





**Étude de la chimie analytique de l'eau souterraine lors de la purge à haut débit d'un puits  
avec suivi des paramètres mesurés in situ**

**Par**

**Laura-Pier Perron Desmeules**

**Sous la direction de Julien Walter, ing., Ph.D. et Romain Chesnaux, ing., Ph.D.**

**Mémoire présenté à L'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de  
Maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.) en géologie et génie géologique (1666)**

Québec, Canada

© Laura-Pier Perron-Desmeules, 2024

## RÉSUMÉ

Le Programme d'Acquisition des Connaissances en Eaux Souterraines (CERM-PACES) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDELCC) a permis la collecte de plus de 3000 échantillons d'eau souterraine selon un protocole uniformisé à l'échelle du Québec méridional. Ce protocole inclut une purge des puits échantillonnés à débit élevé (~10 à 40L/min) et le suivi des paramètres in situ (température, pH, oxygène dissous, potentiel d'oxydoréduction, et conductivité électrique spécifique) préalablement à l'échantillonnage. Lorsque les paramètres in situ sont jugés stables par les échantillonneurs, la purge est considérée comme complétée. Il est rare que la stabilisation soit parfaitement atteinte et l'observation de variations dans ces paramètres lors de la purge soulève plusieurs questions, notamment celle de la nature de la relation entre les variations temporelles des paramètres in situ et l'évolution de la chimie analytique.

Les objectifs de ce projet sont de 1) décrire et quantifier l'évolution de la chimie analytique (analyse des isotopes, des éléments majeurs, mineurs et traces) des eaux souterraines au fur et à mesure de la purge, 2) tester différents traceurs de l'eau souterraine et de 3) proposer des hypothèses quant à l'origine probable des variations. Pour répondre à ces objectifs, 45 échantillons d'eau ont été prélevés en 2021 dans 3 stations (15 échantillons par station) et ont été analysés pour près de 60 éléments chimiques. Les échantillons ont été pris à un pas de temps constant (aux 5 minutes) tout au long d'une purge à haut débit de 75 minutes. Les puits des trois stations sont localisés dans trois contextes hydrogéologiques distincts du territoire de Lanaudière (2) et de la Mauricie (1). Le puits de la première station, celle de Saint-Zénon dans Lanaudière, est installé dans le roc précambrien fracturé et l'aquifère est en contact direct avec un aquifère granulaire (sables et graviers fluvioglaciaires) à nappe libre. Le puits de Mandeville (Lanaudière) est pour sa part en condition confinée puisqu'on retrouve une dizaine de mètres de silt-argileux au-dessus du roc fracturé. Le puits de la station de Saint-Adelphe présente une stratigraphie légèrement plus complexe dans laquelle on retrouve 10 mètres de sable sur 25 mètres d'argile qui surplombe le roc dans lequel le puits est installé. La composition chimique en termes d'éléments majeurs, mineurs, traces (terres rares et métaux lourds), et isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{13}\text{C}$ ) de l'eau souterraine a été obtenue à l'aide de méthodes analytiques permettant de très basses limites de détection dans un laboratoire d'analyses chimiques agréé.

Le projet a utilisé une approche exploratoire qui a permis de mettre en évidence l'efficacité des terres rares et des isotopes comme traceurs hydrogéologiques lors d'un pompage à haut débit sur une courte durée. Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que la stabilisation des paramètres in situ ne signifie pas nécessairement la stabilité de la chimie des eaux souterraines. Les variations spatiales et temporelles observées dans ce projet ont des sources et des origines diverses qui peuvent être séparées en deux groupes principaux : (1) Influence du contexte hydrogéologie et de la géologie locale et (2) influence de la purge à haut débit. Le contexte hydrogéologique et le temps de résidence de l'eau sont à l'origine des concentrations retrouvées pour la plupart des éléments majeurs analysés ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , etc..). Les patrons de terres rares reflètent la composition des roches de la zone de recharge. Les connexions hydrauliques (naturelles ou induites) dans les différents contextes peuvent être exacerbées par le changement de régime hydraulique occasionné par le pompage du puits occasionnant ainsi un changement dans la chimie de l'eau souterraine par mélange d'eaux de différentes compositions chimiques et ce, plus particulièrement en contexte de nappe libre. Ce projet est une première étape vers une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques ayant lieu durant l'utilisation d'un système d'alimentation en eau potable domestique.

## TABLE DES MATIÈRES

|   |     |
|---|-----|
| <b>RÉSUMÉ</b> .....   | ii  |
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....   | iii |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....   | v   |
| <b>LISTE DES FIGURES</b> .....  | vi  |
| <b>REMERCIEMENTS</b> .....  | ix  |
| <b>CHAPITRE 1</b> .....   | 1   |
| <b>INTRODUCTION</b> .....   | 1   |
| 1.1 MISE EN CONTEXTE .....  | 1   |
| 1.2 PROBLÉMATIQUE .....   | 6   |
| 1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE .....  | 9   |
| <b>CHAPITRE 2</b> .....   | 10  |
| <b>DESCRIPTION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE</b> .....  | 10  |
| 2.1 LOCALISATION .....  | 10  |
| 2.2 GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX .....   | 11  |
| 2.3 GÉOLOGIE DES DÉPOTS DE SURFACE .....  | 14  |
| 2.4 CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONAUX .....  | 14  |
| 2.5 DESCRIPTION DES SITES À L'ÉTUDE .....   | 18  |
| <b>CHAPITRE 3</b> .....   | 23  |
| <b>MATÉRIEL ET MÉTHODES</b> .....   | 23  |
| 3.1 ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU SOUTERRAINE ET SUIVI DES PARAMÈTRES<br>MESURÉS IN SITU ..... | 23  |
| 3.2 TECHNIQUES ANALYTIQUES .....  | 27  |
| <b>CHAPITRE 4</b> .....   | 29  |
| <b>RÉSULTATS ET PRÉSENTATION DES VARIATIONS SPATIALES ET<br/>TEMPORELLES</b> .....        | 29  |
| 4.1 ÉLÉMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES .....   | 29  |
| 4.2 PARAMÈTRES IN SITU .....  | 42  |
| 4.3 ISOTOPES .....  | 46  |
| 4.4 ÉLÉMENTS TERRES RARES .....   | 48  |
| 4.5 VARIATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES PARAMÈTRES MESURÉS IN<br>SITU .....              | 50  |
| 4.6 VARIATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DE LA COMPOSITION<br>ISOTOPIQUE .....             | 51  |

