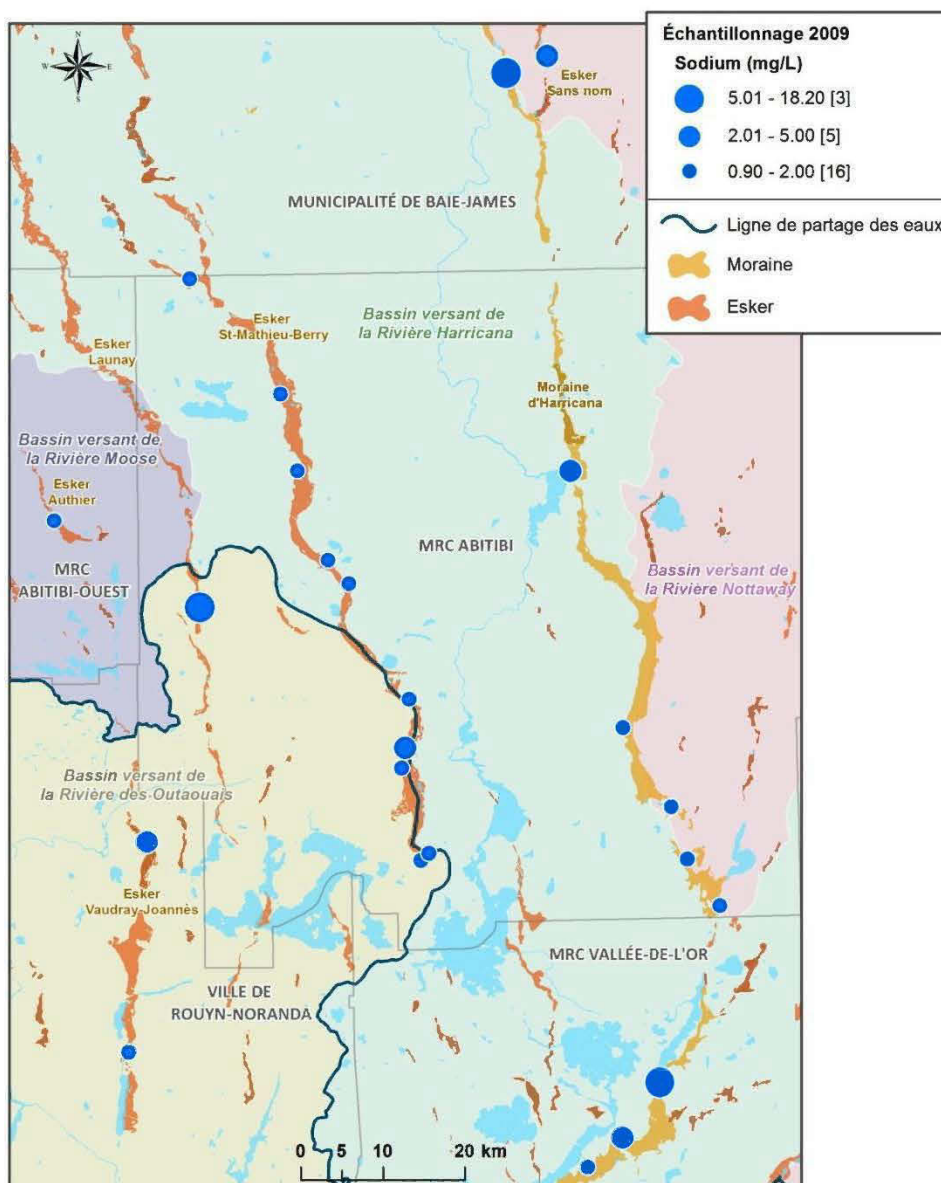


Figure 5.5: Distribution régionale du sodium en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

La comparaison entre la carte de la conductivité spécifique (figure 5.2) et les cartes des éléments majeurs montre que la conductivité spécifique de l'eau des sources est principalement contrôlée

par la présence en solution du calcium (figure 5.3), du sodium (figure 5.5) et des chlorures (figures 5.6).

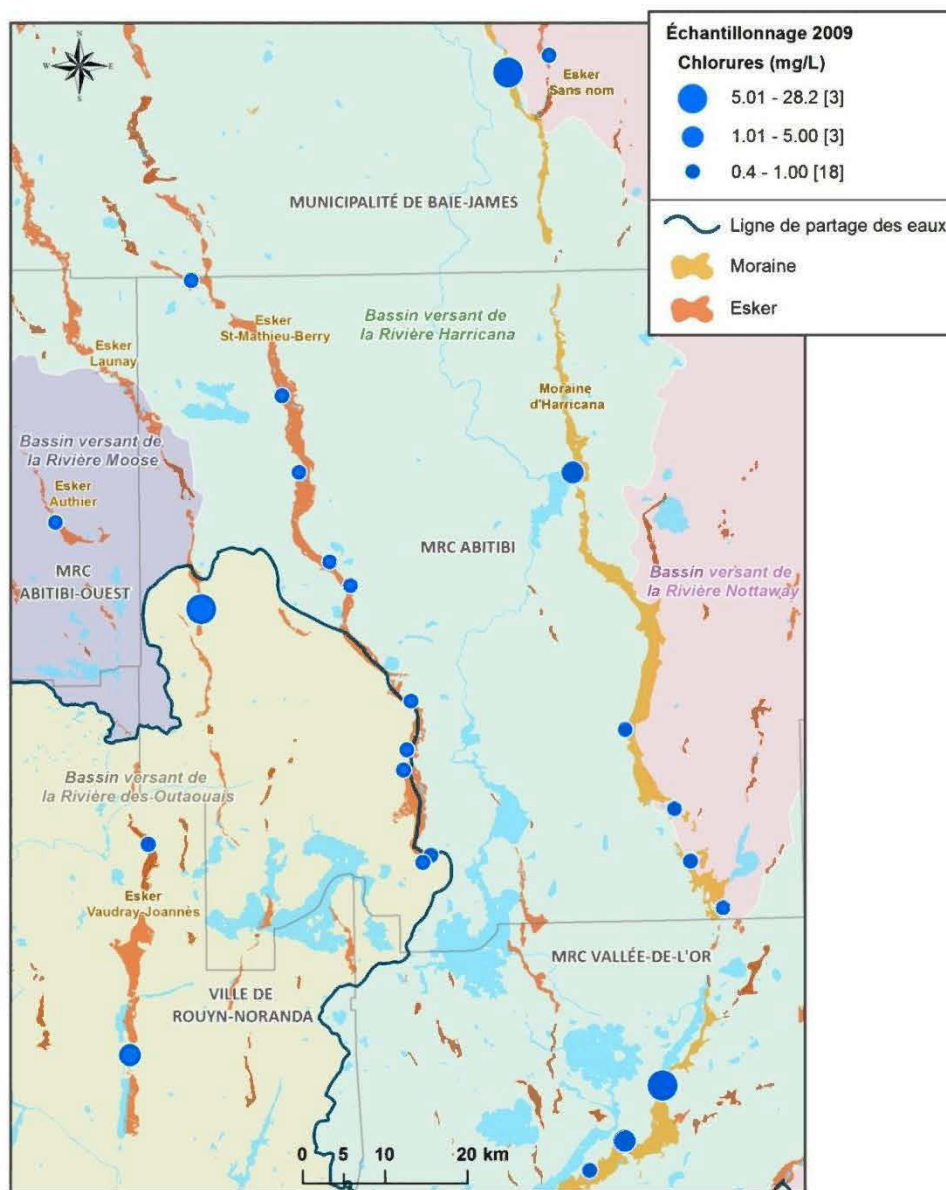


Figure 5.6: Distribution régionale des chlorures en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

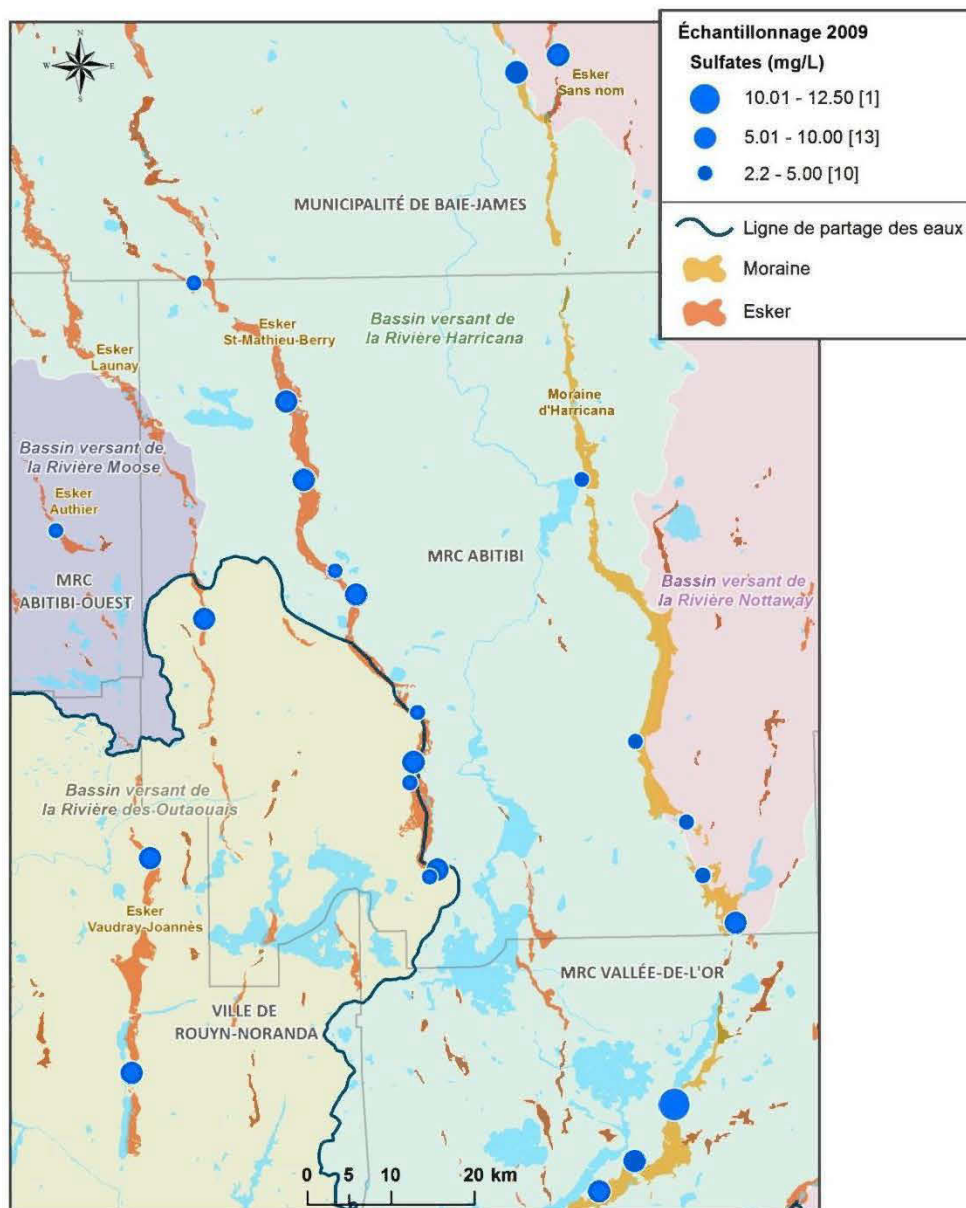


Figure 5.7: Distribution régionale des sulfates en 2009 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Le pH varie sur le territoire d'étude de 5,92 à 8,46 avec une valeur moyenne de 7,40 (tableau 5.2). Les sites présentant des valeurs de pH inférieures à 6,5 se situent tous à la pointe sud de l'esker Saint-Mathieu-Berry (figure 5.8).



Figure 5.8: Distribution régionale du pH en 2009 (juillet-août) (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Le fer, le manganèse et l'aluminium sont des éléments notés en dépassement pour les objectifs esthétiques. Les deux échantillons présentant un dépassement pour le fer se situent respectivement sur la Moraine d'Harricana (abte3480) et l'esker Vaudray-Joannès (abte3502). Les concentrations en fer présentent un minimum de 0,015 mg/L et un maximum de 0,74 mg/L avec une valeur moyenne de 0,113 mg/L (tableau 5.2). L'échantillon présentant un dépassement en aluminium se situe sur la Moraine d'Harricana (abte3476). L'échantillon présentant un dépassement pour le manganèse se situe sur l'esker Saint-Mathieu-Berry (abte3481). Les concentrations en manganèse dans l'eau des sources présentent un minimum de 0,002 mg/L et un maximum de 0,128 mg/L et une valeur moyenne de 0,009 mg/L (tableau 5.2).

La concentration en sulfures a été mesurée sous la limite de détection dans les échantillons analysés sur le site d'étude pour l'année 2009. Les nitrates et nitrites dans les échantillons analysés pour l'année 2009 ont des concentrations en nitrates variant de 0,01 mg/L à 1,31 mg/L en $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ avec moyenne 0,11 mg/L (tableau 5.2). On retrouve la concentration la plus élevée à un site situé au sud de la moraine Harricana (abte3482). La concentration en fluorures a été relevée sous la limite de détection dans les échantillons analysés sur le site d'étude pour l'année 2009. Les paramètres suivants : chrome (Cr), cobalt (Co), cadmium (Cd) se retrouvent sous la limite de détection (LD).

La figure 5.9 montre la composition des constituants majeurs des échantillons d'eau de source à l'aide d'un diagramme de Piper (Piper, 1944). Le diagramme illustre que les échantillons sont du type Ca-HCO_3 . Les eaux des différentes sources ne peuvent donc pas être distinguées sur la base de leur type d'eau.

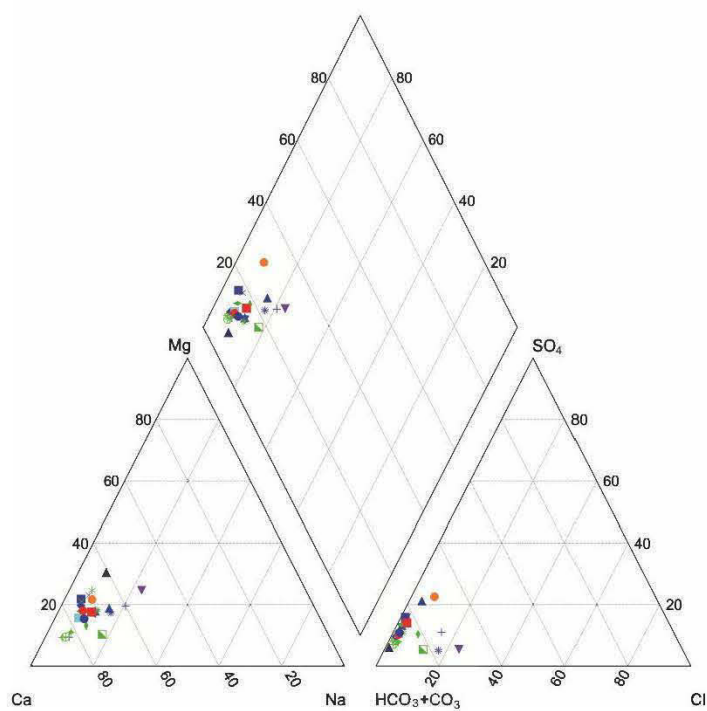


Figure 5.9: Diagramme de Piper des 24 sites de 2009 montrant le type d'eau Ca-HCO₃.

5.1.3 Analyse de l'hydrogéochimie régionale des sources

La section précédente a montré que la distribution spatiale des principaux éléments qui caractérisent la géochimie des sources est peu variable sur le territoire. Cette section présente une analyse des données pour comprendre les processus qui contrôlent la géochimie de l'eau des sources sur le territoire.

La figure 5.10 montre la variation des chlorures en fonction du sodium pour les 24 sources échantillonnées en juillet et août 2009. Les 3 sites qui présentent des valeurs de sodium (Na) et de chlorures (Cl) plus élevées se distinguent des autres échantillons de la région. Deux de ces sites sont situés sur la Moraine d'Harricana et un sur l'esker de Launay. Pour les deux sites associés à la Moraine d'Harricana, les observations faites lors de l'échantillonnage indiquent la possibilité d'une contamination anthropique (tableau 5.1). Cette contamination pourrait être associée à la proximité avec des routes et l'utilisation de sels déglacant. Puisque l'étude s'intéresse à la compréhension de la géochimie naturelle des eaux des sources, l'analyse hydrogéochimique des sources est ainsi réalisée sur les 21 sources non affectées par une contamination d'origine anthropique.

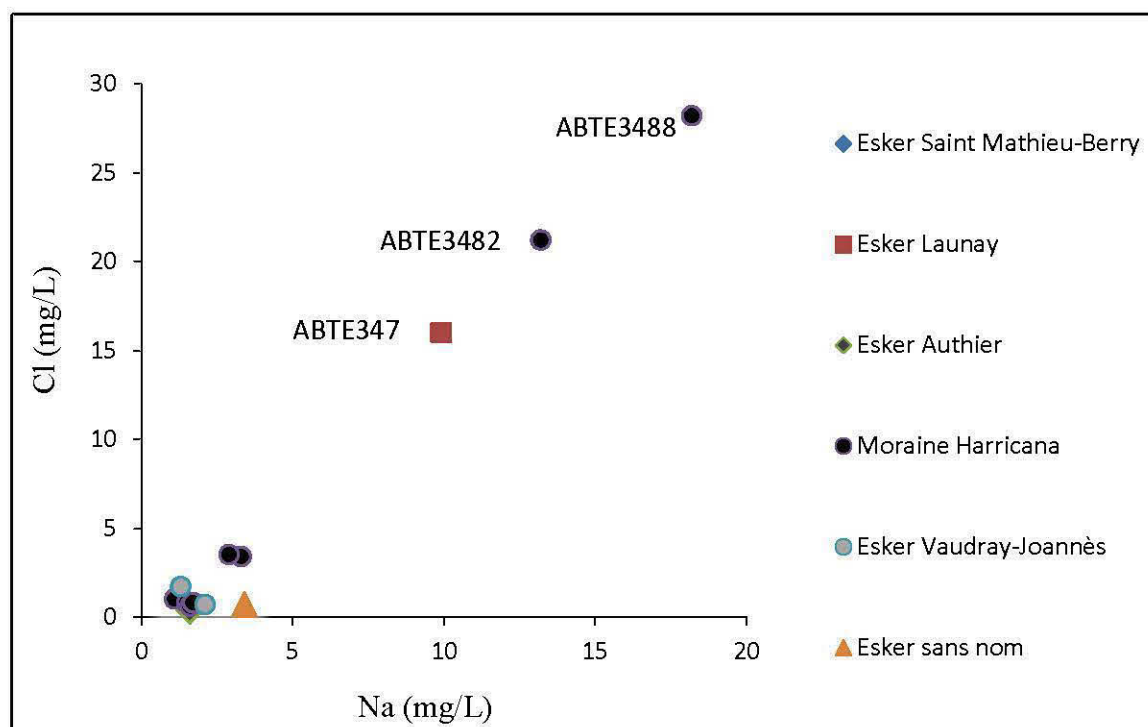


Figure 5.10: Variation des chlorures en fonction du sodium des 24 sites de 2009.

Les 21 sites sont répartis sur cinq eskers (Authier, Vaudray-Joannès, Saint -Mathieu-Berry, esker sans nom, Moraine d'Harricana). Le tableau 5.3 présente les statistiques descriptives des 21 sites sélectionnés et interprétés comme étant représentatifs du milieu naturel.

Dans le tableau 5.3, les limites de détection et les incertitudes sur quelques mesures sont présentées. Selon Ghestem et Lachenal (2008), l'incertitude globale se compose des incertitudes calculées en laboratoires associées aux incertitudes découlant des manipulations sur le terrain. Dans le résultat de leur synthèse bibliographique, Ghestem et Lachenal (2008), démontrent que l'incertitude du résultat final repose essentiellement sur les étapes de terrain lors de l'échantillonnage. Afin de réduire les incertitudes liées à la partie terrain, il est conseillé de suivre rigoureusement un protocole d'échantillonnage et de travailler de façon systématique pour minimiser les erreurs. En ce qui concerne les incertitudes des méthodes, la norme 17025 a imposé aux laboratoires d'estimer pour chaque méthode l'incertitude sur la mesure. Les laboratoires transmettent à la demande du client une estimation raisonnable de l'incertitude sur le résultat.

Tableau 5.3: Statistiques descriptives des paramètres des 21 sources pour l'année 2009 (en mg/L lorsque non précisé).