|   |     |
|---|-----|
| 4.7 VARIATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS MAJEURS ET MINEURS .....  | 55  |
| 4.8 VARIATION TEMPORELLE DE LA SIGNATURE EN ÉLÉMENTS TERRES RARES (ETRs).....   | 69  |
| <b>CHAPITRE 5</b> .....   | 74  |
| <b>DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS</b> .....  | 74  |
| 5.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....  | 74  |
| 5.2 RECOMMANDATIONS .....   | 83  |
| <b>CHAPITRE 6</b> .....   | 86  |
| <b>CONCLUSION</b> .....   | 86  |
| <b>LISTE DE RÉFÉRENCES</b> .....  | 89  |
| <b>ANNEXE 1</b> .....   | 92  |
| ZONES MORPHOSEDIMENTOLOGIQUES DU CGQ.....   | 92  |
| NOMBRE DE DETECTION, LIMITES DE DETECTION, CONCENTRATIONS MINIMALES, MEDIANES ET MAXIMALES POUR LES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES ANALYSES A SAINT-ZENON.....                           | 98  |
| <b>ANNEXE 2.2</b> .....   | 99  |
| NOMBRE DE DETECTION, LIMITES DE DETECTION, CONCENTRATIONS MINIMALES, MEDIANES ET MAXIMALES POUR LES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES ANALYSES A MANDEVILLE .....                           | 99  |
| <b>ANNEXE 2.3</b> .....   | 100 |
| NOMBRE DE DETECTION, LIMITES DE DETECTION, CONCENTRATIONS MINIMALES, MEDIANES ET MAXIMALES POUR LES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES ANALYSES A SAINT-ADELPHE .....                        | 100 |
| <b>ANNEXE 3.1</b> .....   | 101 |
| CONCENTRATIONS EN ELEMENTS TERRES RARES DE LA STATION DE SAINT-ZENON .....  | 101 |
| <b>ANNEXE 3.2</b> .....   | 103 |
| CONCENTRATIONS EN ELEMENTS TERRES RARES DE LA STATION DE SAINT-ADELPHE.....   | 103 |
| <b>ANNEXE 4</b> .....   | 105 |
| RESUME DES CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTABLES (CMA) ET DES OBJECTIFS ESTHETIQUES (OE) RECOMMANDES PAR SANTE CANADA AINSI QUE LES CONCENTRATIONS MAXIMALES (CM) PRESCRITES PAR LE RQEP ..... | 105 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| TABLEAU 1- 1 : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ANALYSES PAR LABORATOIRE VERITAS .....  | 3  |
| TABLEAU 1- 2 : CRITERES DE STABILITE DES PARAMETRES IN SITU (TIRE DU CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE EXPERIMENTALE DU QUEBEC, 2011).....  | 5  |
| TABLEAU 2- 1 : STRATIGRAPHIE DES ROCHES DU SOCLE ROCHEUX DE LA PROVINCE DE GRENVILLE ET DE LA PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT (MODIFIEE DE CERM, 2022) .   | 13 |
| TABLEAU 4- 1: STATISTIQUES REGIONALES (LANAUDIERE ET EST DE LA MAURICIE) POUR LES DIFFERENTS ANALYSES DANS LE CADRE DE CE PROJET. LES OBJECTIFS ESTHETIQUES (OE) ET LES CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTABLES (CMA) DU RQEP SONT AUSSI PRESENTES.....  | 32 |
| TABLEAU 4- 2: PARAMETRES IN SITU (TEMPERATURE, PH, EH CONDUCTIVITE ELECTRIQUE SPECIFIQUE, TDS ET OXYGENE DISSOUT) POUR LES ECHANTILLONS DES STATIONS DE SAINT-ADELPHE, MANDEVILLE ET SAINT-ZENON .....  | 44 |
| TABLEAU 4- 3: MOYENNES ET ECARTS TYPES POUR LES VALEURS DE $\Delta 2H$ , $\Delta 18O$ ET $\Delta 13C$ POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON (2020 ET 2021), MANDEVILLE (2021) ET SAINT-ADELPHE (2021).....   | 47 |
| TABLEAU 4- 4: POURCENTAGE DES ECHANTILLONS QUI PRESENTENT DES VARIATIONS SIGNIFICATIVES (>5%, >10% ET >20%) SUITE A L'ATTEINTE DE LA STABILISATION DES PARAMETRES. LES STATISTIQUES SONT CALCULEES EN CONSIDERANT LA CONCENTRATION OBTENUE LORS DE LA STABILISATION COMME VALEUR DE REFERENCE ..... | 61 |
| TABLEAU 5- 1: SYNTHESE DES POINTS SAILLANTS POUR LES STATIONS DE SAINT-ADELPHE, SAINT-ZENON ET MANDEVILLE .....   | 74 |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| FIGURE 1-1 : COUVERTURE TERRITORIALE DE LA CONNAISSANCE SUR LES EAUX SOUTERRAINES (TIRÉE DE CERM-UQAC (2013) ET MODIFIÉE DE MDELCC (2012)).....   | 1  |
| FIGURE 1-2 : TYPE D'AQUIFÈRE DES PUIXS ÉCHANTILLONNÉS DANS LANAUDIÈRE ET EN MAURICIE À L'ÉTÉ 2019. TIRÉE DE CERM-UQAC (2020).....   | 2  |
| FIGURE 1-3 : CELLULE D'ÉCOULEMENT DE L'ÉQUIPE DU PACES LAMEMCN .....  | 6  |
| FIGURE 2- 1: SITES D'ÉTUDES DANS LES RÉGIONS DE LANAUDIÈRE ET DE LA MAURICIE AU QUÉBEC, CANADA.....   | 10 |
| FIGURE 2- 2 : PROVINCES GÉOLOGIQUES DES RÉGIONS DE LANAUDIÈRE ET DE L'EST DE LA MAURICIE. LES ÉTOILES REPRÉSENTENT LES STATIONS À L'ÉTUDE. ....   | 11 |
| FIGURE 2- 3 : GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX DES RÉGIONS DE L'EST DE LA MAURICIE ET DE LANAUDIÈRE. LES ÉTOILES REPRÉSENTENT LES STATIONS À L'ÉTUDE (DONNÉES PROVENANT DE CERM, 2002).....  | 12 |
| FIGURE 2- 4: CARTE DES DÉPÔTS DU QUATÉRNAIRE (DONNÉES TIRÉES DU CERM, 2022).....  | 15 |
| FIGURE 2- 5: : COUPE CONCEPTUELLE DES GRANDS ENSEMBLES GÉOMORPHOLOGIQUES ET GÉOLOGIQUES DE LANAUDIÈRE (CERM-PACES 2022) .....   | 16 |
| FIGURE 2- 6 : MODÈLE CONCEPTUEL SIMPLIFIÉ EXPLIQUANT L'UTILISATION DU JEU DE COULEUR DE LA CARTE DES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES AFIN DE DÉCRIRE LES MILIEUX AQUIFÈRES AFFLEURANTS EN SURFACE ET INTERPRÉTÉS EN PROFONDEUR. (CERM-PACES 2022).....                           | 17 |
| FIGURE 2- 7 : CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONAUX (TIRÉE DE CERM, 2022). LES ÉTOILES REPRÉSENTENT LA LOCALISATION DES STATIONS.....  | 18 |
| FIGURE 2- 8: CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE POUR LA STATION DE SAINT-ZÉNON. ON Y RETROUVE MAJORITAIREMENT DES DÉPÔTS DE TILL D'ORIGINE GLACIAIRE REPOSANT SUR LE ROC. DES DÉPÔTS FLUVIOGLACIAIRES SONT VISIBLES DANS LA VALLÉE À L'EST DE LA STATION AINSI QUE DES DÉPÔTS..... | 19 |
| FIGURE 2- 9: CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE DE LA STATION DE MANDEVILLE. LA STATION EST SITUÉE DANS UN ENVIRONNEMENT DOMINÉ PAR LES DÉPÔTS GLACIOMARINS (DÉLTAÏQUES ET PRO-DÉLTAÏQUES). DES SÉDIMENTS ALLUVIAUX PLUS RÉCENTS SONT ÉGALEMENT PRÉSENTS EN SURFACE. ....          | 20 |
| FIGURE 2- 10: CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE DE LA STATION DE SAINT-ADELPHÉ LOCALISÉE DANS LE PIEDMONT. ELLE SE CARACTÉRISE PAR LA PRÉSENCE DE SÉDIMENTS FINS D'EAU PROFONDE (MER DE CHAMPLAIN) SURMONTÉS PAR DES SÉDIMENTS ALLUVIAUX ANCIENS (RIVIÈRE BATISCAN).....          | 21 |
| FIGURE 2- 11: CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES DES STATIONS DE SAINT-ZÉNON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHÉ.....  | 22 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 3- 1: ORGANIGRAMME SIMPLIFIE DU PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE POUR LA CAMPAGNE 2021 .....   | 25 |
| FIGURE 3- 2: SCHEMA DE LA CELLULE D'ECOULEMENT ET DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE .....   | 26 |
| FIGURE 4- 1: CONCENTRATIONS EN ETRS NORMALISEES A LA CROUTE CONTINENTALE MOYENNE (CCM) POUR LES STATIONS DE (A) SAINT-ZENON ET (B) SAINT-ADELPHE. CHAQUE COULEUR REPRESENTE UN DES 15 ECHANTILLONS D'UNE MEME STATION. LES CONCENTRATIONS SOUS LES LIMITES DE DETECTION NE SONT PAS PRESENTEES.  | 49 |
| FIGURE 4- 2: DIAGRAMME BINAIRE DE $\Delta^2\text{H}$ VS. $\Delta^{18}\text{O}$ . LA DROITE METEORIQUE LOCALE A ETE OBTENUE A PARTIR DES DONNEES DU PACES-LAMEMCN (CERM-PACES 2022) .....   | 52 |
| FIGURE 4- 3: DIAGRAMME BINAIRE DE $\Delta^2\text{H}$ VS. $\Delta^{18}\text{O}$ . LES ELLIPSES REPRESENTENT LES PROCESSUS HYDROGEOCHIMIQUES DOMINANTS DES EAUX SOUTERRAINES (MODIFIES DE TREMBLAY ET AL. 2021) .....  | 53 |
| FIGURE 4- 4: $\Delta^{13}\text{C-DIC}$ EN FONCTION DU TEMPS (MIN) POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON (2020-2021), MANDEVILLE (2021) ET SAINT-ADELPHE (2021).....   | 54 |
| FIGURE 4- 5: GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DU TEMPS (BARYUM, BORE, CADMIUM, CALCIUM, CUIVRE, FER, LITHIUM, MAGNESIUM, MANGANESE, MOLYBDENE, NICKEL, PLOMB, POTASSIUM, SELENIUM, SODIUM, STRONTIUM, URANIUM ET ZINC) DE LA STATION DE SAINT-ZENON. LES LIGNES VERTICALES ROUGES REPRESENTENT LE MOMENT OU LA STABILISATION DES PARAMETRES MESURES IN SITU A ETE CONSTATEE POUR LA PREMIERE FOIS..... | 56 |
| FIGURE 4- 6: GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DU TEMPS (BARYUM, BORE, CADMIUM, CALCIUM, CUIVRE, FER, LITHIUM, MAGNESIUM, MANGANESE, MOLYBDENE, NICKEL, PLOMB, POTASSIUM, SELENIUM, SODIUM, STRONTIUM, URANIUM ET ZINC) DE LA STATION DE MANDEVILLE. LES LIGNES VERTICALES ROUGES REPRESENTENT LE MOMENT OU LA STABILISATION DES PARAMETRES MESURES IN SITU A ETE CONSTATEE POUR LA PREMIERE FOIS.....  | 57 |
| FIGURE 4- 7: GRAPHIQUE ADIMENSIONNEL DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DU TEMPS (BARYUM, BORE, CADMIUM, CALCIUM, CUIVRE, FER, LITHIUM, MAGNESIUM, MANGANESE, MOLYBDENE, NICKEL, PLOMB, POTASSIUM, SELENIUM, SODIUM, STRONTIUM, URANIUM ET ZINC) DE LA STATION SAINT-ADELPHE. LES LIGNES VERTICALES ROUGES REPRESENTENT LE MOMENT OU LA STABILISATION DES PARAMETRES MESURES IN SITU A ETE CONSTATEE POUR LA PREMIERE FOIS.....  | 58 |
| FIGURE 4- 8: CONCENTRATIONS EN CALCIUM (MG/L) EN FONCTION DU TEMPS PASSE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHE.....   | 62 |
| FIGURE 4- 9: CONCENTRATIONS EN STRONTIUM (MG/L) EN FONCTION DU TEMPS PASSE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHE.....   | 64 |
| FIGURE 4- 10: RATIO CALCIUM/STRONTIUM ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$ ) EN FONCTION DU TEMPS PASSE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHE.....   | 66 |