Paramètres	Valid N	Moyenne	Minimum	Maximum	Éc. type	LD.	Incertitude
Alcalinité	21	43	21	82	16	1	/
Al	21	0.0188	0.0005	0.17	0.0373	0.01	± 0.00024
Sb	21	0.0007	0.0005	0.003	0.00062	0.001	/
Ag	21	0.0003	0.0001	0.0009	0.00013	0.0006	± 0.00093
As	21	0.0007	0.0005	0.0021	0.00039	0.001	± 0.00083
NH ₄	21	0.025	0.01	0.28	0.059	0.02	/
B	21	0.0107	0.0059	0.03	0.0045	0.02	± 0.0071
Br	21	0.0595	0.05	0.25	0.04364	0.1	/
Ca	21	13.8	6.6	21.3	4.7	/	± 7.1
Cl	21	1	0.4	3.5	0.9	/	/
Cr	21	0.0018	0.0003	0.004	0.00095	0.001	± 0.00090
Cu	21	0.0008	0.0003	0.008	0.00164	0.001	± 0.0049
Sn	21	0.0012	0.0005	0.013	0.00273	0.001	/
Fe	21	0.1221	0.015	0.74	0.1877	0.1	/
Li	21	0.0044	0.0005	0.065	0.01395	0.001	/
Mg	21	2	0.9	6.1	1.2	/	± 0.93
Mn	21	0.01	0.002	0.128	0.027	0.005	± 0.00071
Ni	21	0.0007	0.0005	0.002	0.00045	0.001	± 0.0027
NO ₃ +NO ₂	21	0.05	0.01	0.16	0.04	0.02	/
Pinorganique	21	0.019	0.015	0.04	0.008	0.03	/
K	21	0.5	0.3	1.3	0.3	0.5	± 0.23
Si	21	4.56	2.66	5.87	0.87	/	± 1.3
Na	21	1.8	0.9	3.4	0.6	/	± 0.75
Sr	21	0.0285	0.01	0.06	0.011	/	± 0.015
SO ₄	21	5.2	2.2	9.2	1.9	/	/
Sulfure	21	0.019	0.01	0.02	0.003	0.04	/
Zn	21	0.0061	0.0025	0.02	0.0039	/	± 0.0072
Température	21	6.2	4.7	11.1	1.7	/	/
pH	21	7.38	5.92	8.46	0.76	/	/
Conductivité	21	0.096	0.053	0.181	0.032	/	/
OD	21	10.03	0.41	12.94	2.73	/	/
E réf. (mV)	21	259.12	251.29	261.61	2.78	/	/
ORP	21	126.34	42.1	198.3	39.02	/	/
Eh (mV)	21	385.46	297.05	458.54	39.54	/	/
NTK	19	3.16	0.25	25	5.49	/	/
P total	19	0.022	0.015	0.06	0.015	0.03	/
CID	19	11.6	2	26.6	5.8	/	/
COD	19	2.3	0.5	12	3.4	/	/
Couleur vraie	19	11.1	0.5	62	20.7	/	/
Duretécalculé	20	43.4	21.1	75.7	14.8	/	/
MDTcalculée	20	87.3	53.7	147.7	26	/	/

La figure 5.11 présente la concentration des ions calcium (Ca), sodium (Na), magnésium (Mg) et des chlorures (Cl) pour les 21 sites sur la zone d'étude. Le graphique montre que les concentrations en calcium (Ca) de l'eau des sources augmentent en fonction du pH. Les concentrations en Mg montrent une augmentation en fonction du pH moins importante que le Ca, alors que les concentrations en Na et Cl dans l'eau des sources sont indépendantes des valeurs de pH (figure 5.11).

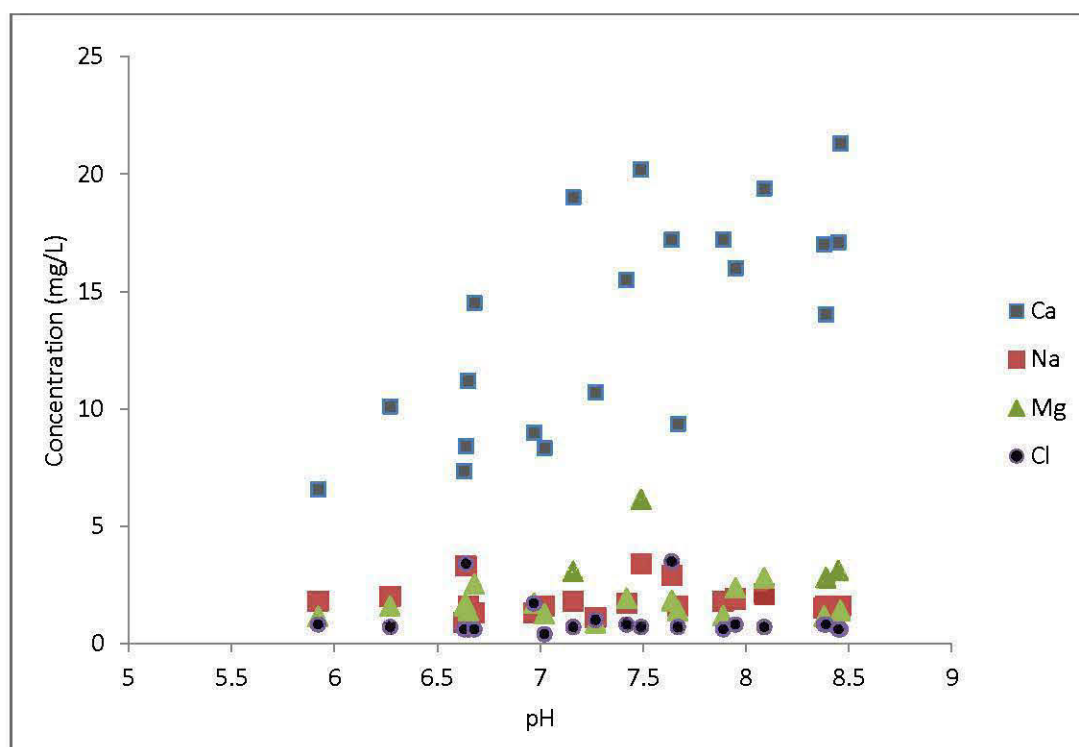


Figure 5.11: Graphique du Ca, Na, Mg et Cl (en mg/L) en fonction du pH des 21 sources en 2009.

Le graphique de la figure 5.12 montre la relation entre la matière dissoute totale (MDT) et les concentrations de plusieurs espèces dissoutes dans l'eau des sources. Le graphique montre une relation linéaire pour les concentrations en HCO_3^- et Ca^{2+} en fonction de la MDT, la concentration des deux paramètres augmentant avec la MDT. Les autres espèces (K^+ , Si , Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) sont présentes sous forme dissoute en concentrations plus faibles, et ne montrent pas d'augmentation marquée en fonction de la MDT, indiquant que la MDT des eaux de source est dominée par l'anion HCO_3^- et le cation Ca^{2+} .

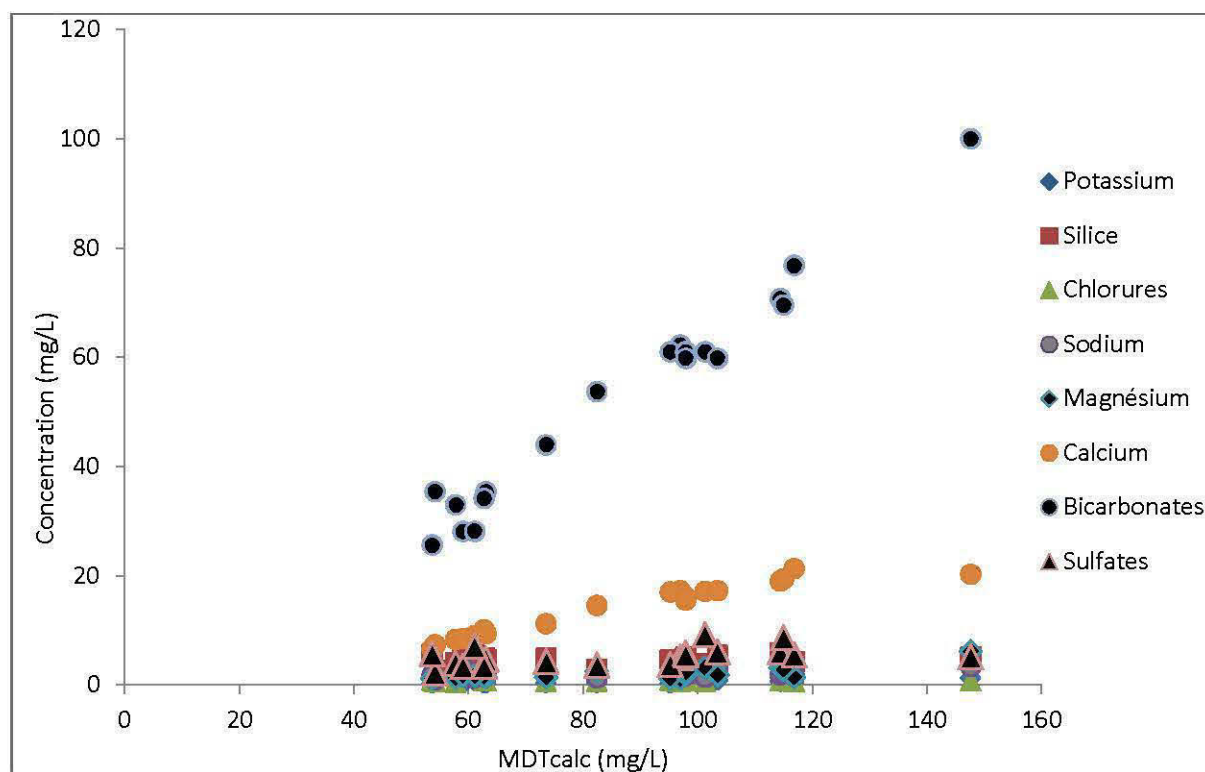


Figure 5.12: Graphique du K, Si, Cl, Na, Mg, Ca, HCO_3^- et SO_4^{2-} (en mg/L) en fonction de la matière dissoute totale calculée des 21 sources en 2009.

La figure 5.11 montre un lien entre l'augmentation des concentrations en Ca^{2+} et le pH, et la figure 5.12 montre l'augmentation des concentrations en Ca^{2+} et en HCO_3^- en fonction de la matière dissoute totale calculée. Le graphique du Ca^{2+} en fonction des HCO_3^- (en mmol/L) montre une relation linéaire ($r^2 = 0.96$) avec une augmentation de la concentration du Ca^{2+} et HCO_3^- (figure 5.13). La valeur moyenne des précipitations, calculée à partir des données d'un site d'échantillonnage sur l'esker Saint-Mathieu-Berry (tableau 5.4) est présentée sur la figure 5.13.

La valeur moyenne des précipitations pour la région s'aligne avec la droite de régression des échantillons d'eaux de sources (figure 5.13). Cette relation est une indication que des processus d'interaction eau-minéraux sont impliqués dans l'évolution de l'eau à partir de la recharge dans l'esker jusqu'à la résurgence au niveau des sources. Ces processus d'interaction eau-minéraux sont responsables des valeurs plus élevées en Ca^{2+} et HCO_3^- mesurées dans les échantillons des sources (figure 5.12), ainsi que de l'augmentation du pH (tableau 5.4 et figure 5.11).

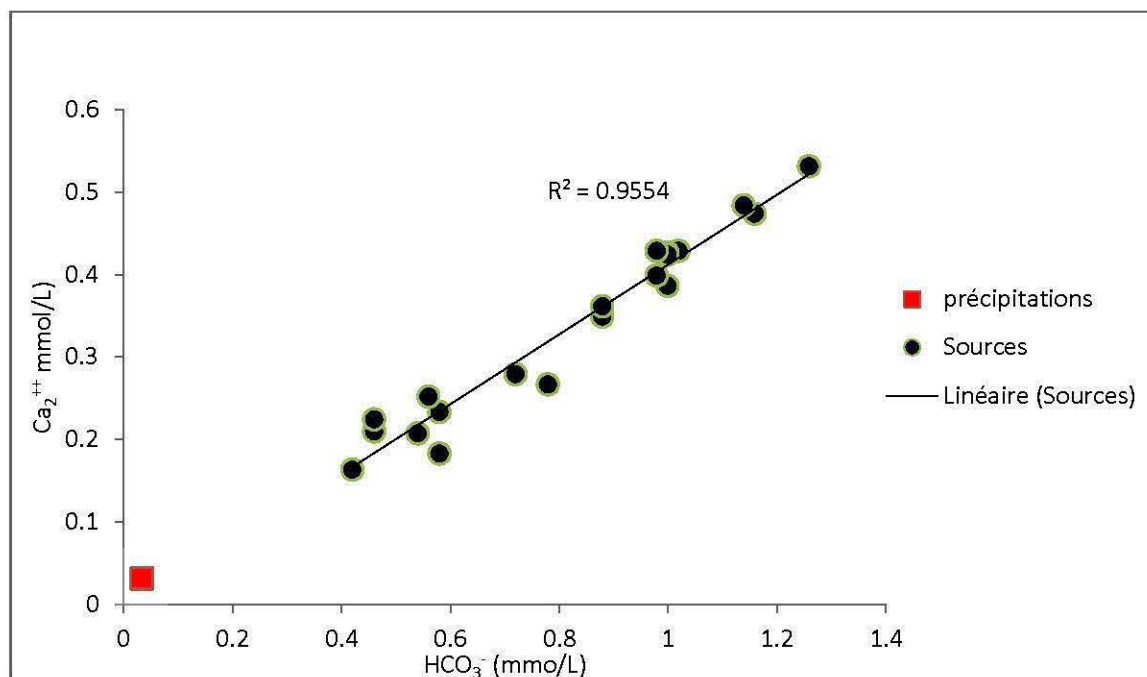


Figure 5.13: Graphique du Ca^{2+} en fonction du HCO_3^- (en mmol/L).

Tableau 5.4: Composition des précipitations d'une station de mesure à Amos (mg/L).

Précipitations Amos	
pH	4.71
Ca	0.59
Mg	0.59
Na	0.23
K	0.3
Cl	0.32
SO ₄	1.48
HCO ₃	0.98
Si (SiO ₂)	0.09
MDT	3.94

Le pH mesuré dans les précipitations recueillies à la station Amos est de 4,71. L'eau s'infiltré dans le sol et réagit avec le matériel géologique de l'esker. Une partie de cette acidité est neutralisée, et certaines réactions chimiques provoquent des augmentations de pH. Le pH mesuré dans l'eau des sources varie de 5,92 à 8,46 avec une moyenne de 7,32 (tableau 5.3). Les concentrations en ions majeurs calcium (Ca), magnésium (Mg), sodium (Na), potassium (K), chlorure (Cl), sulfates (SO₄) mesurés dans les échantillons de sources proviennent de l'interaction avec les minéraux. Les valeurs de chlorures, proches des valeurs des chlorures des précipitations, indiquent une origine atmosphérique. Le silicium, avec des valeurs variant de 2,66 à 5,87 mg/L, aurait une origine géologique. Cette augmentation de concentration proviendrait de la dissolution de minéraux présents dans les sédiments des eskers. En ce qui concerne la matière dissoute totale, on peut remarquer qu'il y a un facteur 10 entre les valeurs de teneur en sels minéraux dans les précipitations et les valeurs moyennes des sources. L'eau circule et dissout des minéraux, ceux-ci contribuant ainsi à l'évolution de l'eau. Cette évolution est aussi contrôlée par d'autres facteurs comme la vitesse d'écoulement et le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.

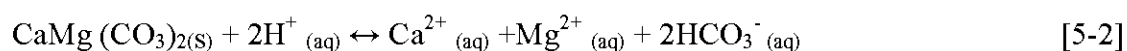
Pour déterminer les phases minéralogiques impliquées dans les processus d'interaction eau-minéraux qui contribuent à l'évolution de l'eau, des analyses par diffraction des rayons X de deux échantillons des sédiments de l'esker Saint-Mathieu-Berry sont présentées au tableau 5.5. L'albite et le quartz sont les deux minéraux présents en plus grande quantité dans les échantillons analysés (tableau 5.5). On trouve également la muscovite, l'actinolite, la chlorite, le rutil et la dolomite. D'autres minéraux ont été mis en évidence comme la magnétite, la pyrite, la marcasite,

la chalcopryrite, l'ilménite et la sphalérite. L'examen microscopique a révélé un grand nombre de grains blanc vitreux à mat pouvant être des silicates comme des feldspaths.

Tableau 5.5: Composition chimique des principaux minéraux présents dans des échantillons prélevés dans une partie de l'esker Saint-Mathieu-Berry.

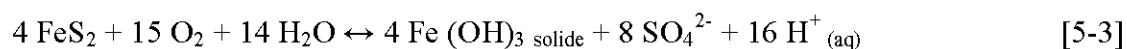
Nom	Formule chimique	Quantification	
		Esker 1 (%poids)	Esker 2 (%poids)
Quartz	SiO_2	41.30	25.81
Chlorite	$(\text{Fe,Mg,Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	2.01	3.55
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	41.19	44.54
Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	8.16	10.53
Actinolite	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	4.38	9.20
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	1.33	1.92
Rutile	TiO_2	1.54	1.91
Pyrite	FeS_2	/	0.67
Cpy	CuFeS_2	/	0.23
Sph Fe	ZnS	/	0.15
Magnétite	Fe_3O_4	/	0.88
Marcasite	FeS_2	/	0.43
Ilménite	FeTiO_3	/	0.18

La présence de dolomite peut expliquer en partie la présence et la relation entre le Ca^{2+} et HCO_3^- observée dans les échantillons des sources. La dolomite se dissout en libérant des carbonates suivant l'équation [5.1] et réagit en présence de (H^+) voir [5.2].



L'apport de proton pouvant se faire par les précipitations acides faisant diminuer le pH des eaux souterraines, mais aussi par l'oxydation de la pyrite présente dans l'esker.

La réaction d'oxydation de la pyrite peut être résumée par l'équation suivante:



Étant donné la présence de minéraux silicatés dans les échantillons analysés, on peut penser qu'il n'y pas seulement que la dissolution des carbonates qui s'effectue mais que d'autres processus géochimiques peuvent aussi interagir dans le milieu notamment lors de l'altération des silicates.

La figure 5.14 présente la dureté totale (en mg/L CaCO_3 , calculée à partir des concentrations en Ca et Mg) en fonction de la matière dissoute totale calculée (mg/L). Les échantillons sont représentés par esker afin d'évaluer la variation spatiale de la géochimie de l'eau des sources. La relation entre la dureté et la matière dissoute totale calculée est constante sur le territoire, mais les échantillons associés à la Moraine d'Harricana (MH) dominent pour des valeurs de dureté supérieure à 45 mg/L et de matière dissoute totale calculée supérieure à 90 mg/L, alors que les échantillons des autres eskers, dont ceux associés à l'esker Saint-Mathieu-Berry (SMB), ont des valeurs plus faibles.

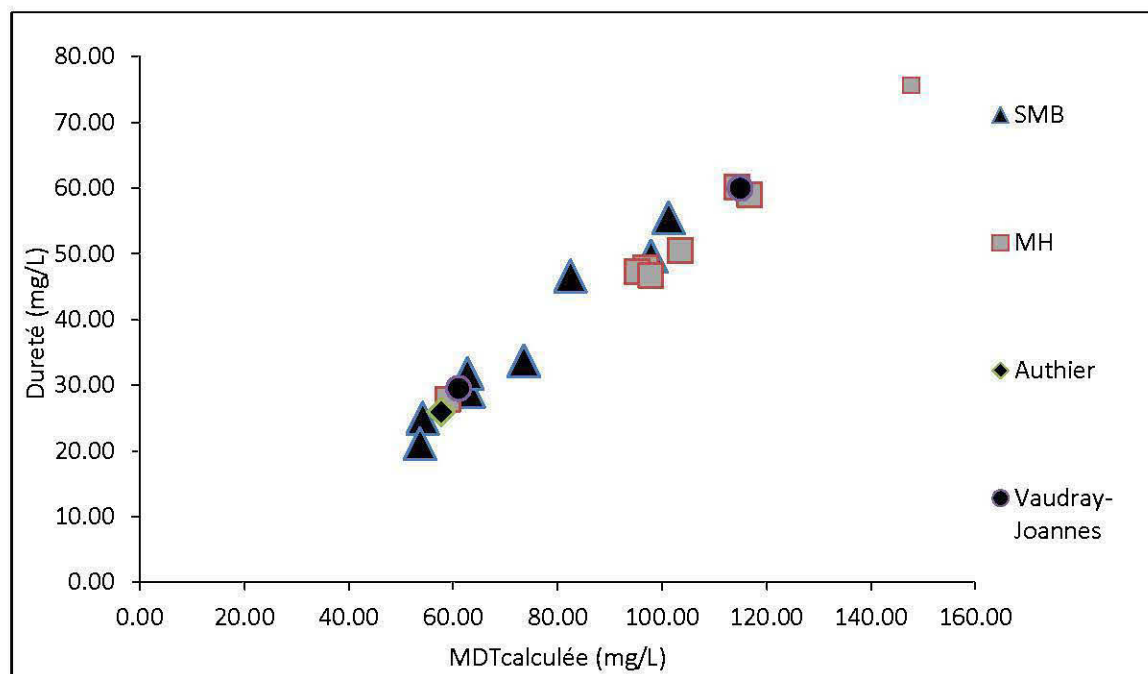


Figure 5.14: Graphique de la dureté calculée en fonction de la MDT calculée (en mg/L).