|  |    |
|--|----|
| FIGURE 4- 11: CONCENTRATIONS EN MANGANESE (MG/L) EN FONCTION DU TEMPS PASSE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHÉ.....  | 67 |
| FIGURE 4- 12: DIAGRAMME BINAIRE DU MANGANESE ET DU $\Delta^{13}C$ POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHÉ .....  | 67 |
| FIGURE 4- 13: RATIO SODIUM SUR CALCIUM (NA/CA) EN FONCTION DU TEMPS ECOULE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON, MANDEVILLE ET SAINT-ADELPHÉ.....   | 68 |
| FIGURE 4- 14: ÉVOLUTION DES (A) CONCENTRATIONS TOTALES EN ETRS ET (B) RATION ER/ND EN FONCTION DU TEMPS PASSE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON ET SAINT-ADELPHÉ .....   | 71 |
| FIGURE 4- 15: ÉVOLUTION DES TERRES RARES LEGERES (ND), MOYENNES (GD) ET LOURDES (YB) EN FONCTION DU TEMPS PASSE PENDANT LA PURGE POUR LES STATIONS DE SAINT-ZENON(A) ET DE SAINT-ADELPHÉ(B) .....  | 72 |
|  |    |
| FIGURE 5- 1: CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE SAINT-ZENON. L'AQUIFERE POMPE EST DANS LE SOCLE ROCHEUX FRACTURE ET EST SURMONTE D'UN AQUIFERE GRANULAIRE A NAPPE LIBRE. LES CONNEXIONS HYDRAULIQUES POTENTIELLES NATURELLES ET ANTHROPIQUES SONT PRESENTEES EN ROUGE (MODIFIEE DE RICHARD, 2014).....    | 77 |
| FIGURE 5- 2: CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA STATION DE MANDEVILLE. LE Puits EST INSTALLE DANS LE ROC GNEISSIQUE FRACTURE SURMONTE D'UNE COUCHE DE SILT-ARGILEUX. LES LIGNES ROUGES REPRESENTENT LA CONTRIBUTION POTENTIELLE DE DIFFERENTES FRACTURES. MODIFIEE DE RICHARD (2014) .....             | 78 |
| FIGURE 5- 3: CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA STATION DE SAINT-ADELPHÉ. LA SEQUENCE STRATIGRAPHIQUE EST COMPOSEE DE SABLE, D'ARGILE ET DE ROC FRACTURE. LE Puits EST INSTALLE DANS LE ROC. LES FLECHES ROUGES REPRESENTENT LES CONNEXIONS HYDRAULIQUES POTENTIELLES (MODIFIEE DE RICHARD, 2014)..... | 80 |
| FIGURE 5- 4: ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN STRONTIUM (GAUCHE) ET EN MANGANESE (DROITE) EN FONCTION DU TEMPS (MIN). LES LIGNES ROUGES PRESENTENT LES CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTABLES (CMA) ET LES OBJECTIFS ESTHETIQUES (OE).....  | 84 |

## REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier et exprimer toute ma reconnaissance à mes co-directeurs, M. Julien Walter et M. Romain Chesnaux qui m'ont donné cette merveilleuse opportunité. Je remercie énormément mon co-directeur de recherche, Romain, pour son humanité, sa bienveillance, sa patience et sa rigueur. Je remercie de tout mon cœur Julien, pour son dévouement, sa disponibilité, sa générosité dans son partage de connaissance et de m'avoir pris sous son aile. Grâce à vous, j'ai trouvé ma place dans un domaine où science et connaissances riment avec humanité et dans lequel la géologie est au service de la vie. Merci d'avoir fait de moi un meilleur humain.

Je tiens également à remercier Mme Mélanie Lambert, pour sa précieuse écoute, ses judicieux conseils ainsi que toute la confiance dont elle m'a fait preuve dans les dernières années.

Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe du PACES Lanaudière, Mauricie-Est et Moyenne-Côte-Nord qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce projet de recherche, Pierre-Luc Bilodeau, Anouck Ferroud, Roxane Tremblay et Camille Krauzman. Je remercie tout particulièrement M. Mike Bellemare, mon bras droit de terrain, avec qui j'ai passé de nombreuses heures à la préparation du terrain, à la mise sur pied du protocole et surtout à l'exécution dudit protocole. Sans oublier nos discussions interminables et tellement stimulantes. Merci d'être ce que tu es.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe du groupe de recherche « Risque Ressource Eau » (R2eau) pour les discussions constructives qui ont fait avancer ce projet de recherche.

Je souhaite remercier avec tout mon cœur les propriétaires de puits qui m'ont ouvert leur porte ainsi que leur puits. Merci de m'avoir permis de faire couler votre eau pour la science.

Finalement, je remercie tout particulièrement ceux sans qui tout cela n'aurait été possible. Mes proches. Ceux qui m'ont encouragé, soutenus et aimés tout au long de ce parcours. Tout d'abord mes merveilleux parents, Sonia et Paul-André. Vous avez cru en moi et en mes projets plus fous les uns que les autres. Vous m'avez appris que la vie est une suite d'opportunités qu'on peut saisir et que rien n'est inaccessible si on rêve assez grand. Sans votre soutien inébranlable et votre amour, je n'aurais jamais pu manger autant d'éléphants (même une bouchée à la fois). Je tiens sincèrement à remercier mon grand frère Charles (et sa douce Sophie), qui a toujours été là pour moi, dans mes meilleurs et mes pires moments. Charles, tu es une source d'inspiration pour moi et sans toi, sans tes conseils et ta confiance, je n'aurais jamais entamé cette maîtrise. J'ai une chance inouïe d'être ta petite sœur. Je tiens à remercier ma précieuse amie, Marie-Pier. Non seulement, car c'est la meilleure amie qui puisse exister, mais aussi pour sa curiosité, sa ténacité et son optimisme légendaire. Merci d'être toi. Finalement, je remercie Dominique qui a été là du début à la fin. Merci pour ton amitié et pour avoir pris soin d'Arnaud, des chats et surtout, de moi.

Je dédie ce mémoire à mes trois filleuls ; Oscar le rayon de soleil qui illumine mon cœur, Margot mon étoile qui brille de mille feux et ma douce et lumineuse Jeanne. Marraine vous aime.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 MISE EN CONTEXTE

Le Programme d'Acquisition de Connaissances en Eaux Souterraines (PACES) a été initié en 2008 par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). L'objectif principal de ce programme est de dresser un portrait des ressources en eaux souterraines des territoires municipalisés du Québec afin de les protéger et d'en assurer la pérennité (MDELCC 2022).

Depuis 2008, la quasi-totalité du Québec municipalisé a été couverte par les PACES réalisés par les différentes équipes universitaires (figure 1-1). Le Centre d'Étude sur les Ressources Minérales (CERM) de l'Université du Québec à Chicoutimi a réalisé par le passé les caractérisations hydrogéologiques des territoires du Saguenay-Lac-Saint-Jean (2009-2013) et de Charlevoix-Haute-Côte-Nord (2012-2015). En 2018, le CERM a été chargé

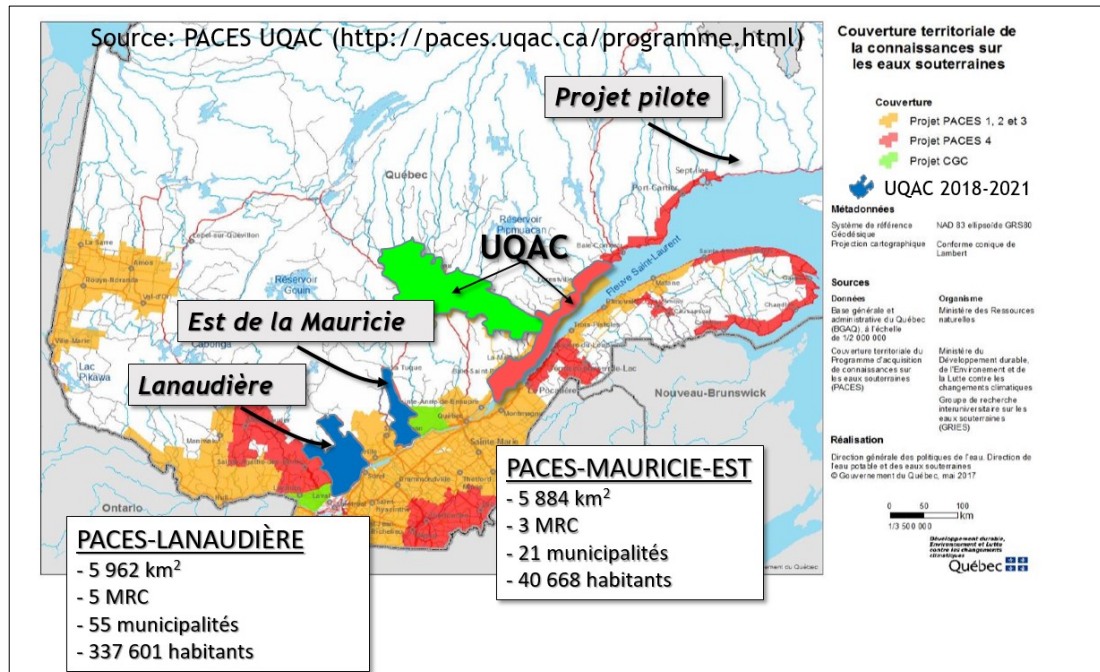
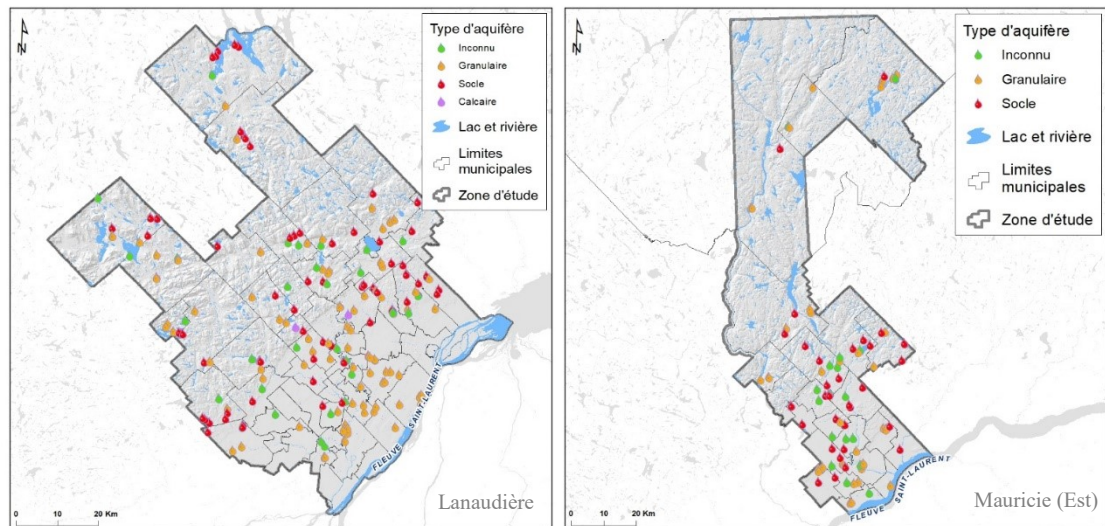


Figure 1-1 : Couverture territoriale de la connaissance sur les eaux souterraines (tirée de CERM-UQAC (2013) et modifiée de MDELCC (2012))

d'effectuer la caractérisation de l'eau souterraine dans les territoires de Lanaudière et de l'est de l'Est de la Mauricie donnant naissance au PACES-LAMEMCN.