Le tableau 5.6 présente les statistiques descriptives de paramètres pour comparer les sites associés à l'esker Saint-Mathieu-Berry (SMB) et ceux de la Moraine d'Harricana (MH). Les valeurs moyennes des paramètres Ca, Cl, Na, alcalinité, pH, MDT, Si et Fe sont légèrement plus élevés aux sites associés à la Moraine d'Harricana par rapport à ceux de l'esker Saint-Mathieu-Berry, alors que les concentrations moyennes du Mg et SO₄ sont légèrement plus élevées aux sites de l'esker Saint-Mathieu-Berry.

Tableau 5.6: Statistiques descriptives de paramètres chimiques pour l'esker Saint-Mathieu-Berry (SMB) et la Moraine Harricana (MH) pour l'année 2009 (en mg/L).

#	N	Ca				Cl				Mg			
		Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type
SMB	10	12.5	6.6	19.0	4.2	0.7	0.6	0.8	0.1	2.1	1.1	3.1	0.8
MH	7	15.3	8.4	21.3	4.4	1.5	0.6	3.5	1.3	1.4	0.9	1.9	0.4

#	N	Na				K				SO ₄			
		Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type
SMB	10	1.6	0.9	2.0	0.3	0.4	0.3	0.9	0.2	5.29	2.20	9.20	2.17
MH	7	2.0	1.1	3.3	0.8	0.5	0.3	0.8	0.2	4.7	3.3	6.0	1.2

#	N	Alcalinité				pH				MDTcalculée			
		Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type
SMB	10	39	21	58	12	7.18	5.92	8.45	0.89	79.45	53.69	114.45	21.27
MH	7	46	23	63	12	7.67	6.64	8.46	0.64	94.9	59.1	116.9	19.3

#	N	Si				Conductivité				Fe diss			
		Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type	Moy	Min	Max	Écart-type
SMB	10	4.4	2.7	5.9	1.1	0.087	0.050	0.114	0.025	0.0605	0.015	0.19	0.04681
MH	7	4.5	3.4	5.4	0.7	0.101	0.069	0.127	0.021	0.1529	0.05	0.58	0.2012

#	N	Sr			
		Moy	Min	Max	Écart-type
SMB	10	0.0258	0.01	0.04	0.0096
MH	7	0.03	0.02	0.04	0.0082

5.2 Suivi temporel

Parmi les 24 sites échantillonnés en juillet et août 2009, neuf sites ont été sélectionnés pour réaliser un suivi temporel afin d'évaluer si la géochimie de l'eau des sources varie durant l'année. Les critères suivants ont été utilisés pour la sélection des sites : l'importance du débit de la source, la localisation sur l'esker ou la moraine, l'accessibilité du site pour y faire des mesures de débit et des relevés d'arpentage, l'intermittence ou non de la source si ce paramètre était connu au moment de la vérification des données, et les données existantes sur le site. La localisation des sites sélectionnés (ABTE 3469, ABTE 3475, ABTE 3465, ABTE 3490, ABTE 3488, ABTE 3467, ABTE 3478, ABTE 3479, ABTE 3483) est présentée sur la carte de la figure 5.15. Le tableau 5.7 présente les caractéristiques des sources sélectionnées pour le suivi temporel.

Tableau 5.7: Sources sélectionnées pour le suivi temporel.

Site ID	Nom de la source	Eskers
ABTE 3469	Berry	Saint-Mathieu-Berry
ABTE 3475	Authier	Esker Authier
ABTE 3465	Amos	Saint-Mathieu-Berry
ABTE 3490	Eska-Crep	Saint-Mathieu-Berry
ABTE 3488	Matagami	Moraine Harricana
ABTE 3467	Landrienne	Moraine Harricana
ABTE 3478	Barraute-pisciculture	Moraine Harricana
ABTE 3479	Barraute-Bucolique	Moraine Harricana
ABTE 3483	Kachou	Moraine Harricana

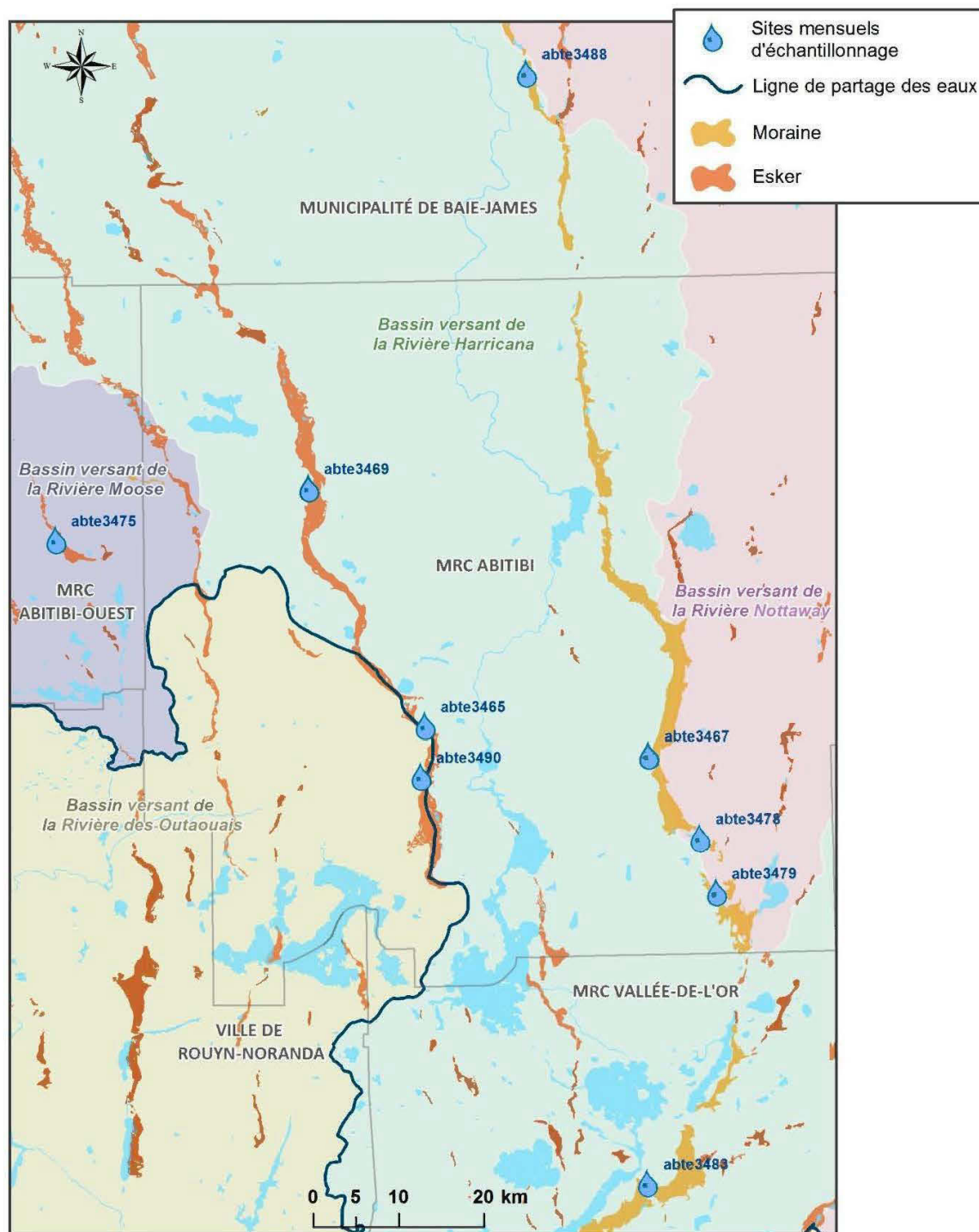


Figure 5.15: Localisation des 9 sites sectionnés pour le suivi temporel (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Le suivi temporel comporte une séquence de 9 échantillons qui couvre la période de 2009 à 2011, soit un échantillon en juillet ou août 2009, quatre échantillons en 2010 (juillet, août, septembre, octobre), et quatre échantillons en 2011 (mai, juin, juillet, septembre). Pour le site ABTE 3469, la séquence commence en 2010, pour un total de 8 échantillons. Les diagrammes des figures 5.16 à 5.24 présentent les concentrations en Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, Fe, et Si, pour les neuf sites en fonction du temps. Les échantillons analysés pour la silice au cours du mois de juin 2011 ont un résultat sous la limite de détection (figures 5.16-5.23) sauf pour la source ABTE 3483 (figure 5.24). Bien que le laboratoire n'ait pas rapporté de problème d'instrumentation lors de l'analyse et que rien n'indique sur les rapports d'analyse qu'il aurait pu y avoir une autre cause d'erreur, ces résultats ne sont pas considérés comme étant valables et ne sont pas considérés dans l'analyse .

Pour les ABTE 3469, ABTE 3475, ABTE 3465, ABTE 3490, ABTE 3488, ABTE 3467, ABTE 3478, ABTE 3479, ABTE 3483, on distingue sur les figures (5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24) qu'il y a une variabilité du calcium. Cette variabilité peut être une indication que les sources sont influencées par la recharge saisonnière.

Le site ABTE 3488 présentant plus de variabilités pour le Na et le Cl que les autres sites à l'étude du fait des contaminations anthropiques.

ABTE 3469

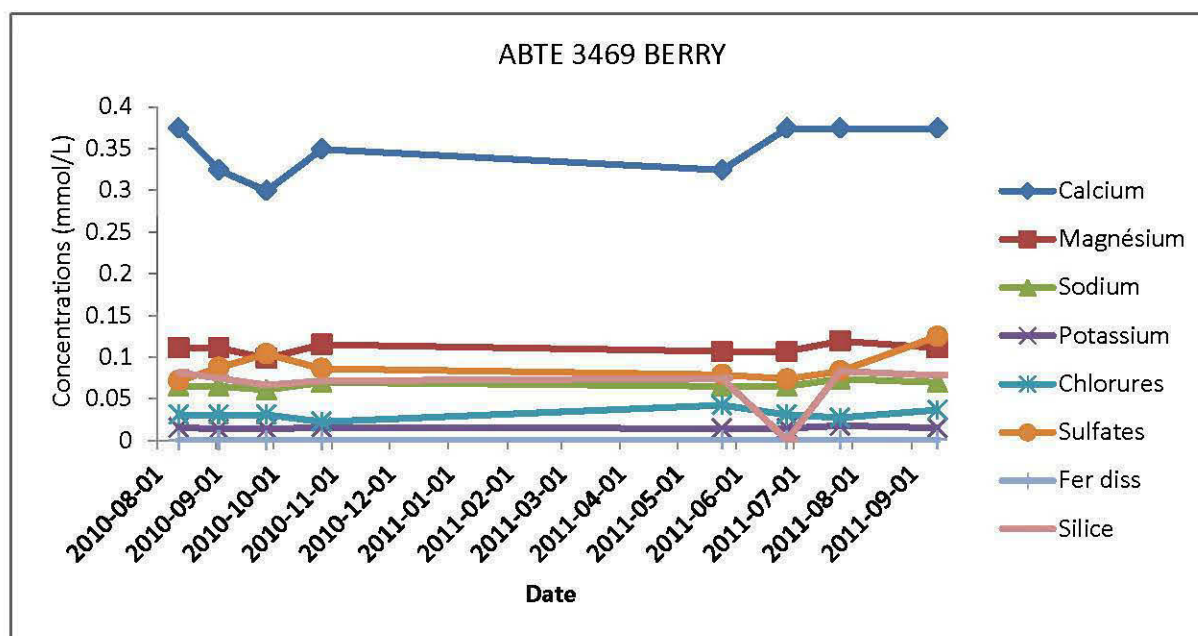


Figure 5.16: Suivi temporel pour le site ABTE 3469, Esker Saint-Mathieu-Berry, source Berry.

ABTE 3475

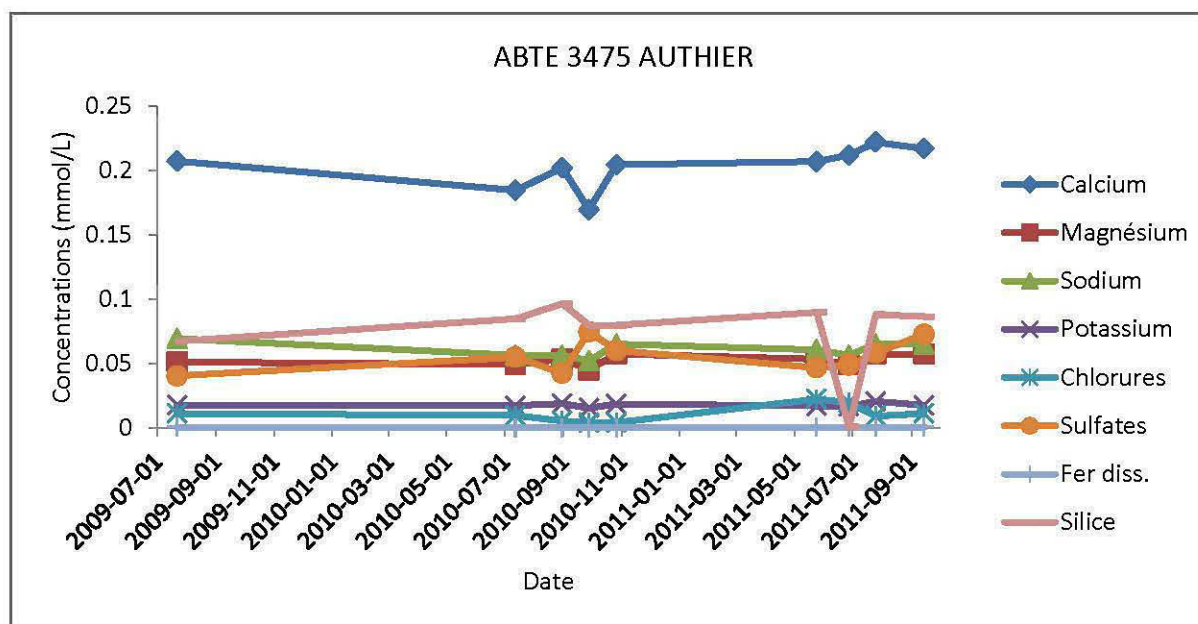


Figure 5.17: Suivi temporel pour le site ABTE 3475 Esker Authier, source Authier.

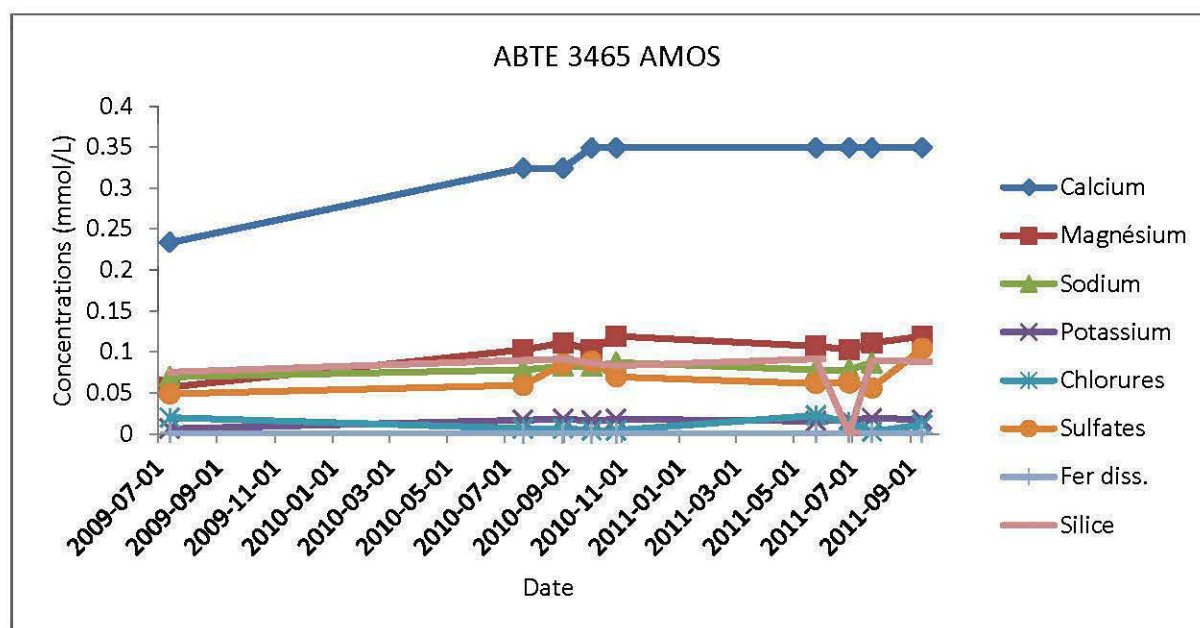
ABTE 3465

Figure 5.18: Suivi temporel pour le site ABTE 3465, Esker Saint-Mathieu-Berry, source Amos.

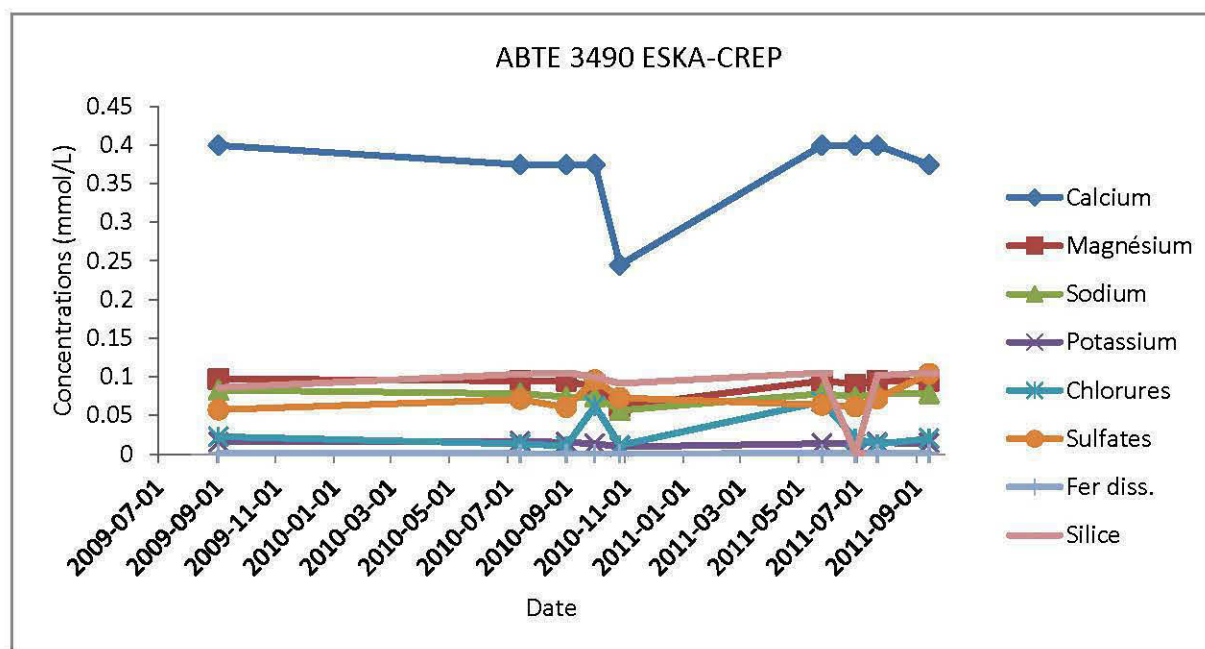
ABTE 3490

Figure 5.19: Suivi temporel pour le site ABTE 3490, Esker Saint-Mathieu-Berry, source Eska-Crep.

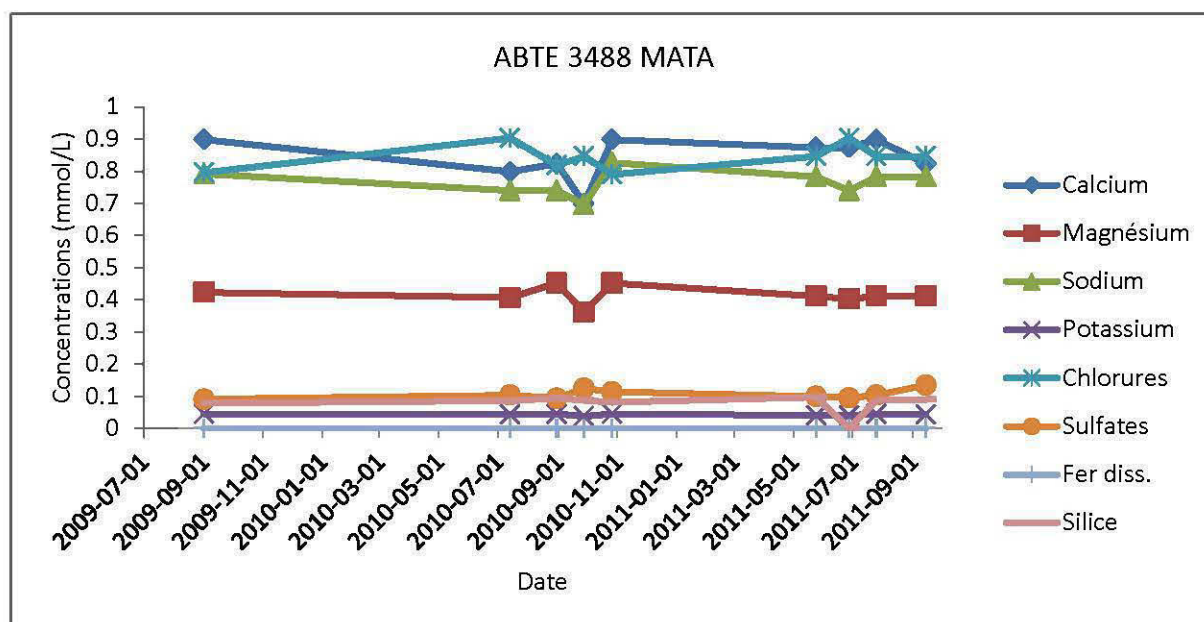
ABTE 3488

Figure 5.20: Suivi temporel pour le site ABTE 3488, moraine Harricana, source Matagami.

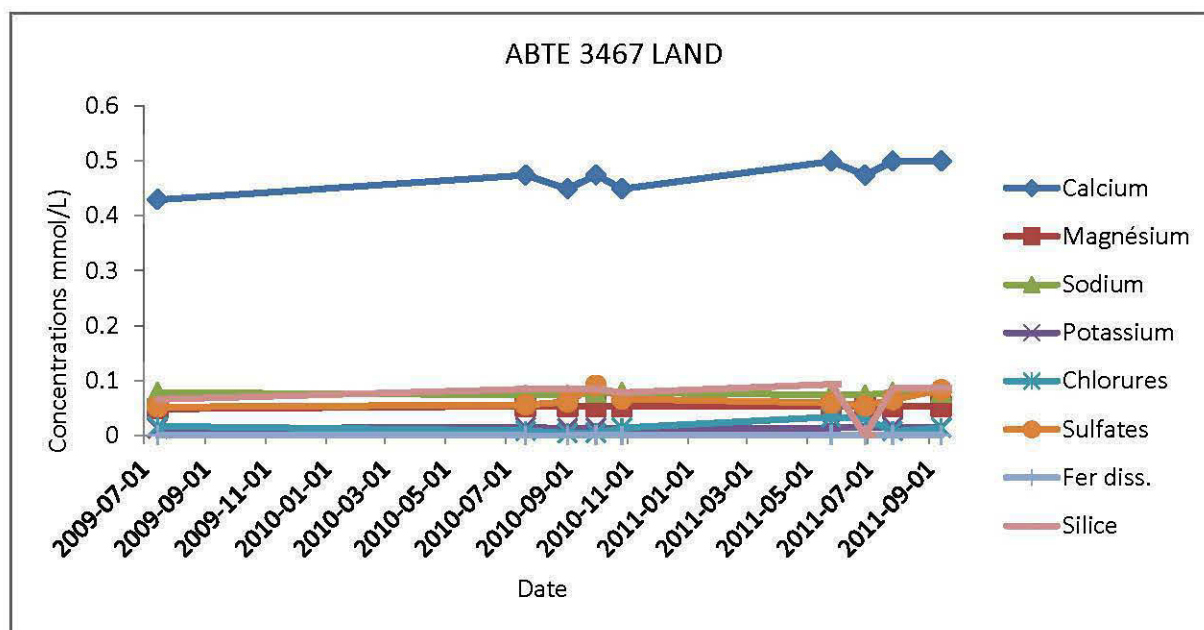
ABTE 3467

Figure 5.21: Suivi temporel pour le site ABTE3467, moraine Harricana, source Landrienne.

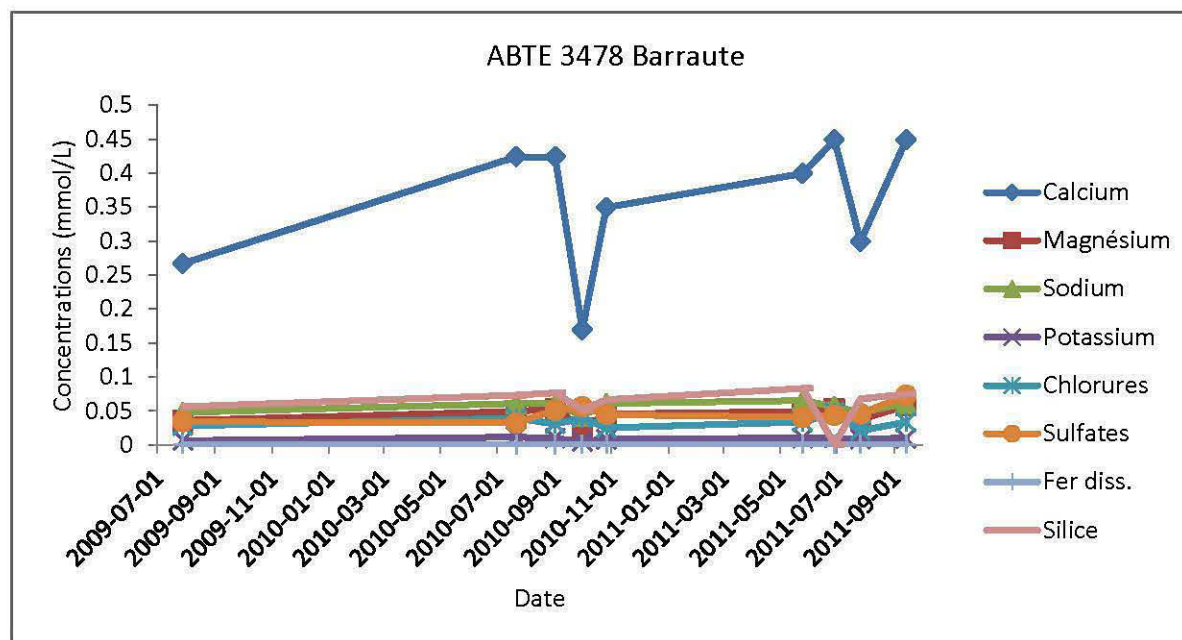
ABTE 3478

Figure 5.22: Suivi temporel pour le site ABTE 3478 Moraine Harricana, source Barraute pisciculture.

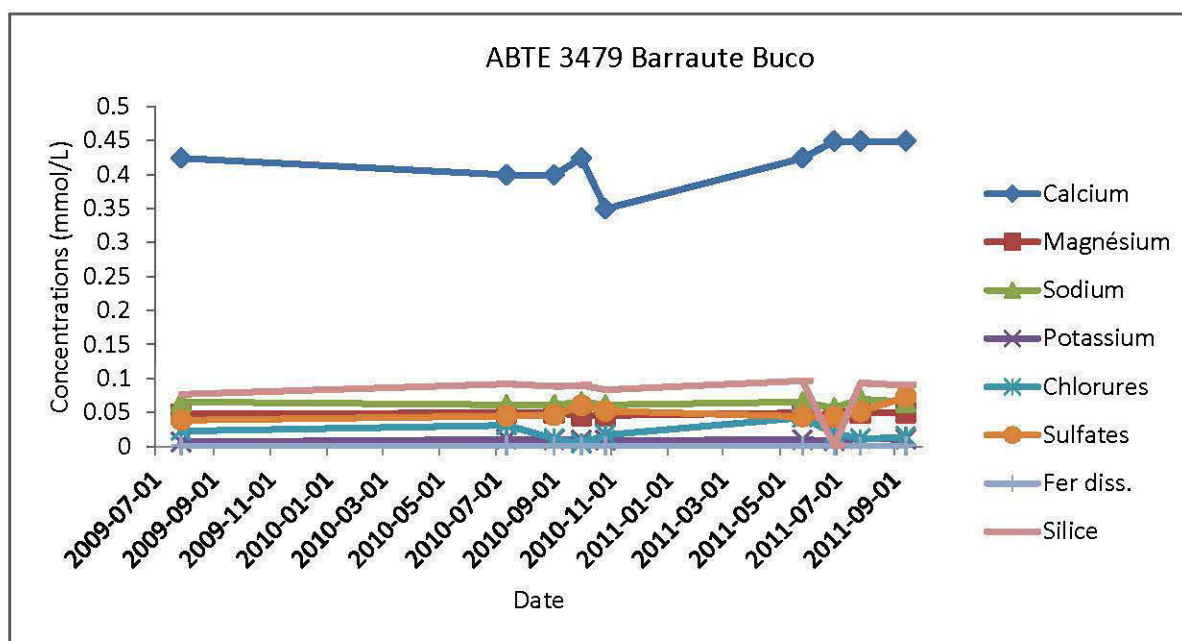
ABTE 3479

Figure 5.23: Suivi temporel pour le site ABTE 3479 moraine Harricana, source Barraute Buco.

ABTE 3483

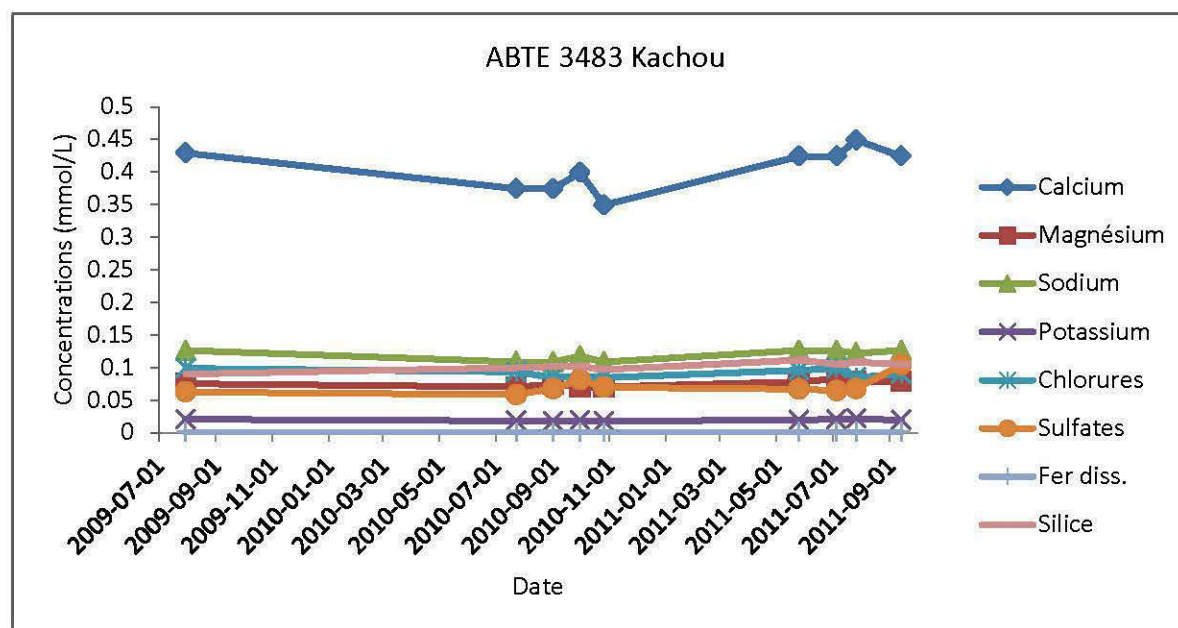


Figure 5.24: Suivi temporel pour le site ABTE 3483 moraine Harricana, source Kachou.

5.3 Isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$

Les isotopes stables sont des éléments naturels qui ne sont pas radioactifs. Un isotope possède un même nombre de neutron, mais une masse atomique différente l'une de l'autre comme par exemple l'oxygène 16 et l'oxygène 18. Les rapports d'isotopes stables peuvent varier sous l'influence de processus chimiques ou biologiques, un phénomène appelé le fractionnement isotopique. Les résultats sont exprimés avec la notation δ (‰) (Clark et Fritz, 1997). Les isotopes stables de l'eau, l'oxygène-18 et le deutérium ^2H , peuvent être utilisés comme indicateurs de l'origine de l'eau souterraine mais aussi comme un outil pour identifier l'eau souterraine rechargée sous les climats froids et quantifier des processus physiques comme l'évaporation (Simpkins, 1995). Pour cette étude, les échantillons d'isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ ont été analysés au Laboratoire d'analyses des isotopes stables légers du Centre GEOTOP-UQAM-McGill.

5.3.1 Caractérisation isotopique des précipitations

Les applications des ratios d'isotopes stables d'hydrogène et d'oxygène dans l'eau souterraine sont basées sur la variation isotopique dans les précipitations. Ils produisent une signature isotopique unique et mesurable de l'eau souterraine qui s'infiltre (Stevens et Meretsky, 2008). Il existe une relation linéaire entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les précipitations pour une région donnée. La concentration en isotopes stables va varier essentiellement en fonction de paramètres comme la distance à un océan, et en fonction de l'altitude et de la latitude. Dans le cas des eaux de précipitations, Craig (1961) a défini une relation linéaire, la droite des eaux météoriques globale (DEMG), qui s'exprime de la façon suivante : $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$. Cette relation a été établie à partir de données recueillies à travers le monde.

La caractérisation isotopique consiste en la collecte des précipitations mensuelles (pluie et neige) dans le but de réaliser une droite locale des eaux météoritiques. La droite des eaux météoriques pour la région d'étude, la droite des eaux météorique d'Amos (DEMA), a été tracée à partir de la régression linéaire des résultats d'isotopes stables d'échantillons recueillis au cours de 2 années consécutives, soit 2010 et 2011 (figure 5.25). La station d'échantillonnage est située à Amos. La moyenne annuelle des précipitations, calculée pour les données de 2010, donne une valeur de -13.66‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et -96.54‰ pour $\delta^2\text{H}$.

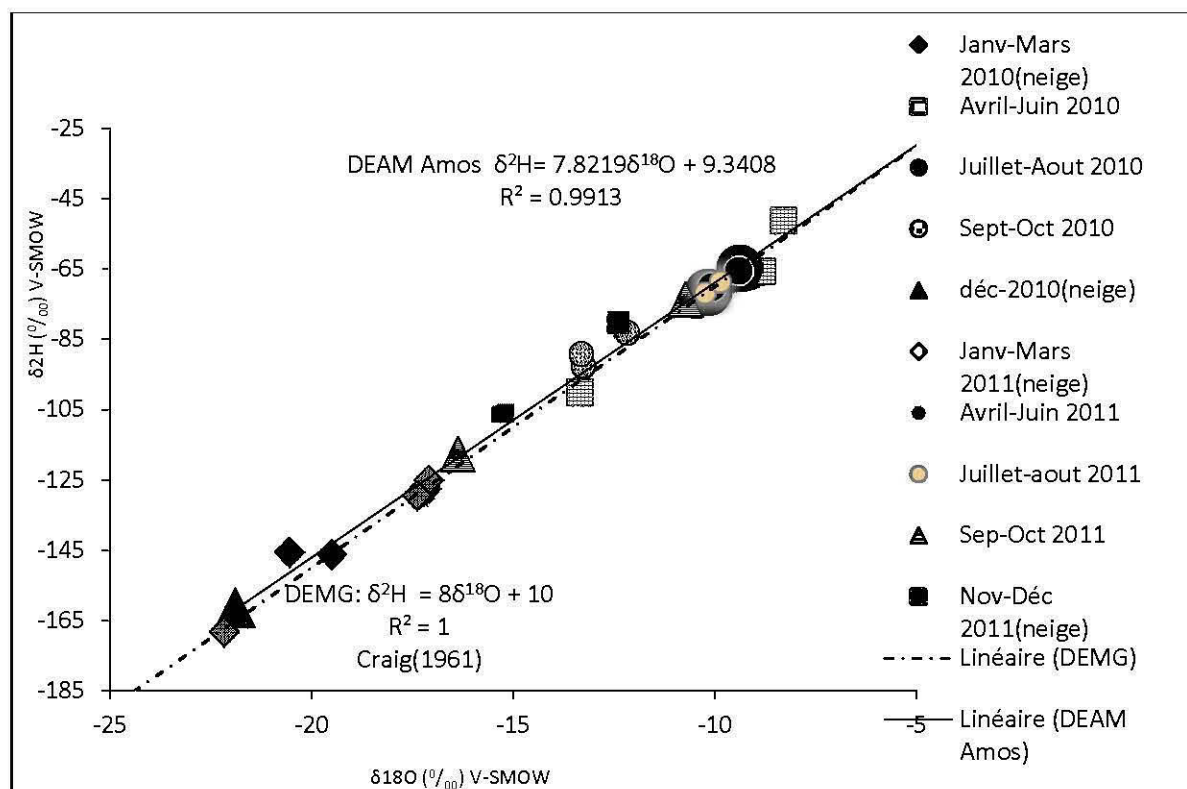


Figure 5.25: Droite des Eaux Météoriques d'Amos (DEMA), 2010-2011.

5.3.2 Caractérisation isotopique des sources

La figure 5.26 présente le graphique des analyses isotopiques pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des 24 sources échantillonnées de juillet à septembre 2009. La majorité des échantillons sont regroupés autour de la DEMA, près de la moyenne annuelle des précipitations calculée pour 2010, indiquant une origine météorique. Un site présente une valeur enrichie par rapport à la moyenne annuelle, soit le site ABTE3481 avec un $\delta^{18}\text{O}$ de -9.67‰. Ce site est une petite source (tableau 5.1) et la valeur en $\delta^{18}\text{O}$ pourrait être représentative des précipitations printanières. La carte de la figure 5.27 présente la distribution des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des 24 sources échantillonnées en 2009. À l'exception du site ABTE3481, une source possiblement influencée par les précipitations printanières, les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ varient de -13.33‰ à -14.30‰. L'ensemble des données pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ sont présentées à l'annexe 4.

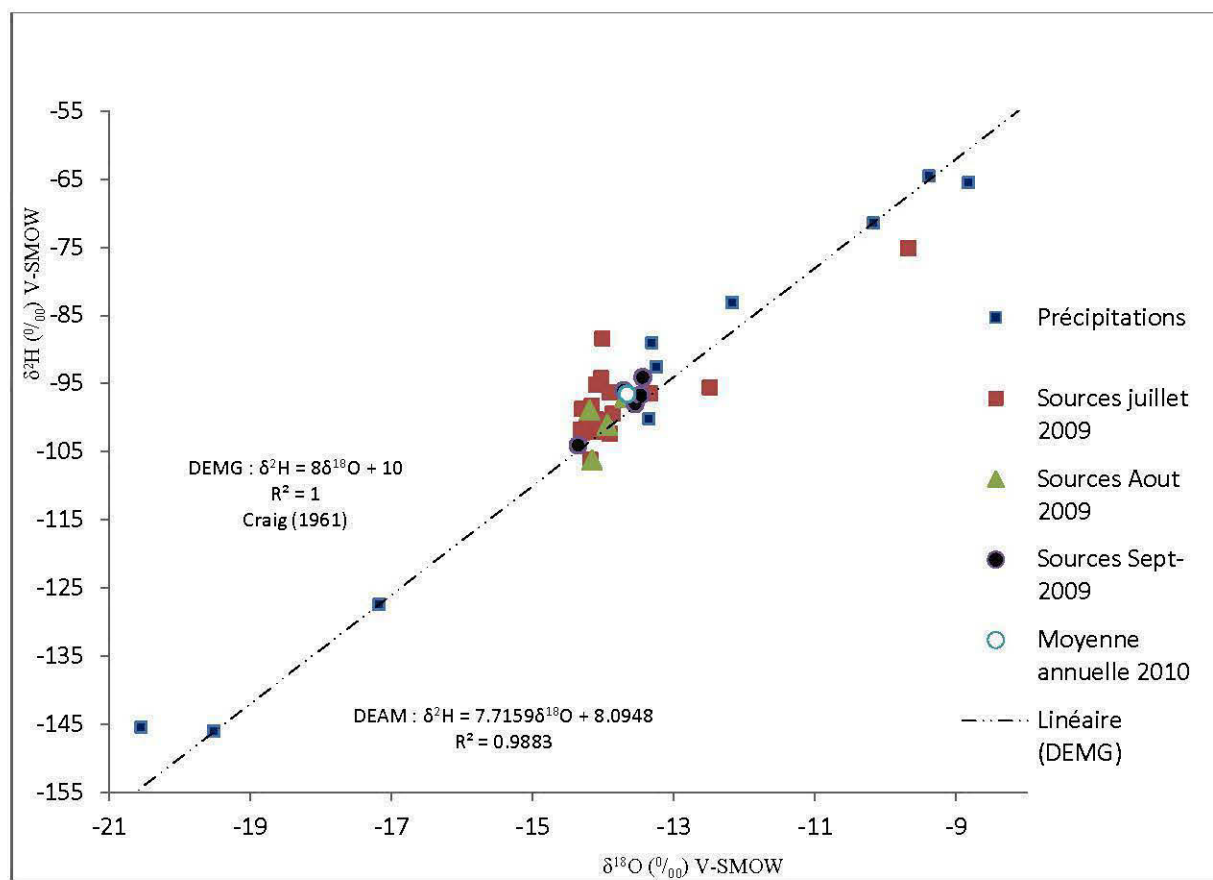


Figure 5.26: Graphique des isotopes stables des sources échantillonnées en 2009 et lien avec la DEMA.