Dans le cadre de ce projet, plusieurs travaux de terrain et de recherche ont été effectués avec l'objectif de mieux connaître la qualité et la dynamique de l'eau souterraine dans les régions de Lanaudière et de l'est de la Mauricie (figure 1-2). Une campagne d'échantillonnage à l'échelle régionale a été effectuée à l'été 2019 et a permis d'obtenir des données géochimiques sur plus de 300 échantillons bien répartis spatialement sur le territoire d'étude.



**Figure 1-2 : Type d'aquifère des puits échantillonnés dans Lanaudière et en Mauricie à l'été 2019. Tirée de CERM-UQAC (2020)**

La carte de la figure 1-2 localise l'ensemble des puits échantillonnés à Lanaudière et en Mauricie. Les points roses représentent les échantillons dans les calcaires, les points rouges ceux dans le roc cristallin (appelé « socle »), les points oranges sont ceux situés dans des aquifères granulaires et les points verts correspondent à des points d'échantillonnage où l'aquifère capté n'est pas connu du propriétaire. En tout, 317 échantillons ont été prélevés à l'été 2019, soit 212 échantillons à Lanaudière et 105 dans l'Est de la Mauricie (CERM-UQAC 2020).

Tous les échantillons récoltés pour les PACES, notamment ceux recueillis sur les territoires de la Mauricie et de Lanaudière, ont été analysés pour les 38 paramètres présentés dans le tableau 1- 1 par le laboratoire Bureau Véritas.

**Tableau 1- 1 : Paramètres physico-chimiques analysés par Laboratoire Véritas**

| Contenant                              | Paramètres  |                | Agent de conservation          | Filtration terrain |
|--|---|----------------|--------------------------------|--------------------|
| Anions<br>(Polyéthylène<br>250 ml)     | Alcalinité totale                                     |                | Aucun                          | Aucune             |
|  | Bromures (Br)   |                |                                |                    |
|  | Chlorures (Cl)  |                |                                |                    |
|  | Fluorures (F)   |                |                                |                    |
|  | Nitrites+Nitrates (NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> ) |                |                                |                    |
|  | Sulfates (SO <sub>4</sub> )                           |                |                                |                    |
| Nutriments<br>(Polyéthylène<br>250 ml) | P total inorganique (P)                               |                | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Aucune             |
| Métaux<br>(Polyéthylène<br>250 ml)     | Aluminium (Al)  | Lithium (Li)   |                                |                    |
|  | Antimoine (Sb)  | Magnésium (Mg) |                                |                    |
|  | Argent (Ag)   | Manganèse (Mn) |                                |                    |
|  | Arsenic (As)  | Molybdène (Mo) |                                |                    |
|  | Baryum (Ba)   | Nickel (Ni)    |                                |                    |
|  | Béryllium (Be)  | Potassium (K)  |                                |                    |
|  | Bismuth (Bi)  | Plomb (Pb)     |                                |                    |
|  | Bore (B)  | Sélénium (Se)  |                                |                    |
|  | Calcium (Ca)  | Silicium (Si)  |                                |                    |
|  | Cadmium (Cd)  | Sodium (Na)    |                                |                    |
|  | Chrome (Cr)   | Strontium (Sr) |                                |                    |
|  | Cobalt (Co)   | Titane (Ti)    |                                |                    |
|  | Cuivre (Cu)   | Uranium (U)    |                                |                    |
|  | Étain (Sn)  | Vanadium (V)   |                                |                    |
| Fer (Fe)                               | Zinc (Zn)   |                |                                |                    |
| Sulfures<br>(Polyéthylène<br>250 ml)   | Sulfures totaux (S)                                   |                | Acétate de Zinc+ NaOH          | Aucune             |
| Azote<br>ammoniacal<br>(Verre 50 ml)   | Azote ammoniacal (NH <sub>4</sub> )                   |                | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Aucune             |

Les données obtenues lors de la campagne d'échantillonnage 2019 du PACES ont été traitées dans le cadre de travaux de maîtrise réalisés récemment à l'UQAC (Tremblay et al. 2021). Cette caractérisation a permis de cerner différents groupes d'eau, de cartographier leur distribution spatiale et de mettre en évidence les différents processus physico-chimiques qui

contrôlent en général la géochimie (ions majeurs) de l'eau souterraine dans les secteurs de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie.

Conformément aux protocoles d'échantillonnage du PACES, préalablement à l'échantillonnage de l'eau, les puits ont été purgés jusqu'à stabilisation des paramètres in situ : température (°C), pH, oxygène dissous (mg/L ou %), potentiel d'oxydoréduction (mV), et conductivité électrique spécifique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). L'objectif de la purge est de s'assurer que toute l'eau dans la zone de prélèvement est renouvelée avant d'effectuer l'échantillonnage. Cette étape est cruciale puisque l'eau contenue dans le tubage est en contact « prolongé avec les conditions atmosphériques, de même qu'avec les parois du puits, ce qui peut altérer ses conditions physico-chimiques » (CEAE 2012). La stabilité des paramètres in situ permet donc de s'assurer que l'eau échantillonnée sera représentative de l'eau de l'aquifère au niveau du point de prélèvement.