Figure 5.27: Distribution régionale de $\delta^{18}\text{O}$ en 2009 (juillet-septembre) (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Un suivi temporel a été réalisé en 2010 sur les neuf sites (figure 5.15) afin de vérifier s'il y avait une variation des isotopes stables dans l'eau des sources. Pour la période de juillet à octobre 2010, les résultats sont regroupés autour de la DEMA et près de la moyenne annuelle (figure 5.28). Ces résultats confirment l'origine météorique des eaux des sources. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ présentées au tableau 5.8 montrent que les données sont constantes pour la période échantillonnée. Cette stabilité des isotopes stables dans le temps, avec des valeurs près de la moyenne annuelle, indique que les processus de recharge et de circulation de l'eau souterraine dans l'aquifère permettent le mélange des recharges printanières et automnales.

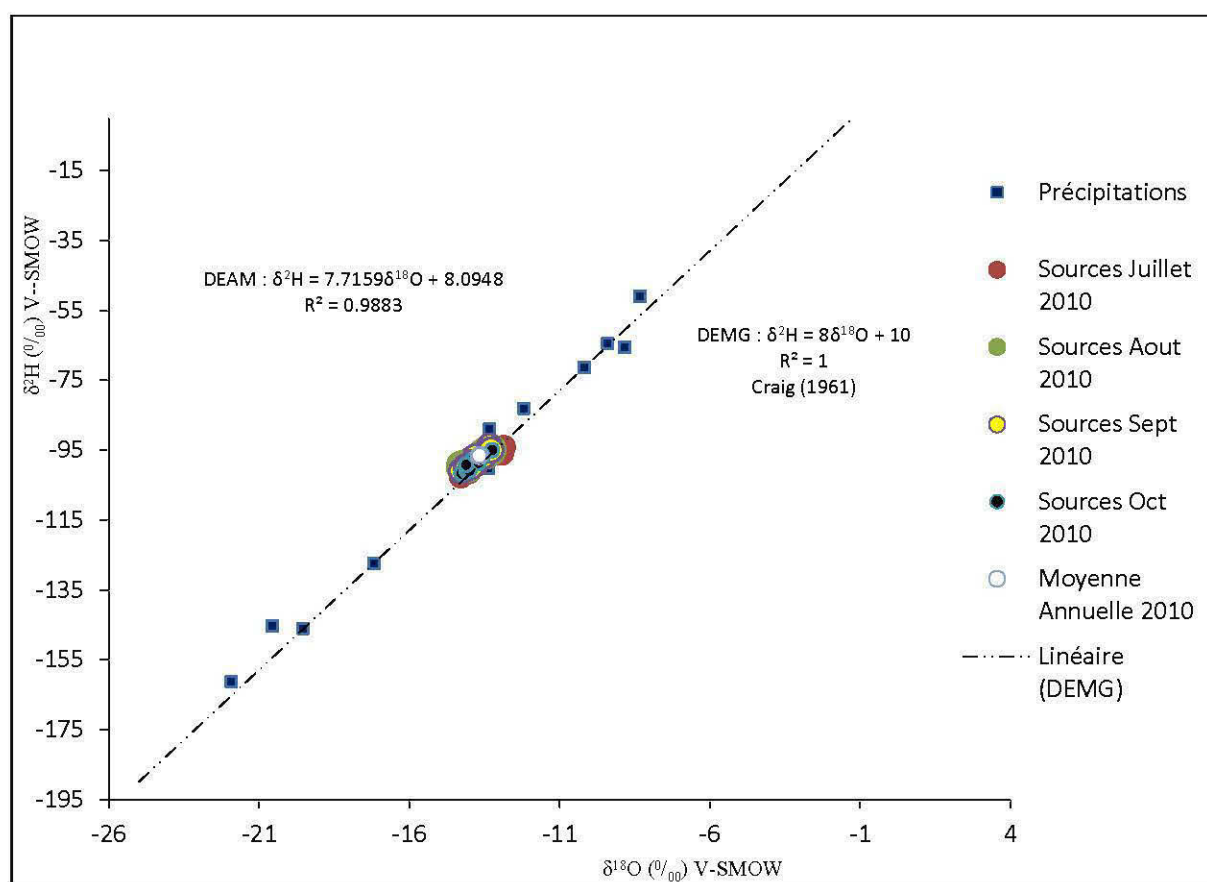


Figure 5.28: Graphique des isotopes stables des sites de suivi temporel échantillonnés en 2010 et lien avec la DEMA.

Tableau 5.8: $\delta^{18}\text{O}$ (‰) des sources sélectionnées pour le suivi temporel (juillet-octobre 2010).

Site ID	Juillet	Août	Septembre	Octobre
ABTE 3469	/	-14,07	-14,10	-14,00
ABTE 3475	-14,02	-14,24	-14,24	-14,07
ABTE 3465	-14,26	-14,28	-14,08	-14,26
ABTE 3490	-13,25	-13,29	-13,26	-13,23
ABTE 3488	-13,48	-13,49	-13,51	-13,54
ABTE 3467	-13,97	-13,95	-13,88	-13,69
ABTE 3478	-13,76	-13,85	-13,32	-13,87
ABTE 3479	-13,77	-13,78	-13,77	-13,76
ABTE 3483	-14,11	/	-13,91	-14,10

La source d'Amos (ABTE3465) a été échantillonnée pour les isotopes stables en 2004 par Riverin (2006). En comparant le résultat de Riverin (2006) à ceux de cette étude, on observe une grande stabilité dans le temps pour les valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ (tableau 5.9). Ces valeurs sont aussi près de la moyenne annuelle des précipitations établie à -13.66‰ $\delta^{18}\text{O}$ pour 2010.

Tableau 5.9: Données de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau entre 2004 et 2010 pour source d'Amos (ABTE3465).

Source Amos	2004	2009	2010
($\delta^{18}\text{O}$)	$-14.5 \pm 0.05 \text{‰}$	$-14.3 \pm 0.05 \text{‰}$	$-14.3 \pm 0.05 \text{‰}$

5.4 Isotopes radioactifs et datation de l'eau

5.4.1 Tritium

Le tritium est l'isotope radioactif de l'hydrogène de masse 3 (^3H). Le tritium possède une demi-vie de 12,43 années (Unterweger et al., 1980) et sa teneur s'exprime généralement en unité de tritium (UT). Une unité de tritium correspond à un atome de ^3H pour 10^{18} atomes d'hydrogène soit $0,118 \text{ Bq.kg}^{-1}$ (Clark et Fritz, 1997; Hubert et al., 1996). Le tritium est naturellement produit par l'action des rayons cosmiques sur les composantes atmosphériques, et il est introduit dans le cycle hydrologique par l'atmosphère (Simpkins, 1995).

La quantité de tritium dans les précipitations est régulièrement mesurée par le réseau mondial de stations coordonnée par l'Agence Internationale pour l'Énergie Atomique (AIEA). Les chroniques des teneurs mensuelles en tritium dans les précipitations existent depuis 1953 pour la station d'Ottawa. Disponible sur le réseau de l'AIEA, ceci a permis de tracer la courbe pour la région d'Ottawa, géographiquement la ville la plus proche de la région d'étude (figure 5.29). On observe des fluctuations saisonnières des concentrations en tritium avec des minima rencontrés pendant l'hiver et des maxima au printemps (Clark et Fritz, 1997).

Quelques mesures du tritium ont été réalisées sur les précipitations avant la période nucléaire. Sa concentration dans les précipitations de la région d'Ottawa, sous les latitudes moyennes de l'hémisphère nord était de l'ordre de 15 UT (Eriksson, 1963). C'est à partir des essais nucléaires atmosphériques s'échelonnant de 1951 à 1980 que le tritium a produit un signal d'entrée définissant ainsi l'eau moderne (Clark et Fritz, 1997). On observe sur la figure 5.29 une augmentation marquée de la concentration en tritium dépassant l'activité naturelle vers 1953, ce qui correspond à la période des essais nucléaires. Depuis 1963, les valeurs maximales de la concentration de tritium ont diminué pour se stabiliser vers 1996. Le tritium est ainsi considéré comme un paramètre standard de datation des eaux souterraines modernes.

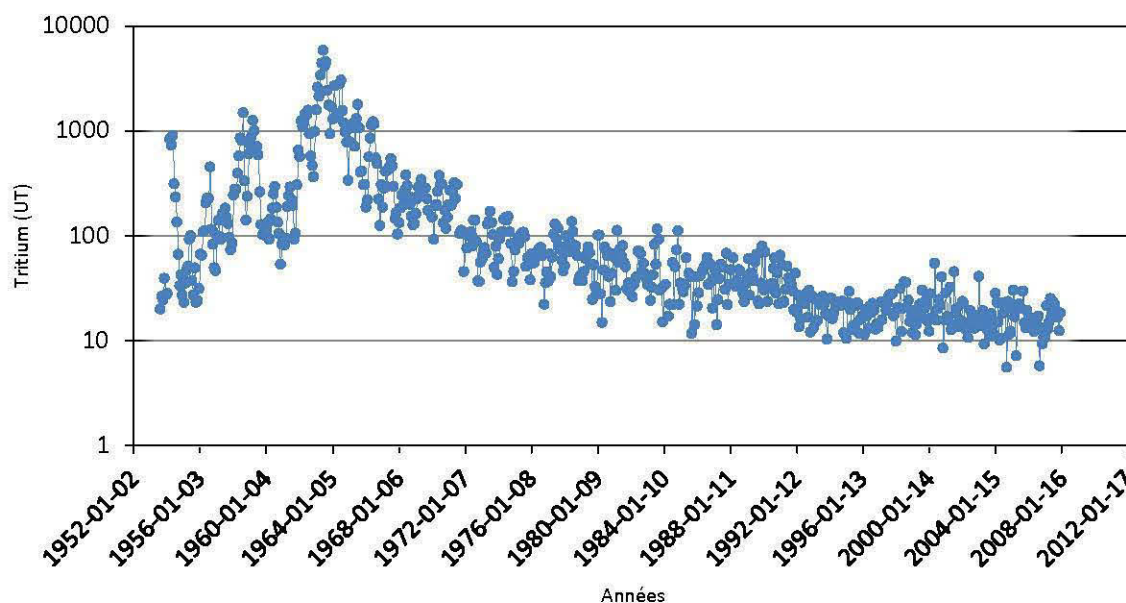


Figure 5.29: Tritium dans les précipitations Ottawa (1953 à 2007) selon les données de l'AIEA (IAEA/WMO, 2012).

Les neuf sources du suivi temporel (figure 5.15) ont été échantillonnées pour le tritium en 2010. La carte à points démontre que les valeurs de tritium varient de 10.6 UT (ABTE3465) à 14.9 UT (ABTE3478) (figure 5.30). L'ensemble des données de tritium est présenté à l'annexe 4.

Une interprétation qualitative des données du tritium, basée sur la présence de celui-ci dans l'eau souterraine, permet la division de l'échantillon en eau moderne et submoderne. Clark et Fritz (1997) ont établi une échelle pour les échantillons prélevés dans les régions continentales afin de qualifier l'eau analysée :

- < 0.8 UT : submoderne, rechargée avant 1952
- de 5 à 15 UT : moderne (< 5 à 10 ans)
- de 15 à 30 UT : tritium des essais nucléaires présent
- > 30 UT : dominées par la recharge de 1960 à 1970

Les neuf sites échantillonnés se retrouvent dans la catégorie de 5 à 15 UT, donc une eau moderne (< 5 à 10 ans).



Figure 5.30: Distribution régionale du tritium en 2010 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

À partir du moment où l'eau s'infiltre dans le sol, elle est soustraite à l'addition du tritium d'origine atmosphérique. À ce moment, la concentration de tritium commence à décroître de manière exponentielle. Il est aussi possible d'utiliser l'équation de désintégration du tritium pour déterminer l'âge de l'eau :

$$a_t \text{ } ^3\text{H} = a_0 \text{ } ^3\text{H} \cdot e^{-\lambda t} \quad [5-4]$$

avec $a_0 \text{ } ^3\text{H}$: concentration initial en tritium (UT)

$a_t \text{ } ^3\text{H}$: concentration dans l'échantillon (UT)

Pour le calcul de l'âge, la valeur au temps zéro, $a_0 \text{ } ^3\text{H}$ a été fixée à la moyenne géométrique des valeurs de tritium servant à tracer la courbe de référence d'Ottawa depuis 1992 à 2007. Cette valeur de $a_0 \text{ } ^3\text{H}$ est de 17,63 UT. À partir de 1992 on remarque moins de variations dans les valeurs de ^3H . On constate que les échantillons ont des âges de l'ordre d'une dizaine d'années, correspondant à l'interprétation qualitative des données de tritium (tableau 5.10).

Tableau 5.10: Âges des échantillons selon leur contenu en tritium calculé directement en utilisant l'équation de désintégration et par graphique (figure 5.31).

ABTE	ID échantillon	Âges * (ans A.A)	Par graphique Juillet 2010 (Figure 5.31)
3465	AMOS-10-001SC Juillet	9.1	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1992 ou 1997 à AA
3475	AUTH-10-001SC Juillet	7.2	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1995 ou 1997 à AA
3479	BARR-10-001SC Juillet	4.8	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1976 ou 1978 à 1992 ou 1997 à 2003 ou 2005 à AA
3478	BARR-10-001-SC Juillet	7.8	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1992 ou 1998 à AA
3469	BERRY-10-006-SC Aout	7.5	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1992 ou 1998 à AA
3490	ESKA-10-001SC Juillet	4.1	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1992 ou 1997 à AA
3488	MATA-10-002SC Juillet	7.7	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1992 ou 1999 à AA
3483	VALD-10-002-SC Juillet	4.4	De 1955 à 1962 ou 1967 à 1971 ou 1973 à 1992 ou 1998 à 2004 ou 2007 à AA
3467	LAND-10-001-SC Juillet	7.0	De 1954 à 1962 ou 1967 à 1995 ou 1997 à AA

* Âges calculés en utilisant directement la formule de désintégration avec $a_0 \text{ } ^3\text{H} = 17,63 \text{ UT}$

Une autre méthode pour évaluer l'âge de l'eau est une méthode graphique qui utilise la courbe du tritium d'Ottawa (figure 5.29). Sur le graphique de la figure 5.31, les sites avec les valeurs minimum de 10.6 UT (ABTE3465) à maximum de 14.9 UT (ABTE3478) ont été représentés. Une courbe a été tracée à partir des deux échantillons en utilisant l'équation de désintégration afin d'établir les périodes possibles de recharge des échantillons.

Pour les deux échantillons, les droites coupent la courbe des précipitations d'Ottawa, permettant de déduire que la recharge s'est faite au minimum en 1953. Le tableau 5.10 présente les périodes de recharge possible des échantillons évaluées à partir de la figure 5.31. L'ensemble des méthodes utilisées pour déterminer l'âge de l'eau des sources indique une eau de quelques dizaines d'années au maximum, c'est à dire une eau moderne.

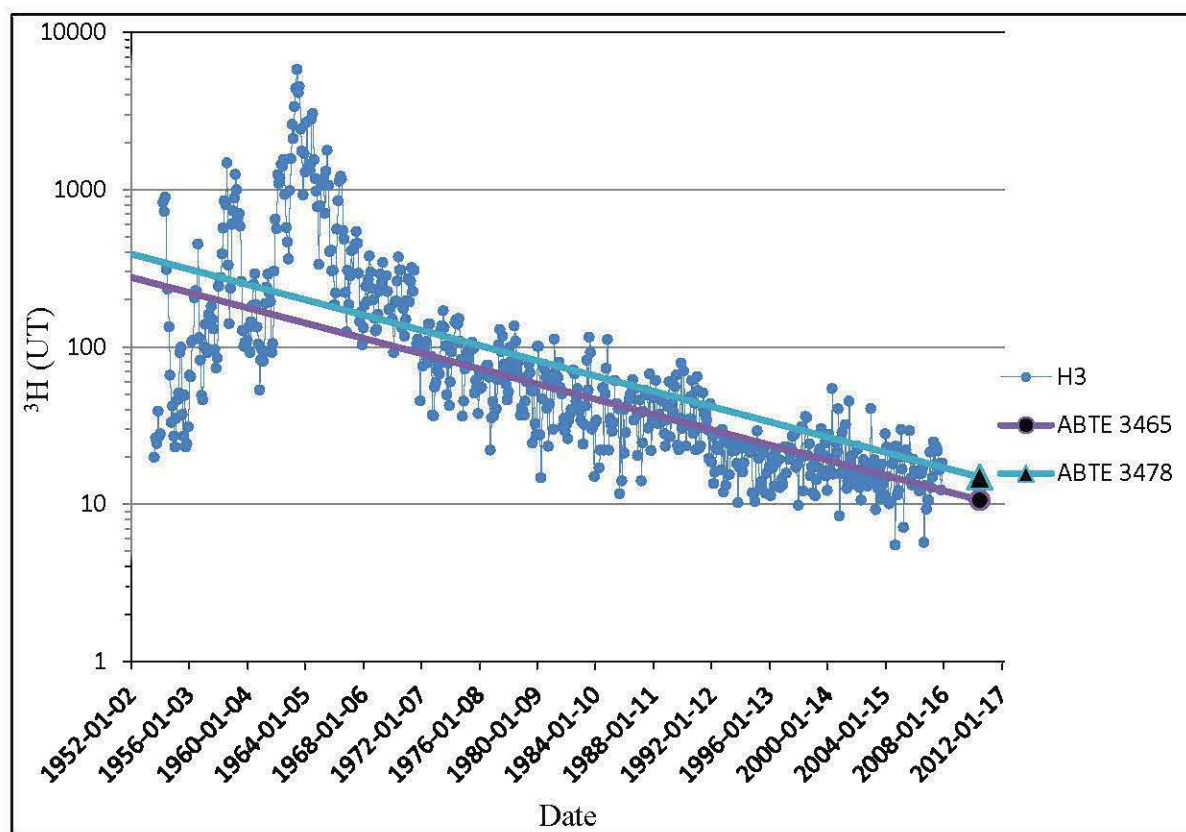


Figure 5.31: Étendues des valeurs ^3H sur le site d'étude (juillet 2010).

5.4.2 Radiocarbone

Le carbone 14 (^{14}C) ou radiocarbone est un isotope radioactif dont la demi-vie est égale à 5730 ± 40 ans. Le carbone 14 est produit dans la haute atmosphère sous l'influence du rayonnement cosmique. Libby et al. (1949) ont découvert qu'il était possible de dater des échantillons géologiques en mesurant leur radioactivité résiduelle (Clark et Fritz, 1997). Le principe de datation du radiocarbone se définit par le moment à partir duquel la quantité de radiocarbone commence à diminuer au cours du temps. Cette diminution se fait de façon exponentielle.

Cette diminution se fait suivant l'équation [5-5] en supposant que le taux de radiocarbone est constant depuis les 50 000 dernières années.

$$a_t = a_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [5-5]$$

On détermine la proportion d'isotope présent dans l'échantillon analysé à l'instant d'aujourd'hui (Clark et Fritz, 1997). L'âge est calculé comme suit dans l'équation [5-6].

$$t = -8267 \ln (a^{14}\text{C}_{\text{DIC}}/a_0^{14}\text{C}) \quad [5-6]$$

avec $a^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$: concentration dans l'échantillon (pmC)

$a_0^{14}\text{C}$: concentration dans l'échantillon à $t = 0$, théoriquement cette valeur est de 100 pmC.

Huit sites du suivi temporel des sources (figure 5.15) ont été échantillonnés pour le radiocarbone en juillet 2010. Les échantillons ont été analysés pour le ^{14}C au National Isotope Centre, Institute of geological and Nuclear Sciences Ltd, Nouvelle-Zélande. Les résultats d'analyses sont exprimés en pourcentage de carbone moderne (pmC). La carte à points montre que les valeurs de ^{14}C varient de 61,12 pmC (ABTE3469) à 86,15 pmC (ABTE3475) (figure 5.32). L'ensemble des données sont présentées à l'annexe 4.



Figure 5.32: Distribution régionale du radiocarbone en juillet 2010 (voir la figure 3.2 pour l'identification des eskers et de la Moraine d'Harricana), (Limites de bassins versants de niveau 1, MDDEP, 2005).

Le calcul se fait sur la base de la désintégration du ^{14}C . Les âges non corrigés, calculés à partir de l'équation [5-6] sont présentés au tableau 5.11. Les âges calculés, qui varient de 1415 ± 20 AA à 3771 ± 20 AA, sont incohérents avec les valeurs modernes de tritium obtenues pour les sites. Les âges non-corrigés sont donc grandement surestimés. Les faibles valeurs de ^{14}C des échantillons de 61,12 pmC à 86,15 pmC, obtenues pour des eaux modernes sur la base du tritium, pourraient être le résultat de réactions géochimiques depuis la recharge, diluant ainsi le radiocarbone dans les échantillons par l'ajout de carbone « mort » exempt de ^{14}C . Cette dilution fait que les échantillons présentent un âge plus vieux qu'il n'est en réalité.

Tableau 5.11: Âges des échantillons appliqués aux différents modèles.

ABTE	Échantillon	Âge non corrigé
3465	AMOS-10-001SC	3771 ± 20 AA
3475	AUTH-10-001SC	1139 ± 20 AA
3479	BARR-10-001SC	3224 ± 20 AA
3478	BARR-10-001-SC	1462 ± 20 AA
3469	BERRY-10-006-SC	3895 ± 20 AA
3490	ESKA-10-001SC	2480 ± 20 AA
3467	LAND-10-001-SC	3030 ± 20 AA
3483	VALD-10-002-SC	1415 ± 20 AA

Pour évaluer la possibilité de la dilution du ^{14}C par du carbone « mort », le graphique de la figure 5.33 présente pour les sites échantillonnés le ^{14}C en fonction du $\delta^{13}\text{C}$. Deux échantillons prélevés dans des piézomètres situés dans la zone de recharge de l'esker Saint-Mathieu-Berry sont aussi présentés sur la graphique pour représenter la valeur à la recharge (ABTE7559 et ABTE7560). Le graphique montre une ligne de dilution entre le pôle de recharge et un pôle plus enrichi en $\delta^{13}\text{C}$, les échantillons des sources se situant le long de cette ligne. Le pôle plus enrichi en $\delta^{13}\text{C}$ pourrait représenter la présence de trace de calcaire dans l'aquifère ($\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$). Les valeurs obtenues en ^{14}C pour les échantillons de sources seraient donc le résultat d'une dilution qui pourrait être causée en partie par l'interaction eau-minéraux, avec la dissolution des carbonates. La variabilité des valeurs de ^{14}C dans les sources peut s'expliquer par une variation du milieu géologique.

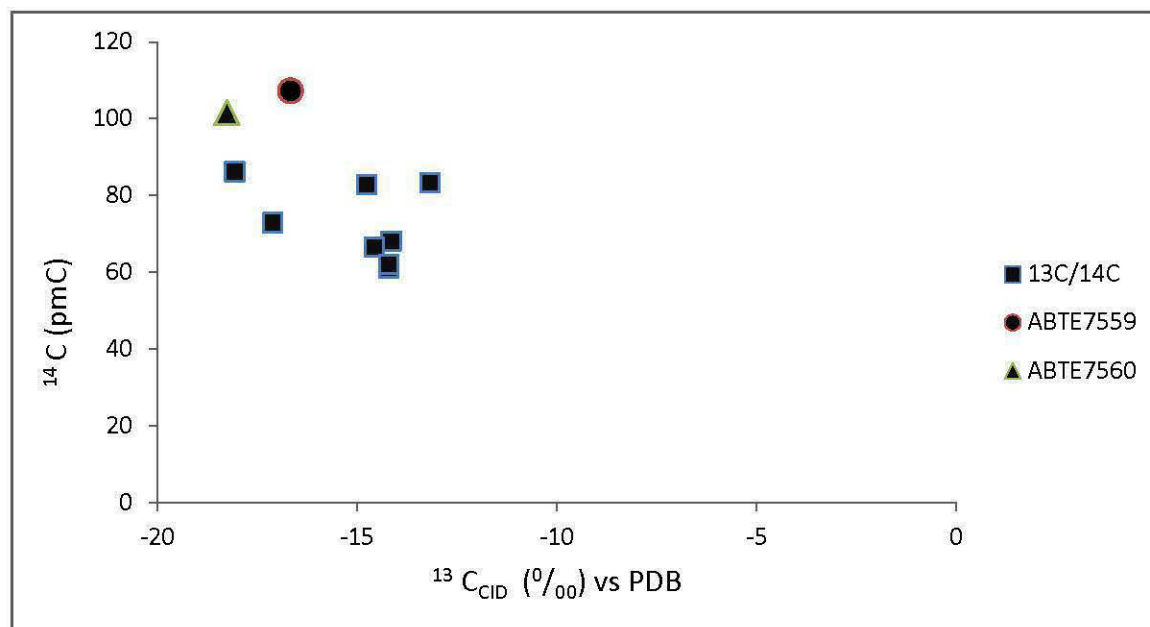


Figure 5.33: Variation du carbone-13 en fonction du carbone-14.

CONCLUSION

Ce mémoire traite de l'hydrogéochimie des sources associées aux eskers de l'Abitibi au Québec. Considérant la vulnérabilité des aquifères présents dans les eskers et que plusieurs municipalités dans la zone d'étude s'approvisionnent en eau souterraine, il est important de connaître la ressource et d'en faire une bonne gestion.

Ces travaux de maîtrise ont permis l'atteinte de l'objectif du projet d'établir un premier portrait régional de la composition chimique des sources de la région. Ces travaux ont aussi permis de réaliser les objectifs spécifiques, soit d'établir le portrait de la qualité de l'eau, d'étudier la variabilité de la géochimie des sources, de réaliser un suivi détaillé des sources les plus importantes pour évaluer la variation géochimique de l'eau annuellement et d'identifier l'origine de l'eau des résurgences et le lien avec les précipitations.

Ce mémoire présente donc de nouveaux résultats d'analyse géochimique et isotopique de l'eau de 24 sources faisant résurgence de six eskers en Abitibi. Les analyses chimiques montrent que la qualité de l'eau des sources est très bonne sur le territoire. Quelques dépassements des normes du Québec et des recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau potable de Santé Canada ont toutefois été identifiés pour des objectifs esthétiques pour l'Al, le Fe, le Mn et le pH.

La distribution d'éléments majeurs (Ca, Mg, Na, Cl, et SO_4) indique que la composition chimique de l'eau des sources est peu variable sur le territoire. Le type d'eau Ca- HCO_3 caractérise l'ensemble des échantillons. La matière dissoute total de l'eau des sources est principalement contrôlée par la présence en solution du calcium et de bicarbonates. Une possible contamination anthropique par l'utilisation de sel déglacant a été identifiée pour trois sources qui présentaient des valeurs de sodium et de chlorures plus élevées.

Des processus d'interaction eau-minéraux sont invoqués pour les valeurs plus élevées en Ca^{2+} et HCO_3^- mesurées dans les échantillons des 21 sources et pour l'augmentation du pH. La chimie des précipitations et la composition minéralogique de l'esker indique que des processus d'interaction avec la dolomite contribuent à l'évolution de l'eau à partir de la recharge dans l'esker jusqu'aux résurgences. Considérant la composition minéralogique de l'esker, les minéraux silicatés doivent être impliqués dans les processus géochimiques de l'altération des silicates et contribuer à l'évolution de l'eau, mais ces processus demeurent à être étudiés. Le suivi temporel de neuf sources durant deux ans a montré une variabilité dans la chimie des sources

pour le calcium, une indication que les sources pourraient être influencées par la recharge saisonnière.

Les analyses isotopiques pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ des 24 sources montrent une origine météorique, la majorité des échantillons étant regroupés autour de la Droite des Eaux Météorique d'Amos, et près de la moyenne annuelle des précipitations calculée pour 2010. Les méthodes d'interprétation des données de tritium ont indiqué que les sources sont caractérisées par une eau moderne, avec des âges de l'ordre d'une dizaine d'années à quelques dizaines d'années. Les âges radiocarbones non corrigés sont grandement surestimés. Le tritium ayant montré des eaux modernes, les faibles valeurs de ^{14}C des échantillons de sources seraient le résultat de réactions géochimiques depuis la recharge, diluant ainsi le radiocarbone dans les échantillons par l'ajout de carbone « mort » exempt de ^{14}C .

L'étude de l'hydrogéochimie des sources apporte des connaissances sur l'évolution de l'eau souterraine depuis la recharge, le temps de résidence, l'influence des conditions géologiques et hydrogéologiques. Elle apporte également des connaissances sur la géochimie de l'eau et permet une évaluation de la qualité régionale de l'eau souterraine et des variations spatio-temporelles.

Pour arriver à une meilleure compréhension de l'évolution de l'eau souterraine dans les systèmes aquifères associés aux eskers de l'Abitibi, quelques recommandations sont à exprimer. Des travaux complémentaires, particulièrement l'intégration de la géochimie de l'eau souterraine des eskers et une caractérisation plus complète de la minéralogie des différents eskers, devraient ainsi être réalisés pour mieux comprendre l'évolution de l'eau souterraine lors de son cheminement dans l'esker depuis la recharge, jusqu'aux sources.

RÉFÉRENCES

- Abbott, M. D., A. Lini et P. R. Bierman (2000). $\delta^{18}\text{O}$, δD and ^3H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. *Journal of Hydrology* (228): 101-112.
- Afşin, M., I. Kuseu, H. Elhatip et K. Dirik (2006). Hydrogeochemical properties of CO_2 -rich thermal-mineral waters in Kayseri (Central Anatolia), Turkey: *Environmental Geology* 50(1): 24-36.
- Alfaro, C. et M. Wallace (1994). Origin and Classification of Springs and Historical Review with Current Applications: *Environmental Geology* 24(2): 112-124.
- Ayalon, A., M. Bar-Matthews et E. Sass (1998). Rainfall-recharge relationships within a karstic terrain in the Eastern Mediterranean semi-arid region: $\delta^{18}\text{O}$ and δD characteristics. *Journal of Hydrology* (207): 18-31.
- Back, W., B. B. Hanshaw, L. N. Plummer, P. H. Rahn, C. T. Rightmire et M. Rubin (1983). Process and rate of dedolomitization: Mass transfer and ^{14}C dating in a regional carbonate aquifer. *Geological Society of America* (94): 1415-1429.
- Banner, J. L., G. L. Wasserburg, P. F. Dobson, A. B. Carpenter et C. H. Moore (1989). Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of saline groundwaters from central Missouri. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (53): 383-398.
- Blanchette, D. (2006). Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement. Québec, Canada. Mémoire de maîtrise.
- Bourque, É., V. Cloutier, R. Lefebvre, M. M. Savard, et R. Martel (2008). Caractérisation de la qualité de l'eau souterraine. Dans : Guide méthodologique pour la caractérisation hydrogéologique régionale des systèmes aquifères en roches sédimentaires fracturées. Édité par Savard, M.M., Lefebvre, R., Martel, R., Ouellet, M., Lamontagne, C., Ministère du développement durable de l'environnement et des parcs du Québec, (5): 83-114.
- Bourque, É. et V. Cloutier (2001). Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine, Caractérisation hydrogéochimique régionale, Commission Géologique du Canada.
- Brian, K. (1919). Classification of Springs : *The Journal of Geology* 27(7)(oct-nov1919): 522-561.
- CAC (2009). La gestion durable des eaux souterraines au Canada: Points saillants du rapport, Conseil des Académies Canadiennes, 16p.
- Cane, G. et I. D. Clark (1998). Tracing ground water recharge in an agricultural watershed with isotopes. *Ground Water* 37(1): 133-139.
- Castelli, S. (2010). Caractérisation hydrogéochimique de l'eau souterraine : méthodologie intégrée pour les études régionales. Recherche effectuée dans le cadre du cours Séminaire de géomatériaux, Printemps 2010, 53p.
- Champagne, R. (1988). Évaluation du potentiel aquicole de la région de l'Abitibi à partir des sources gravitaires émergeant des eskers. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec, 14p.

- Clark, I. et P. Fritz (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York.
- Clark, J. F., M. L. Davisson, G. B. Hudson et P. A. Macfarlane (1998). Noble gases, stable isotopes, and radiocarbon as tracers of flow in the Dakota aquifer, Colorado and Kansas. *Journal of Hydrology* (211): 151-167.
- Clarke, F. W. (1924). *The data of geochemistry*, Chapter VI: Mineral wells and springs. p. 181-217.
- Cloutier, V. (2004). Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des Basses terres du Saint-Laurent, Québec, Canada. Thèse de doctorat.
- Cloutier, V., J. J. Veillette, M. Roy, F. Gagnon et D. Bois (2007). Regional hydrogeochemistry of groundwater in fractured canadian shield rock and glaciofluvial formations in Abitibi, Québec 8th joint CGS/IAH-CNC Conference, Ottawa 8 p.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science* (133): 1702-1703.
- Dallaire, P.-L. et S. Nadeau (2009). Rapport de prospection géophysique par géoradar. Université du Québec à Montréal, (UQAM) et Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, (UQAT), Qc, Canada. Rapport interne 23p.
- Davis, S. N., L. D. Cecil, M. Zreda et S. Moysey (2001). Chlorine-36, bromide, and the origin of spring water: *Chemical Geology* 179(1-4): 3-16.
- Davisson, M. L., D. K. Smith, J. Kenneally et T. P. Rose (1999). Isotope hydrology of southern Nevada groundwater: Stable isotopes and radiocarbon: *Water Resources Research* 35(1): 279-294.
- Desaulniers, D. E., J. A. Cherry et P. Fritz, (1981). Origin, age and movement of pore waters in argillaceous Quaternary deposits at four sites in southwestern Ontario. *Journal of Hydrology* 50: 231-257.
- Desaulniers, D. E. et J. A. Cherry (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.
- Drimmie, R. J., R. Aravena, L. I. Wassenaar, P. Fritz, M. J. Hendry et G. Hut (1991). Radiocarbon and stable isotopes in water and dissolved constituents, Milk River aquifer, Alberta, Canada. *Applied Geochemistry* 6: 381-392.
- Edmunds, W. M., P. Shand, P. Hart et R. S. Ward (2003). The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study: *Science of the Total Environment* 310(1-3): 25-35.
- Eriksson, E. (1963). Atmospheric tritium as a tool for the study of certain hydrologic aspects of river basins, *Tellus* 15(3): 303-308.
- Farnham, I. M., A. K. Singh, K. J. Stetzenbach et K. H. Johannesson (2002). Treatment of nondetects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 60(1-2): 265-281.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*: Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.

- Fritz, S. J., R. J. Drimmie et P. Fritz (1991). Characterizing shallow aquifers using tritium and ^{14}C periodic sampling based on tritium half-life. *Applied Geochemistry* 6: 17-33.
- Ghestem, J. P. et J. Lachenal (2008). Incertitude sur l'échantillonnage et le prélèvement d'eaux : synthèse bibliographique, BRGM/RP-56885-FR, 56p.
- Gilli, E., C. Mangnan, et J. Mudry (2008). *Hydrogéologie : Objets, méthodes, applications*, 2nd éditions, Dunod.
- Hiscock, K. M., P. F. Dennis, P. R. Saynor et M. O. Thomas (1996). Hydrochemical and stable isotope evidence for the extent and nature of the effective Chalk aquifer of north Norfolk, UK. *Journal of Hydrology* (180):79-107.
- Hubert, P., P. Olive et S. Ravailleau (1996). Revue des sciences de l'eau *Journal of Water Science* 9 (4):523-533.
- IAEA/WMO, (2012). Global Network for Isotopes in Precipitation. The GNIP database, <http://isohis.iaea.org>
- Jang, C. S. (2010). Applying scores of multivariate statistical analyses to characterize relationships between hydrochemical properties and geological origins of springs in Taiwan: *Journal of Geochemical Exploration* 105: 11-18.
- Katz, B. G. et C. M. Wicks (2001). Special issue: Hydrochemistry of springs - Preface: *Chemical Geology* 179(1-4): 1-1.
- Keilhack K. (1912). *Lehrbuch der Grundwasser and Quellenkunde*, 3rd edn. Geb.Borntraeger, Berlin.
- Kløve, B., P. Ala-Aho, G. Bertrand, Z. Boukalova, A. Erturk, N. Goldscheider, J. Ilmonen, N. Karakaya, H. Kupfersberger, J. Kvoerner, A. Lundberg, M. Mileusnic, A. Moszczynska, T. Muotka, E. Preda, P. Rossi, D. Siergieiev, J. Simek, P. Wachniew, V. Angheluta et A. Widerlund (2011). Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends: *Environmental Science and Policy* 14(7): 770-781.
- Kortelainen, N. M. et J. A. Karhu (2004). Regional and seasonal trends in the oxygen and hydrogen isotope ratios of Finnish groundwaters: a key for mean annual precipitation: *Journal of Hydrology* 285(1-4): 143-157.
- Kresic, N. (2010). Types and Cassifications of Spring dans N. Kresic et Z. Stevanovic (eds.), *Groundwater Hydrology of Springs* Elsevier Burlington, p. 31-86.
- LaMoreaux, P. E. et J. T. Tanner (2001). *Springs and Bottled Waters of the World: Ancient History, Source, Occurence, Quality and Use*: Berlin, Springer-Verlag.
- Landon, M. K., G. N. Delin, S. C. Komor et C. P. Regan (2000). Relation of pathways and transit times of recharge water to nitrate concentrations using stable isotopes. *Ground Water* 38(3): 381-395.
- Larsen, D., G. H. Swihart et Y. K. Xiao (2001). Hydrochemistry and isotope composition of springs in the Tecopa basin, southeastern California, USA: *Chemical Geology* 179(1-4): 17-35.

- Lee, K.-S., D. B. Wenner et I. Lee (1999). Using H- and O-isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: example from Cheju Island, Korea. *Journal of Hydrology* (222):65-74.
- Lee, E. S. et N. C. Krothe (2001). A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers: *Chemical Geology* 179(1-4): 129-143.
- Le Gal La Salle, C., C. Marline, S. Savoye et J.-C. Fontes (1996). Geochemistry and ^{14}C dating of groundwaters from Jurassic aquifers of North Aquitaine Basin (France). *Applied Geochemistry* (11): 433-445.
- Libby, W. F., E. C. Anderson et J. R. Arnold (1949). Age determination by radiocarbon content: world-wide assay of natural radiocarbon. *Science* 109(2827): 227-228.
- Long, D. T., T. P. Wilson, M. J. Takacs et D. H. Rezabek (1988). Stable-isotope geochemistry of saline near-surface ground water: East-central Michigan basin. *Geological Society of America* (100): 1568-1577.
- Manga, M. (2001). Using springs to study groundwater flow and active geologic processes: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29: 201-228.
- Mariner, R. H., W. C. Evans, T. S. Presser et L. D. White (2003). Excess nitrogen in selected thermal and mineral springs of the Cascade Range in northern California, Oregon, and Washington: sedimentary or volcanic in origin : *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 121(1-2): 99-114.
- Matray, J. M., M. Lambert et J.-C. Fontes (1994). Stable isotope conservation and origin of saline waters from the Middle Jurassic aquifers of the Paris Basin, France. *Applied Geochemistry* (9): 297-309.
- MDDEP, (2002). *Le puits*. Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs, Québec.
- MDDEP, (2005). Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs. Québec Limites de bassins versants de niveau 1. : Le Ministère. Fichiers informatiques. Échelle 1 : 250 000.
- MDDEP, (2008). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs Règlement sur la qualité de l'eau potable. Gouvernement du Québec, première version publiée en juin 2001, dernière modification en juin 2008.
- Meinzer O. E. (1923). The occurrence of Grounwater in the United States. *US Geological Survey Water-Supply no.* 489.
- Minissale, A., G. Magro, O. Vaselli, C. Verrucchi et I. Perticone (1997). Geochemistry of water and gas discharges from the Mt. Amiata silicic complex and surrounding areas (central Italy): *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 79(3-4): 223-251.
- Nace, R. L. (1969). *L'homme et l'eau : aperçu mondial, la Décennie hydrologique internationale*. Paris : Unesco.
- Nadeau, S. (2011). Estimation de la ressource granulaire et du potentiel aquifère des eskers de l'Abitibi-Témiscamingue et du sud de la Baie-James (Québec). Université de Montréal, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise.