Le type de purge utilisé lors des PACES est considéré comme étant une purge à haut débit ( $>30\text{l}/\text{min}$ ) bien que les valeurs de débit sortant lors de la purge soient généralement inférieures à 30 litres par minute (entre 10 litres et 27 litres par minute). Cela s'explique par le fait que la plupart des échantillons ont été prélevés dans des puits privés utilisés pour l'alimentation en eau potable qui sont tous munis d'une pompe permanente. Cette pompe remplit à haut débit une cuve de garde qui permet de maintenir un débit constant à l'intérieur de la maison. Le suivi des paramètres in situ et du débit sortant s'effectue à la sortie d'un robinet extérieur avec le débit contrôlé par la cuve de garde. Lorsque le niveau d'eau dans cette cuve de garde atteint un certain niveau, la pompe s'active à nouveau (à haut débit) afin de la remplir. Le débit de sortie est donc tributaire du débit de la cuve de garde alors que la purge est contrôlée par la pompe dans le puits.

Pendant cette purge, les équipes ont utilisé des sondes multiparamètres de type Hanna (modèle HI929829) afin d'effectuer le suivi des paramètres in situ de l'eau pompée. La

sonde était déposée dans une cellule d'écoulement fabriquée par les équipes d'échantillonnage (figure 1-3) dont l'objectif était de maintenir immergée la sonde multiparamètres tout au long de la purge, et d'obtenir des lectures en temps réel des paramètres in situ.

D'après le protocole établi entre les universités en charge de réaliser les projets du PACES (INRS-ETE; Université Laval; Université du Québec à Chicoutimi – UQAC; Université du Québec à Montréal – UQAM; Université du Québec à Rimouski – UQAR; Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue – UQAT; Université du Québec à Trois-Rivières – UQTR), la stabilisation des paramètres est considérée atteinte lorsque les écarts de lectures sont inférieurs aux valeurs suggérées par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et présentées dans le tableau 1- 2.

**Tableau 1- 2 : Critères de stabilité des paramètres in situ (tiré du Centre d'expertise en analyse expérimentale du Québec, 2011)**

| <b>Paramètres physico-chimiques</b>        | <b>Instruments</b>   | <b>Critères de stabilité PACES (2010)</b> |
|--|----------------------|---|
| Température (°C)                           | Sonde Hanna          | ± 0,2                                     |
| pH (unité de pH)                           |                      | ± 0,2                                     |
| Conductivité électrique spécifique (µS/cm) |                      | ± 4%                                      |
| Oxygène dissous (mg/L)                     |                      | ± 0,4                                     |
| Potentiel d'oxydoréduction (mV)            |                      | ± 20                                      |
| Turbidité                                  | Observation visuelle | Couleur et opacité homogènes              |

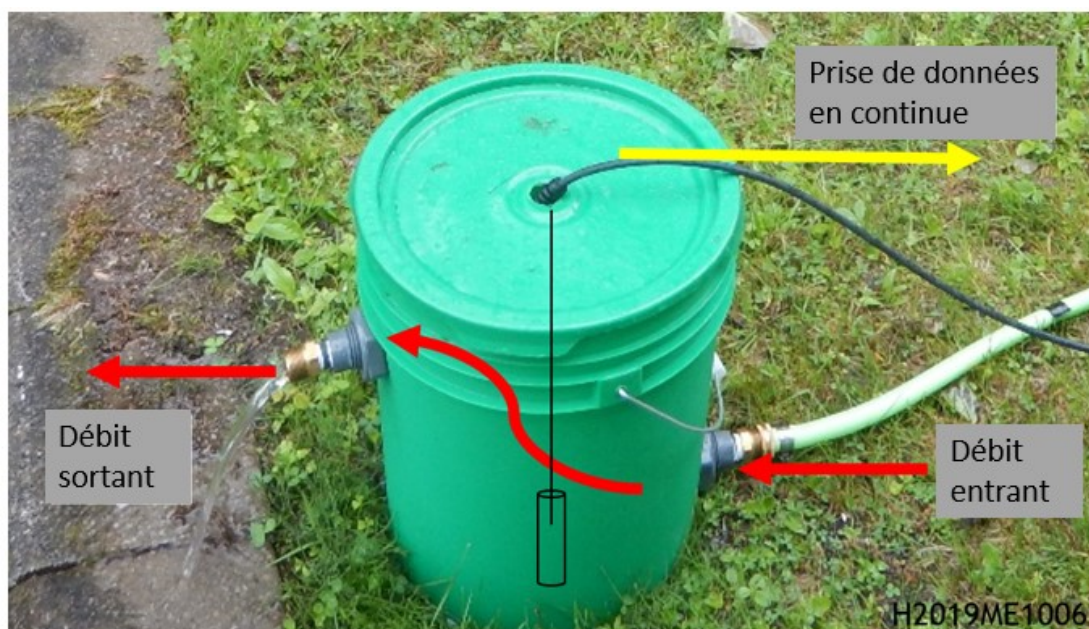


Figure 1-3 : Cellule d'écoulement de l'équipe du PACES LAMEMCN

## 1.2 PROBLÉMATIQUE

La cartographie hydrogéochimique implique l'échantillonnage d'un nombre maximum de stations de puits d'eau souterraine réparties uniformément sur le territoire. L'échantillonnage des eaux souterraines est effectué en vue de mesures in situ (pH, conductivité électrique spécifique, oxygène dissous et autres) et d'analyses en laboratoire d'une variété de paramètres physico-chimiques tels que les paramètres organiques, inorganiques, isotopiques et bactériologiques. Le choix d'une méthode d'échantillonnage appropriée garantit que les échantillons collectés sont représentatifs de l'environnement étudié et peuvent satisfaire aux objectifs de qualité des données (USGS, 2006). Les protocoles d'échantillonnage peuvent donc varier d'une localité à l'autre et d'un projet à l'autre. Certaines méthodes d'échantillonnage sont passives alors que d'autres nécessitent une purge. Des études ont été réalisées par le passé pour comparer la variabilité de la géochimie de l'eau souterraine obtenue avec des méthodes d'échantillonnage passives et suite à une purge (Jackson and Heagle 2016; Travis and Wilkins 2021).