- Nativ, R., E.M. Adar et A. Becker (1999). Designing a monitoring network for contaminated ground water in fractured chalk. *Ground Water* 37(1): 38-47.
- Paradis, S. J. (2005). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Castagnier, Québec. Commission géologique du Canada. Carte 1991A, échelle 1 : 100 000.
- Paradis, S. J. (2007a). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Rapide-des-Cèdres, Québec. *Commission géologique du Canada*. Carte 1992A, échelle 1 : 100 000.
- Paradis, S. J. (2007b). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Blouin, Québec. *Commission Géologique du Canada*. Carte 2017A, échelle 1 : 100 000.
- Paramelle, A. (1859). *L'art de découvrir les sources*. (4e eds.). Paris 1896.
- Parkhurst, D. L., S. Christenson et G. N. Breit (1996). Ground-Water-Quality Assessment of the Central Oklahoma Aquifer, Oklahoma - Geochemical and Geohydrologic Investigations. *U.S. Geological Survey no. 2357-C*, 101 p.
- Perrault, P. (1967). *On the Origin of Springs*. Hafner Publishing Co., New York.
- Piper, A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union.no, Hydrology*, 9 14 -923.
- Plummer, L. N., J. F. Busby, R. W. Lee et B. B. Hanshaw (1990). Geochemical modeling of the Madison aquifer in part of Montana, Wyoming, and South Dakota. *Water Resources Research* 26:1981-2014.
- Rademacher, L. K., J. F. Clark, G. B. Hudson, D. C. Erman et N. A. Erman (2001). Chemical evolution of shallow groundwater as recorded by springs, Sagehen basin; Nevada County, California: *Chemical Geology* 179(1-4): 37-51.
- Riverin, M.-N. (2006). Caractérisation et modélisation de la dynamique d'écoulement dans le système aquifère de l'esker Saint-Mathieu-Berry, Abitibi, Québec. Département des sciences de la Terre, INRS-ETE, Université du Québec. Québec, Canada. Mémoire de maîtrise.
- Robertson, W. D. et J. A. Cherry (1989). Tritium as indicator of recharge and dispersion in a groundwater system in central Ontario. *Water Resources Research* 25(6): 1097-1109.
- Rosen, M.R., J. Bright, P. Carran, M.K. Stewart et R. Reeves (1999). Estimating rainfall recharge and soil water residence times in Pukekohe, New Zealand, by combining geophysical, chemical, and isotopic methods. *Ground Water* 37(6): 836-844.
- Santé Canada (2012). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada -Tableau sommaire. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario.
- Schumberger Water Services. (2011). AquaChem v.2011.1.40, Aqueous geochemical data analysis, plotting and modeling. User's manual, p 328.
- Simard, G. et R. Des Rosiers (1980). Qualité des eaux souterraines du Québec p 160.
- Simpkins, W. W. (1995). Isotopic composition of precipitation in central Iowa. *Journal of Hydrology* 172:185-207.
- Springer, A. E., L. E. Stevens, D. E. Anderson, R. A. Parnell, K. K. David, L. A. Levin et S. P. Flora (2008). A comprehensive Springs Classification System: Integrating Geomorphic,

- Hydrogeochemical, and Ecological Criteria, dans L. E. Stevens et V. J. Meretsky (eds.) *Aridland Springs in North America Ecology and Conservation*: Tucson, p. 49-75.
- Springer, A. E. et L. E. Stevens (2009). Spheres of discharge of springs: *Hydrogeology Journal*, 17(1): 83-93.
- StatSoft Inc. (2009). STATISTICA (version 9.0), *Quick reference*, (data analysis software system), p 298.
- Stevens, L. E. et V. J. Meretsky (2008). Springs ecosystem and conversation, dans L.E Stevens. et V.J. Meretsky (eds.) *Aridland Springs in North America Ecology and Conservation*: Tucson, p. 3-11.
- Stiny J. (1933). *Springs*. The geological foundations of springs for engineers of all disciplines as well as students of natural science. J. Springer Publisher, Vienna.
- Swanson, S. K., J. M. Bahr, M. T. Schwar et K. W. Potter (2001). Two-way cluster analysis of geochemical data to constrain spring source waters. *Chemical Geology* 179(1-4): 73-91.
- Thibaudeau, P., et J. J. Veillette (2005). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Chicobi, Québec. *Commission géologique du Canada Carte 1996A*, échelle 1 : 100 000.
- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations: *Hydrogeology Journal* 7(1):1-14.
- Unterweger, M. P., B. M. Coursey, F. J. Shima et W. B Mann (1980). Preparation and calibration of the 1978 National Bureau of Standards tritiated water standards. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* (31): 611-614.
- Van Camp M. et K. Walraevens (2008). Identifying and Interpreting in W. M. Edmunds, P. Shand, (Eds.), *Natural Groundwater Quality* Blackwell Publishing, p 131-154.
- Veillette, J. J. (1994). Evolution and paleohydrology of glacial Lakes Barlow and Ojibway. *Quaternary Science Reviews* 13(9-10): 945-971.
- Veillette, J. J. (2004). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Cadillac, Québec. *Commission Géologique du Canada Carte 2019A*, échelle 1 : 100 000.
- Veillette, J. J., A. Maqsoud, H.d. Corta et D. Bois (2004b). Hydrogéologie des eskers de la MRC d'Abitibi, Québec, *57 ième Congrès Canadien de Géotechnique 5 ième Congrès Conjoint SCG/AIH - CNN Québec*, p. 8.
- Veillette, J. J. et P. Thibaudeau (2007). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Rivière Wawagosic, Québec. *Commission Géologique du Canada, Carte 1995A*, échelle 1 : 100 000.
- Weaver, T. R., S. K. Frape et J. A. Cherry (1995). Recent cross-formational fluid flow and mixing in the shallow Michigan Basin. *Geological Society of America* 107(6): 697-707.
- White, W. B. (2010). Springwater Geochemistry, dans N. Kresic et Z. Stevanovic (eds.), *Groundwater Hydrology of Springs* Elsevier Burlington, p. 231-268.

ANNEXES

Annexe 1 **Clé de détermination des sources, Brian (1919)**

- I. Source d'eau due à l'eau jeune et apparentée, mélangé à l'eau météorite plus profonde; ne s'écoule pas sous le niveau hydrostatique et ne sont habituellement pas sujet aux fluctuations saisonnières
 - A. Sources Volcaniques : Associées au volcanisme ou roches volcaniques
 - B. les eaux généralement chaudes hautement minéralisées contenant des gaz. Les catégories de gaz des conduits à l'intérieur des sources ou de sources thermales sont difficilement différenciables des autres gaz
 - C. Source provenant de fissure : due aux fractures s'étendant à l'intérieur des parties plus profondes de la croûte, les eaux habituellement hautement minéralisés sont généralement tièdes et chaudes.
 1. Source provenant de faille : Associées avec failles récentes de grande magnitude
 2. Source provenant de fissure, pas d'évidence structurelle direct à l'origine, mais à cause de la température et de l'écoulement stable, qui aurait une origine profonde.
- II. Sources due à l'origine des eaux météorite et occasionnelles d'autres eaux circulant comme étant de l'eau souterraine, sous le niveau hydrostatique; beaucoup de fluctuations en écoulement avec l'eau de pluie.
 - A. Les sources par dépression dû à la surface du terrain coupant la nappe phréatique dans les roches poreuses.
 1. Source creuse : due aux dépressions dans les pentes
 2. Source dans les vallées : due aux changements abrupts des pistes sur les bords des vallées inondées
 3. Source en canal : due aux dépressions dans les plaines inondées ou dans les plaines alluviales creusées par des canaux qui coupent des ruisseaux
 4. Source frontière : due aux changements de la pente à la frontière entre les plaines alluviales et les plages, les lits des lacs ou les bas-fonds des rivières; l'imperméabilité relative des dépôts centraux d'argile favorise l'écoulement.
 - B. Source par contact : dû à des roches poreuses étant juxtaposée sur le roc imperméable
 1. Roc imperméable comme étant une surface horizontale et régulière
 - a) Le lit sous-jacent est une large étendue; commun dans la roche sédimentaire consolidée
 - (1) Source gravitaire : le matériel doux

- (2) Sources mésa : le matériel dur, habituellement du grès ou de l'écoulement de lave; de l'eau contenue dans les pores et joints du roc ou la formation géologique
 - b) Le lit sous-jacent est de petite étendue, commun dans des alluvions non consolidés, lits imperméables sont habituellement de l'argile, du gravier cimenté, du « lit de mortier », du caliche ou base ferme.
 - (1) Source de base ferme
- 2. lit imperméable à une surface inclinée est imperméable et régulière, toute les sources sur les côtés bas à moins que le lit soit très épais et l'immersion basse.
 - a) Le lit sous-jacent est d'une étendue large
 - (1) Les sources gravitaires inclinées, le matériel est doux
 - (2) Les sources cuesta, le matériel sur le dessus est dur, de même caractéristique que les sources mesa.
 - b) Le lit sous-jacent est de petite étendue comme dans les sources à base ferme
 - (1) L'immersion des couches imperméables loin des collines; sources d'eau possibles éloignées
 - (2) L'immersion des couches imperméables à l'intérieur des collines; sources d'eau possibles seulement dans les ravins.
- 3. Les lits imperméables ont des surfaces irrégulières
 - a) Le matériel poreux couché est épais et de large étendue; le contact est la non-conformité des sources de gravité, de gravité incliné, de mesa et de cuesta peuvent se produire, mais les sources vont être brusquement localisées au plus basses parties de contact.
 - b) Les sources de poches, le matériel poreux est non consolidé (talus, débris de glissement, de terrain, l'alluvion, du till, sédiments stratifiées, du sable emporté par le vent, des cendres volcaniques).
 - c) Source par débordement : le plancher irrégulier n'est pas continu, mais le lit poreux est saturé et déborde au contact latéral et ensuite commun à la fin de la réception des systèmes artésiens.
 - d) Source de barrage de formations géologiques. Irrégularités du sol ou plancher rocheux sous une plaine alluviale force l'eau à faire surface. Ceux-ci peuvent être des projections du sol du bassin, des projections de plus vieilles alluvions partiellement consolidées, des barrages lignés ou prises volcaniques.
 - e) Source de barrage de faille : barrage creusé par la formation de failles.

C. Source Artésienne, due à des lits perméables entre des matériaux imperméables

1. Source artésienne immergée. Roche litée plus ou moins régulièrement, lits poreux inclinés, affleurant dans la vallée, habituellement sédimentaires et aussi une alternance d'écoulement de lave, d'écoulement de brèche, de tufs, de graviers.
2. Source artésienne par siphon. Roc en repli avec affleurement dans la vallée.
3. Source artésienne non litée. Roc non régulièrement lité mais la masse du matériel poreux est exposé pour recevoir l'eau et affleure dans la vallée. Se produit dans des tills et peut être dans d'autres roc.
4. Source artésienne par fracture. Toutes les conditions ci-haut (excepté celles sur les lits poreux) n'affleurent pas mais une ouverture permet à l'eau de s'échapper. Cette ouverture est due à la fracture avec ou sans faille.

D. Source dans le roc imperméable

1. Source tubulaire. Due aux canaux plus ou moins arrondis dans le roc ou roche imperméable.
 - a) Solution tubulaire ou source caverneuse due aux canaux de solution dans le calcaire, grès calcaire, gypse, sel.
 - b) Source tubulaire de lave : due aux cavernes et tunnels dans les écoulements de lave.
 - c) Source tubulaire mineur due aux canaux faits par le mouvement de l'eau, décomposition de racines d'arbres, des bandes de sables ou crique de rétraction, habituellement dans des sédiments non consolidés.
2. Source par fracture : due à des fractures composés de joints, de plaines litées, des joints colonnaire, ouverture due à un clivage en fissilité schisteux, de plaines inter-lité et de failles sédimentaires imperméables, ignées et métamorphiques rocs.
 - a) Source par fracture quadrillé. Due au système de fractures plus ou moins rectangulaires, une desquelles est parallèle à l'horizon.
 - b) Source par fracture hachée. Due à un système de fractures plus ou moins rectangulaire incliné vers l'horizon.

Source par fracture incliné. Due à des fractures inclinées, pas nécessairement systématique.

Annexe 2 Classification de Springer et Stevens (2009)

Classe	Type	Description
Considérations géomorphiques		
Unité hydro stratigraphique	Roche mère de l'aquifère	Sédimentaire (roc ou sédiment non consolidé)
		Ignée
		Métamorphique
		Mélangée (combinaison des précédents)
Environnement de résurgence	Caverne	Cas spécial, habituellement non considérée comme une source, car elle peut ne pas être directement exposée à l'atmosphère
	Subaérienne	Résurgence au-dessus du sol, cadre géomorphique (ex: plaine inondable, prairie, piémont, plancher ou mur de canyon, versant de montagne)
	Subglaciaire	Résurgence au-dessus du sol, en-dessous d'un glacier
	Subaquatique-stagnant d'eau douce	Résurgence aquatique à l'intérieur d'un étang ou d'un lac (substrat: organique, limon, silt, sable, roc)
	Subaquatique-lotique d'eau douce	Résurgence aquatique à l'intérieur d'un ruisseau ou d'une rivière (substrat : organique, limon, silt, sable, roc)
	Subaquatique- estuarienne	Résurgence aquatique dans l'estuaire (substrat : organique, limon, silt, sable, roc)
	Subaquatique- marine	Résurgence aquatique dans un cadre marin (substrat : silt, sable, corail)
Géomorphologie de l'orifice	Suintement ou source par filtration	ES exposée ou déchargée par de nombreuses petites ouvertures dans un matériel perméable.
	Source par fracture	ES exposée ou déchargée à partir de joint ou de fracture

Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Source tubulaire	ES déchargée ou exposée par des ouvertures de canaux comme une solution de passages ou de tunnels
	Source par contact	Écoulements déchargés le long d'un contact stratigraphique (ex. jardin suspendu)
Sphère de décharge	Caverne	Résurgence dans une caverne
	Limnocrène-résurgence provenant de bassin(s) stagnant(s)	Résurgence dans le/les bassins
	Rhéocrène-étages de canal Lotique	Sources s'écoulant, émergeant Directement à l'intérieur d'un ou plusieurs canaux ou ruisseaux
	(Carbonate) Formes de monticules	Résurgence provenant de monticules minéralisés
	Hélocrène marais ou cienega pré humide	Résurgence provenant de marécages à gradient-bas, souvent indistincts ou à sources multiples
	Source de colline en pente	Source provenant de colline en pente de 30° à 60° souvent indistincts ou à sources multiples
	Flot	Source d'écoulement en flots discrets provenant d'un mur
	Jardin suspendu	L'écoulement par goutte émerge habituellement de façon horizontale tout au long du contact géologique
	Geyser	Écoulement explosif
	Fontaine	Forme de fontaine artésienne
	Hypocrène	Une source enterrée où l'écoulement n'atteignant pas la surface
	Exposition	ES est exposée à la surface du terrain mais ne s'écoule pas
Dynamique des canaux des sources (s'il y en a)	Sources dominées par les ruisseaux	Peu d'impact d'écoulement externe
	Ruisseaux intermédiaires	Morphologie des sources et des canaux d'écoulement final

Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Ruisseaux dominés par écoulements finals	Dominés par les impacts d'écoulement externe
Écoulement à mécanismes forcés	Les sources de forces de gravité	Sources par dépression, contact, fracture ou tubulaires
	Augmentation de la pression du à la force de gravité	Sources artésiennes
	Sources géothermiques	Sources associées au volcanisme
	Sources dues à la pression produite par d'autres forces	Sources dites « bouteilles de coke » et sources associées aux relâchements gazeux dans des fractures profondes
	Sources due à des pressions produites par des forces anthropogéniques	Systèmes artésiens ou geysers anthropogéniques, comme les sources chaudes Hoover Dam, Arizona, Nevada
Caractéristiques d'écoulement		
Persistance	Néorefugium	Holocène (<12000années) aucune espèces endémiques
	Paleoréfugium	Pléistocène ou plus vieux (≥12000années) une ou plusieurs espèces endémiques
	Sourcepaléo	Pléistocène mais pas d'écoulement récent apparent, travertin ou d'autres indicateurs d'écoulements paléo
Consistance d'écoulement	Éternel	Écoulement continu
	Intermittent-régulier	Régulier – l'écoulement se produit sur un horaire régulier à l'heure, quotidiennement, (e.g. Certains geysers), saisonnier, annuel, ou variable
	Intermittent-erratique	L'écoulement se produit seulement sur une base erratique, peut être notée avec des indicateurs végétatifs
	Intermittent-sec	Aucun écoulement en tout temps pour prise de mesure
Taux d'écoulement (moyen)	Non mesurable	Aucun écoulement discernable pour effectuer une mesure
	Un	<0,12 gpm (<10 ml/s)
	Deux	0,12-1,0 gpm (10-100 ml/s)

Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Trois	1,0-10 gpm (0,10-1,0 L/s)
	Quatre	10-100 gpm (1,0-10 L/s)
	Cinq	100-448,8 gpm (10-100 L/s)
	Six	448,8-4,488 gpm (10-100 L/s)
	Sept	4,488-44,880 gpm (0,10-1,0 m ³ /s)
	Huit	>44,880 gpm (>10 m ³ /s)
Écoulement		
Écoulement variable		
	Régulier	1,0-2,5
	Modéré	2,6-5,0
	Balancé	5,1-7,5
	Modérément non balancé	7,6-10,0
	Hautement non régulier	>10,0
	Éphémère	Éternel
Qualité		
Qualité de l'eau		
	Froide	Température ambiante sous la moyenne
	Normale	Atteignant au moins 12,2°C de la température ambiante moyenne
	Géothermale-chaude	>12,2°C plus chaud que la moyenne annuelle de température ambiante mais <37,8°C
	chaude	Significativement plus chaude que la température ambiante annuelle 37,8°C-100°C
	Brulante (habituellement sous pression)	>100°C
	Température ambiante	Température mesurée dans le temps; la température varie avec la moyenne quotidienne
Qualité D'eau-Géochimie		
Type de cations dominants	Type Mg	Le magnésium (Mg ²⁺), dominant
	Type Ca	Le calcium (Ca ²⁺), dominant
	Type Na	Le sodium (Na ⁺) est un dominant

Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Pas de type dominant	Pas de type dominant
Type d'anions dominants	Type sulfate	Le sulfate (SO_4^{2-}) est un anion dominant
	Type bicarbonate	Le carbonate (CO_3^{2-}) et le bicarbonate (HCO_3^-) sont des anions dominants
	Type chlorure	Le chlorure (Cl^-) est un anion dominant
	Pas de type dominant	Aucun anion dominant
Constituants mineurs	Liste des constituants mineurs	E.g., borate, fer
Indicateurs de pollutions	Polluée-Minérale	E.g., selenium, coliformes fécaux
	Polluée-Biologique	E.g., coliformes fécaux
	Polluée-Humain	E.g., détritux
	Polluée-Multiple	E.g., Combinaison de tous les indicateurs mentionnés ci-haut
Traceurs	Liste de traceurs	E.g., isotopes stables, isotopes radioactifs, éléments de terre rares
Alcalins	Valeurs listées	Équivalence de concentration de CaCO_3
Solides totaux dissous	Très douce	0-100mg pH < 6,0/L TDS
	Douce	100-1,000 mg/L TDS
	Saumâtre	1,000-10,000 mg/L TDS
	Saline	10,000-100,000 mg/L TDS
	Eau de mer	>100,000 mg/L TDS
pH	Acide	PH < 5,0
	Modérément acide	5,0 < pH < 6,0
	Neutre	6,0 < pH < 8,0
	Modérément basique	8,0 < pH < 10,0
	basique	PH >10,0
Concentration en nutriment	Faible en nitrate	$\text{NO}_3\text{-N} < ,03 \text{ mg/L}$
	Modéré en nitrate	$0,3 < \text{NO}_3\text{-N} < 5 \text{ mg/L}$
	Élevé en nitrate	$\text{NO}_3\text{-N} < 5,0 \text{ mg/L}$
	Faible en phosphate	$\text{PO}_4^{2-} < 50 \text{ }\mu\text{g/L}$
	Modéré en phosphate	$50 \text{ }\mu\text{g/L} < \text{PO}_4^{2-} < 500 \text{ }\mu\text{g/L}$
	Élevé en phosphate	$\text{PO}_4^{2-} > 500 \text{ }\mu\text{g/L}$
Habitats- Variables climatiques		
Température annuelle de l'air	Pergélisque	< 0°C
	Frigide	0°C-8°C

Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Mézique	8°C-15°C
	Thermique	15°C-22°C
	Hyperthermique	>22°C
Température saisonnière de l'air	Hors saisonnier	Index de saisonnalité <2
	Faiblement saisonnier	Index de saisonnalité 2-5
	Modérément saisonnier	Index de saisonnalité 5-15
	Fortement saisonnier	Index de saisonnalité >15
Précipitation moyenne annuelle	Extrêmement aride	<50 mm
	Aride	50-250 mm
	Semi-aride	250-500mm
	Semi-humide	500-100mm
	Humide	1,000-2,000 mm
	Extrêmement humide	>2,000 mm
Précipitation saisonnière	Hors saisonnier	Index de saisonnalité 1-1,6
	Faiblement saisonnier	Index de saisonnalité 1,6-2,5
	Modérément saisonnier	Index de saisonnalité 2,5-10
	Fortement saisonnier	Index de saisonnalité >10
Longueur de la saison de croissance	Court	Nombre de jours de degrés de croissance <2000
	Moyen	Nombre de jours de degrés de croissance 2000-6000
	Long	Nombre de jours de degrés de croissance >6000
Habitats- Variables biologiques		
Écosystèmes environnants	Terrestres	Régions stériles
	Moyen	Régions des prairies
	Long	Régions herbacées
Écosystèmes environnants	Terrestres	Régions boisées
		Forêt
		Stagnante
	Eau douce	Lotique
		Euphotique

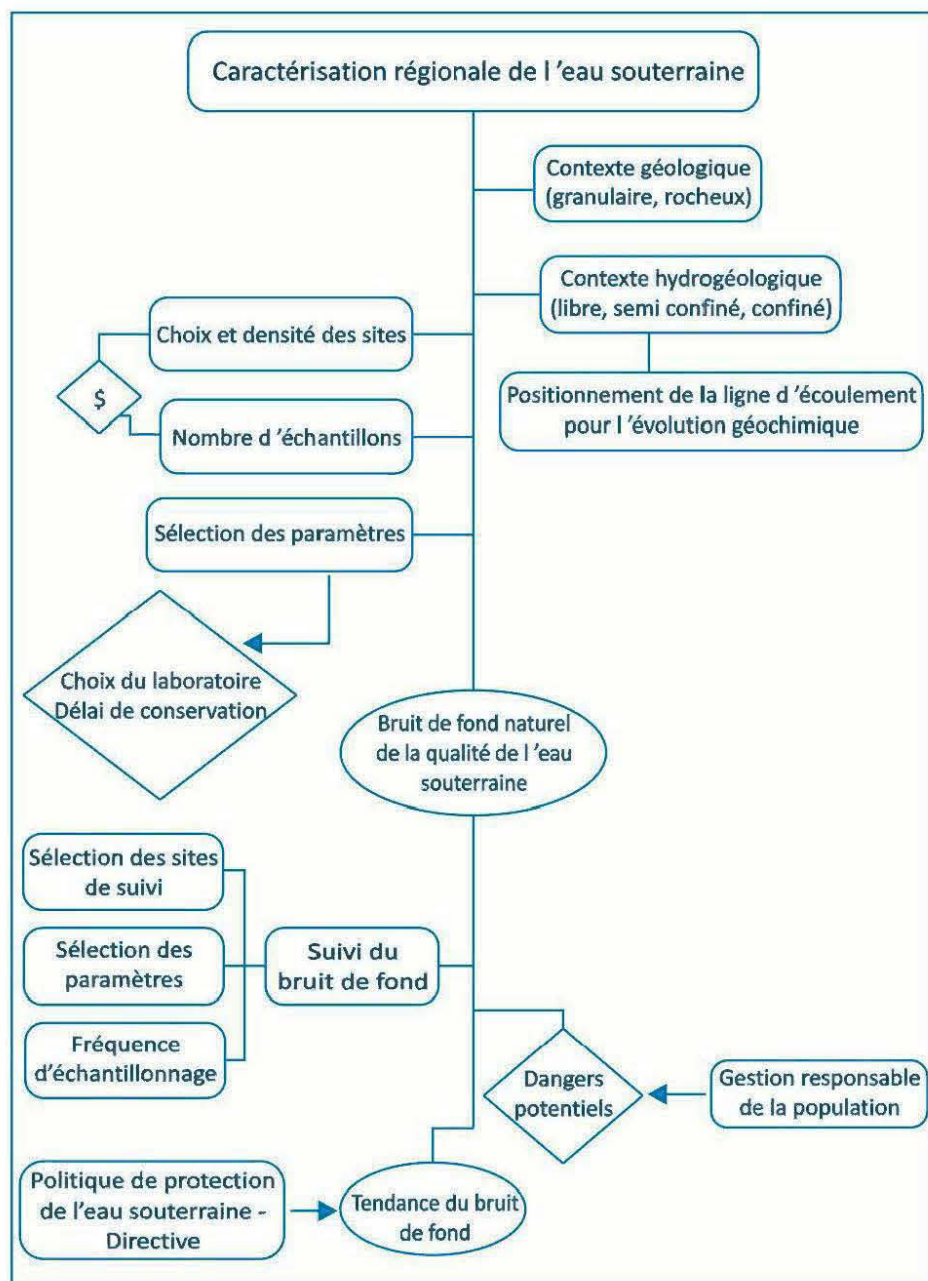
Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Marine	Aphotique (profond)
	Urbain/banlieue, rural	Pas de développement humain
Isolation biogéographique	La source la plus proche	<1-100 m entre les sources
	très proche	100 m 1 km entre les sources
	La source la plus proche, proche	1-10 km entre les sources
	Modérément isolée	
	Isolée	10-100 km entre les sources
	Hautement isolée	>100 km entre les sources
	Extrêmement petite	<2 m ²
Taille des habitats	Très petite	2-10 m ²
	Petite	10-100 m ²
	Moyennement petite	100-1,000 m ²
	Moyennement large	0,01-1,0 ha
	Large	1-10 ha
	Très large	10-100 ha
	Extrêmement large	> 100 ha
Microhabitats	Caverne	Zone sombre en permanence
	Large	Zone de crépuscule
	Très large	Entrée
	Mur humide	Mur(s) humides, suintants, ou secs
	Madiculeux	Ruisseau d'eau qui tombe ou qui s'écoule rapidement
	Hyporheique	Habitat en dessous du plancher en dessous du ruisseau
	Bassin d'eau-ouvert	La boue-, limon-, sable-, gravier-, roche-, ou étang dont le fond est en roc
	Ruisseau de source	Fond de grain fin, (sable ou silt)
	Madiculeux	Plancher de gravier (note : gravier incorporé)
	Hyporheique	Roc
	Pré humide	Marécage - Basse-Terre humide
	Ruisseau de source	Haute-terre humide,
	Désert rocheux	falaises, collines, ou relativement plat

Classification de Springer et Stevens (2009) (suite)

Classe	Type	Description
	Diversité de microhabitat	L'index de diversité de Shannon est calculé en utilisant une portion de chaque zone de microhabitat : $H' = \sum (p_i * \log p_i)$
Biota	Richesse des espèces végétales	Les espèces observées, avec une couverture d'un pourcentage de chaque espèce dans chacune des zones majeures de végétation par strate, recouvrement de sol, arbuste, boisé couvert ou partiellement couvert; espèces sensibles notées
	Diversité de la végétation	Index de diversité de Shannon, utilisant une portion de $= -\sum (p_i * \log p_i)$ chaque strate dans chaque zone : $H' = \sum (p_i * \log p_i)$
	Richesse des espèces invertébrées	Nombre et espèces observées; espèces sensibles notées
	Diversité animal	Calcul de mesure (Shanon)
	Diversité des invertébrés	L'index de diversité de Shannon est calculé en utilisant des mesures quantitatives de diversité pour les taxa aquatiques et terrestres : $H' = \sum (p_i * \log p_i)$

Annexe 3 Organigramme présentant les étapes à suivre pour réaliser la caractérisation géochimique et le suivi du bruit de fond pour une caractérisation régionale



Annexe 4 Données isotopiques

Annexe 4.1 Données des isotopes stables, ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ et ^3H

ID échantillon	Date échantillon	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Date analyse ^{14}C	^{14}C (pmC)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
AMOS-09-001 SC	2009-07-13	-14.30	-102.20			
AMOS-10-0015-SC	2010-08-31	-14.28	-100.93			
AMOS-10-001SC	2010-07-20	-14.26	-101.00	2011-09-21	62.08	-14.21
AMOS-10-27OCT-SC	2010-10-26	-14.26	-101.76	2011-10-03	61.51	-14.23
AMOS-10-3009-SC	2010-09-30	-14.08	-100.28			
AUTH-09-001SC	2009-07-22	-14.30	-98.78			
AUTH-10-0015-SC	2010-08-30	-14.24	-99.66			
AUTH-10-001SC	2010-07-12	-14.02	-101.25	2011-10-03	86.15	-18.06
AUTH-10-25OCT-SC	2010-10-26	-14.07	-101.11	2011-10-07	86.27	-16.86
AUTH-10-27-SEPT-SC	2010-09-27	-14.24	-100.99			
BARR-09-001SC	2009-07-28	-13.90	-96.27			
BARR-09-002SC	2009-07-28	-14.16	-98.35			
BARR-09-003SC	2009-07-28	-14.09	-95.18			
BARR-10-0015-SC	2010-09-01	-13.85	-97.48			
BARR-10-001SC	2010-07-12	-13.77	-99.16	2011-10-07	66.45	-14.57
BARR-10-001-SC	2010-07-21	-13.76	-97.32	2011-10-07	82.75	-14.75
BARR-10-0025-SC	2010-09-01	-13.78	-96.55			
BARR-10-26OCT1-SC	2010-10-26	-13.76	-98.13	2011-10-07	65.93	-14.28
BARR-10-26OCT-SC	2010-10-26	-13.87	-97.77	2011-10-07	84.57	-17.03
BARR-10-3009BUCO-SC	2010-09-30	-13.77	-96.99			
BARR-10-3009-SC	2010-09-30	-13.32	-94.00			
BERR-09-001SC	2009-07-16	-13.91	-102.33			
BERR-09-002SC	2009-07-16	-12.48	-95.62			
BERR-09-0035C	2009-07-20	-14.07	-102.14			
BERR-09-0045C	2009-07-20	-14.04	-101.54			
BERR-09-005SC	2009-07-29	-13.33	-96.45			
BERR-10-001SC	2010-07-16	-13.41	-96.92			
BERR-10-002SC	2010-07-16	-12.85	-94.13			
BERR-10-25OCT-SC	2010-10-26	-14.00	-100.90	2011-10-07	61.35	-14.36
BERRY-10-0015-SC	2010-09-02	-13.83	-98.82			
BERRY-10-006-SC	2010-08-12	-14.07	-99.83	2011-10-07	61.12	-14.2
BERRY-10-27SEPT-SC	2010-09-27	-14.10	-99.80			
BRUN-09-001SC	2009-08-18	-14.15	-106.27			
BRUN-10-001SC	2010-07-19	-13.84	-97.60			
CHLC-09-001SC	2009-07-28	-9.67	-75.11			

Données des isotopes stables, ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ et ^3H (suite)

ID échantillon	Date échantillon	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Date analyse ^{14}C	^{14}C (pmC)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
DOUM-09-001SC	2009-07-22	-14.10	-100.31			
ESKA-10-0015-SC	2010-08-31	-13.29	-94.90			
ESKA-10-001SC	2010-07-14	-13.25	-95.02	2011-10-07	72.89	-17.11
ESKA-10-27OCT-SC	2010-10-26	-13.23	-95.03	2011-10-07	73.38	-15.54
ESKA-10-3009-SC	2010-09-30	-13.26	-95.00			
JOAN-10-001SC	2010-07-19	-14.28	-102.41			
LAND-09-001SC	2009-07-15	-14.09	-101.43			
LAND-09-002SC	2009-07-15	-14.21	-101.26			
LAND-09-003SC	2009-09-01	-14.35	-104.08			
LAND-10-0015-SC	2010-09-01	-13.95	-98.35			
LAND-10-001-SC	2010-07-21	-13.97	-97.60	2011-10-13	68.08	-14.14
LAND-10-26OCT-SC	2010-10-26	-13.69	-98.72	2011-10-13	67.66	-14.43
LAND-10-3009-SC	2010-09-30	-13.88	-98.61			
LAUN-09-001SC	2009-07-20	-13.86	-99.46			
LAUN-09-002SC	2009-07-21	-14.02	-94.25			
MATA-09-001SC	2009-09-01	-13.44	-94.12			
MATA-09-002 SC	2009-09-01	-13.71	-96.03			
MATA-10-0015-SC	2010-08-30	-13.49	-96.02			
MATA-10-001SC	2010-07-13	-12.92	-95.94			
MATA-10-002SC	2010-07-13	-13.48	-96.83			
MATA-10-25OCT-SC	2010-10-26	-13.54	-96.75	2011-10-26	58.32	-14.86
MATA-10-27SEPT-SC	2010-09-27	-13.51	-96.76			
MATH-09-001SC	2009-07-13	-14.23	-101.46			
MATH-09-002SC	2009-08-31	-13.69	-97.01			
MATH-09-003 SC	2009-09-02	-13.54	-97.99			
MATH-09-004 SC	2009-09-02	-13.47	-96.69			
MOTT-09-001 SC	2009-07-14	-14.32	-101.81			
MOTT-09-002SC	2009-08-31	-13.94	-101.11			
TREC-09-001 SC	2009-07-14	-14.16	-101.51			
VALD-09-001SC	2009-07-30	-14.01	-88.36			
VALD-09-003SC	2009-07-30	-14.18	-106.27			
VALD-09-004SC	2009-08-24	-14.19	-98.96			
VALD-10-0015-SC	2010-09-01					
VALD-10-001-SC	2010-07-23	-13.83	-98.31			
VALD-10-002-SC	2010-07-23	-14.11	-99.48	2011-11-21	83.24	-13.17
VALD-10-3009-SC	2010-09-30	-13.91	-99.69			
VALD-20-26OCT-SC	2010-10-26	-14.10	-99.20	2011-11-21	79.35	-16.08

A 4.2 ($\delta^{18}\text{O}$), années 2009 données classées

ABTE	Station ID	Date échantillon	Juillet (‰)	Aout (‰)	Sept. (‰)	Oct. (‰)
3465	AMOS-09-001 SC	2009-07-13	-14.30			
3464	MATH-09-001SC	2009-07-13	-14.23			
3484	MOTT-09-001 SC	2009-07-14	-14.32			
3466	TREC-09-001 SC	2009-07-14	-14.16			
3467	LAND-09-001SC	2009-07-15	-14.09			
3468	LAND-09-002SC	2009-07-15	-14.21			
3464A	BERR-09-001SC	2009-07-16	-13.91			
3470	BERR-09-002SC	2009-07-16	-12.48			
3471	BERR-09-0035C	2009-07-20	-14.07			
3472	BERR-09-0045C	2009-07-20	-14.04			
3473	LAUN-09-001SC	2009-07-20	-13.86			
3474	LAUN-09-002SC	2009-07-21	-14.02			
3475	AUTH-09-001SC	2009-07-22	-14.30			
3476	DOUM-09-001SC	2009-07-22	-14.10			
3479	BARR-09-001SC	2009-07-28	-13.90			
3480	BARR-09-002SC	2009-07-28	-14.16			
3478	BARR-09-003SC	2009-07-28	-14.09			
3481	CHLC-09-001SC	2009-07-28	-9.67			
3477	BERR-09-005SC	2009-07-29	-13.33			
3482	VALD-09-001SC	2009-07-30	-14.01			
3483	VALD-09-003SC	2009-07-30	-14.18			
3485	BRUN-09-001SC	2009-08-18		-14.15		
3486	VALD-09-004SC	2009-08-24		-14.19		
3492	MATH-09-002SC	2009-08-31		-13.69		
3491	MOTT-09-002SC	2009-08-31		-13.94		
3493	LAND-09-003SC	2009-09-01			-14.35	
3487	MATA-09-001SC	2009-09-01			-13.44	
3488	MATA-09-002 SC	2009-09-01			-13.71	
3489	MATH-09-003 SC	2009-09-02			-13.54	
3490	MATH-09-004 SC	2009-09-02			-13.47	

A 4.3 ($\delta^{18}\text{O}$), années 2010 données classées

ABTE	Station ID	Date échantillon	Juillet (‰)	Aout (‰)	Sept. (‰)	Oct. (‰)
3475	AUTH-10-001SC	2010-07-12	-14.02			
3479	BARR-10-001SC	2010-07-12	-13.77			
3487	MATA-10-001SC	2010-07-13	-12.92			
3488	MATA-10-002SC	2010-07-13	-13.48			
3490	ESKA-10-001SC	2010-07-14	-13.25			
3469A	BERR-10-001SC	2010-07-16	-13.41			
3470	BERR-10-002SC	2010-07-16	-12.85			
3485	BRUN-10-001SC	2010-07-19	-13.84			
3502	JOAN-10-001SC	2010-07-19	-14.28			
3465	AMOS-10-001SC	2010-07-20	-14.26			
3478	BARR-10-001-SC	2010-07-21	-13.76			
3467	LAND-10-001-SC	2010-07-21	-13.97			
3482	VALD-10-001-SC	2010-07-23	-13.83			
3483	VALD-10-002-SC	2010-07-23	-14.11			
3469	BERRY-10-006-SC	2010-08-12		-14.07		
3475	AUTH-10-0015-SC	2010-08-30		-14.24		
3488	MATA-10-0015-SC	2010-08-30		-13.49		
3465	AMOS-10-0015-SC	2010-08-31		-14.28		
3490	ESKA-10-0015-SC	2010-08-31		-13.29		
3478	BARR-10-0015-SC	2010-09-01			-13.85	
3479	BARR-10-0025-SC	2010-09-01			-13.78	
3467	LAND-10-0015-SC	2010-09-01			-13.95	
3469	BERRY-10-0015-SC	2010-09-02			-13.83	
3475	AUTH-10-27-SEPT-SC	2010-09-27			-14.24	
3469	BERRY-10-27SEPT-SC	2010-09-27			-14.10	
3488	MATA-10-27SEPT-SC	2010-09-27			-13.51	
3465	AMOS-10-3009-SC	2010-09-30			-14.08	
3479	BARR-10-3009B-SC	2010-09-30			-13.77	
3478	BARR-10-3009-SC	2010-09-30			-13.32	
3490	ESKA-10-3009-SC	2010-09-30			-13.26	
3467	LAND-10-3009-SC	2010-09-30			-13.88	
3483	VALD-10-3009-SC	2010-09-30			-13.91	
3465	AMOS-10-27OCT-SC	2010-10-26				-14.26
3475	AUTH-10-25OCT-SC	2010-10-26				-14.07
3479	BARR-10-26OCT1-SC	2010-10-26				-13.76
3478	BARR-10-26OCT-SC	2010-10-26				-13.87
3469	BERR-10-25OCT-SC	2010-10-26				-14.00
3490	ESKA-10-27OCT-SC	2010-10-26				-13.23
3467	LAND-10-26OCT-SC	2010-10-26				-13.69
3488	MATA-10-25OCT-SC	2010-10-26				-13.54
3483	VALD-20-26OCT-SC	2010-10-26				-14.10

A.4.4 Données ^{14}C , ^3H et ^{13}C , années 2010

ID échantillon	Date échantillon	Date analyse ^{14}C	^{14}C (pmC)	Date analyse ^3H , ^{13}C (‰)	^3H (UT)	^{13}C (‰)
AUTH-10-001SC	2010-07-12	2011-10-03	86.15	2011-07-07	11.8	-18.06
BARR-10-001SC	2010-07-12	2011-10-07	66.45	2011-08-08	13.5	-14.57
MATA-10-001SC	2010-07-13					
MATA-10-002SC	2010-07-13				11.5	
ESKA-10-001SC	2010-07-14	2011-10-07	72.89	2011-08-08	14	-17.11
BERR-10-001SC	2010-07-16					
BERR-10-002SC	2010-07-16					
BRUN-10-001SC	2010-07-19					
JOAN-10-001SC	2010-07-19					
AMOS-10-001SC	2010-07-20	2011-09-21	62.08	2011-07-07	10.6	-14.21
BARR-10-001-SC	2010-07-21	2011-10-07	82.75	2011-08-08	14.9	-14.75
LAND-10-001-SC	2010-07-21	2011-10-13	68.08	2011-07-07	11.9	-14.14
VALD-10-001-SC	2010-07-23					
VALD-10-002-SC	2010-07-23	2011-11-21	83.24		13.8	-13.17
BERRY-10-006-SC	2010-08-12	2011-10-07	61.12	2011-07-07	12.4	-14.2
AUTH-10-0015-SC	2010-08-30					
MATA-10-0015-SC	2010-08-30					
AMOS-10-0015-SC	2010-08-31					
ESKA-10-0015-SC	2010-08-31					
BARR-10-0015-SC	2010-09-01					
BARR-10-0025-SC	2010-09-01					
LAND-10-0015-SC	2010-09-01					
VALD-10-0015-SC	2010-09-01					
BERRY-10-0015-SC	2010-09-02					
AUTH-10-27-SEPT-	2010-09-27					
BERRY-10-27SEPT-	2010-09-27					
MATA-10-27SEPT-SC	2010-09-27					
AMOS-10-3009-SC	2010-09-30					
BARR-10-3009B-	2010-09-30					
BARR-10-3009-SC	2010-09-30					
ESKA-10-3009-SC	2010-09-30					
LAND-10-3009-SC	2010-09-30					
VALD-10-3009-SC	2010-09-30					
AMOS-10-27OCT-SC	2010-10-26	2011-10-03	61.51	2011-07-07	12.8	-14.23
AUTH-10-25OCT-SC	2010-10-26	2011-10-07	86.27	2011-07-07	13	-16.86
BARR-10-26OCT1-SC	2010-10-26	2011-10-07	65.93	2011-08-08	11.4	-14.28
BARR-10-26OCT-SC	2010-10-26	2011-10-07	84.57	2011-08-08	13.7	-17.03
BERR-10-25OCT-SC	2010-10-26	2011-10-07	61.35	2011-07-07	11.6	-14.36
ESKA-10-27OCT-SC	2010-10-26	2011-10-07	73.38	2011-08-08	12.5	-15.54
LAND-10-26OCT-SC	2010-10-26	2011-10-13	67.66	2011-07-07	11.1	-14.43
MATA-10-25OCT-SC	2010-10-26	2011-10-26	58.32	2011-08-08	9.4	-14.86
VALD-20-26OCT-SC	2010-10-26	2011-11-21	79.35	2011-08-08	14.8	-16.08

A.4.5 Données de tritium ^3H pour l'année 2010, données classées

ID échantillon	Date analyse ^3H	^3H (UT)
AMOS-10-001SC	2011-07-07	10.6 ± 0.9
AMOS-10-27OCT-SC	2011-07-07	12.8 ± 1
AUTH-10-001SC	2011-07-07	11.8 ± 1
AUTH-10-25OCT-SC	2011-07-07	13 ± 1.1
BARR-10-001SC	2011-08-08	13.5 ± 1.1
BARR-10-001-SC	2011-08-08	14.9 ± 1.2
BARR-10-26OCT1-SC	2011-08-08	11.4 ± 0.9
BARR-10-26OCT-SC	2011-08-08	13.7 ± 1.1
BERR-10-25OCT-SC	2011-07-07	11.6 ± 1
BERRY-10-006-SC	2011-07-07	12.4 ± 1
ESKA-10-001SC	2011-08-08	14 ± 1.2
ESKA-10-27OCT-SC	2011-08-08	12.5 ± 1
LAND-10-001-SC	2011-07-07	11.9 ± 1
LAND-10-26OCT-SC	2011-07-07	11.1 ± 0.9
MATA-10-25OCT-SC	2011-08-08	9.4 ± 0.8
VALD-10-002-SC	2011-07-07	13.8 ± 1.1
VALD-20-26OCT-SC	2011-08-08	14.8 ± 1.2