Les méthodes sans purge utilisent un échantillonneur passif, comme un *Bailer*, qui est descendu dans l'intervalle visé pour échantillonner l'eau qui s'y écoule en raison des gradients naturels de la nappe phréatique. Dans certains cas, l'horizon visé est isolé à l'aide de ballons pneumatiques (*packer*). Cette méthode ne peut être utilisée que dans des puits non instrumentés (sans pompe). Les échantillonneurs passifs collectent des échantillons représentatifs de l'eau adjacente à l'échantillonneur (Imbrigiotta and Harte 2020). Les méthodes d'échantillonnage avec purge se regroupent en trois catégories. Premièrement, les purges volumétriques, pour lesquelles trois fois le volume du puits doit être purgé avant l'échantillonnage. Cette méthode permet de s'assurer que l'eau de la colonne d'eau présente dans la tubulure a bien été purgée. La purge volumétrique nécessite beaucoup de temps et n'est donc pas compatible avec une cartographie régionale des eaux souterraines de type PACES. Deuxièmement, les purges à faible débit (0,1 à 0,5 L/min) pour lesquelles l'objectif est de minimiser la quantité d'eau pompée afin d'éviter le rabattement du puits. Cette méthode permet d'échantillonner une eau représentative de l'aquifère intercepté tout en évitant de pomper l'eau présente dans le tubage (Imbrigiotta and Harte 2020). Encore une fois, cette technique nécessite un puits non instrumenté, un temps considérable et doit être faite à l'aide d'une pompe à très faible débit. La troisième méthode consiste en une purge jusqu'à la stabilisation des paramètres in situ. Cette méthode permet d'échantillonner efficacement et rapidement les puits domestiques munis d'une pompe submersible et c'est pourquoi elle a été sélectionnée pour les projets PACES.

L'utilisation d'un protocole d'échantillonnage avec une purge jusqu'à la stabilité des paramètres in situ a pour objectif de s'assurer que l'eau échantillonnée dans un puits soit représentative de l'eau de l'aquifère au point de prélèvement et non d'une eau dont la chimie ait pu être altérée par les conditions atmosphériques. Or, il a été mentionné précédemment que cette stabilité n'est pas toujours atteinte et que dans certaines situations, les équipes du PACES ont pu observer des variations significatives de certains paramètres in situ après une période de stabilisation selon tous les critères de stabilité du protocole d'échantillonnage.

Certains éléments chimiques (arsenic, chrome, molybdène, radium, sélénium et uranium) sont sensibles aux conditions d'oxydoréduction dans l'eau, et même un changement mineur des conditions d'oxydoréduction peut entraîner des changements significatifs dans la mobilité des éléments traces (Ayotte et al. 2011). Des changements dans les conditions d'oxydoréduction peuvent se produire, par exemple, lorsque l'eau d'un aquifère est mélangée ou remplacée par de l'eau dont la géochimie est différente. Des changements mineurs dans d'autres paramètres physico-chimiques tels que le pH de l'eau souterraine, l'échange d'ions et la complexation des ions affectent également la mobilité des éléments traces (Ayotte et al. 2011). Même mineures, ces variations peuvent être à l'origine de changements considérables dans la chimie analytique de l'eau (Ayotte et al. 2011; Omonona and Okogbue 2017). Dans cette perspective, les variations des paramètres in situ pourraient théoriquement se traduire par des changements dans la chimie analytique de l'eau lors de la purge.

Ayotte et al. (2011), a publié un résumé de cinq cas provenant du National Water-Quality Assessment Program (NAWQA), un programme de contrôle et de suivi de la qualité de l'eau souterraine pour l'ensemble des États-Unis, pour lesquels il a pu mettre en relation directe des variations des concentrations en éléments traces, notamment en Arsenic (As), avec les changements de régime hydraulique occasionnés par le pompage d'un puits.

En outre, l'observation de variations de ces paramètres in situ lors de la purge soulève plusieurs questions, notamment celle de la nature de la relation entre les variations temporelles des paramètres in situ et l'évolution de la chimie analytique (i.e. isotopes, éléments, majeurs, mineurs et traces). Ce projet vise donc l'investigation de l'impact de ces variations des paramètres in situ lors de la purge sur les paramètres mesurés en laboratoire afin de porter un regard critique et quantitatif sur le protocole utilisé couramment et communément pour l'échantillonnage de plus de 3000 échantillons sur l'ensemble du territoire couvert par les PACES.

De plus, plusieurs éléments traces se retrouvant naturellement dans l'eau souterraine, notamment l'Arsenic (As), le Fluor (F), le Manganèse (Mn) ou le Sélénium (Se) pour ne citer qu'eux, peuvent représenter une réelle menace pour la santé lors d'une exposition prolongée (une liste exhaustive des normes relatives à l'eau potable ainsi que les considérations relatives à la santé sont disponibles à l'annexe 2). Il sera donc intéressant de mieux comprendre la relation entre le pompage (la purge), les variations temporelles des paramètres in situ et l'évolution du contenu en éléments traces.

### **OBJECTIFS**

Trois objectifs sont définis afin de répondre à la problématique :

- Décrire et quantifier l'évolution de la chimie analytique (analyse des isotopes, des éléments majeurs, mineurs et traces) des eaux souterraines au fur et à mesure de la purge ;
- Identifier et tester différents éléments chimiques (traceurs de l'eau souterraine) permettant de décrire et d'interpréter les variations des paramètres
- Proposer des hypothèses quant à l'origine probable des variations des propriétés géochimiques et leurs impacts potentiels sur la santé

### **1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE**

Le chapitre 2 présente la zone d'étude ainsi qu'une description du territoire, de la géologie régionale, des dépôts de surface et des contextes hydrogéologiques propres aux sites d'études. Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée pour l'échantillonnage des trois stations ainsi que les différents paramètres analysés dans cette étude. Le chapitre 4 présente les résultats. Le chapitre 5 présente la discussion ainsi que les recommandations et le chapitre 6 les conclusions de l'étude.

## CHAPITRE 2

### DESCRIPTION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

La géologie du socle rocheux régionale et la géologie des dépôts de surface des secteurs de l'est de la Mauricie et de Lanaudière seront présentées dans ce chapitre. Il sera également question des contextes hydrogéologiques présents sur le territoire.

#### 2.1 LOCALISATION

Les stations à l'étude se situent au sud du Québec, plus précisément dans les municipalités de Saint-Zénon et de Mandeville dans la région de Lanaudière (Ouest) et à Saint-Adelphe, en Mauricie (Est) (figure 2- 1).

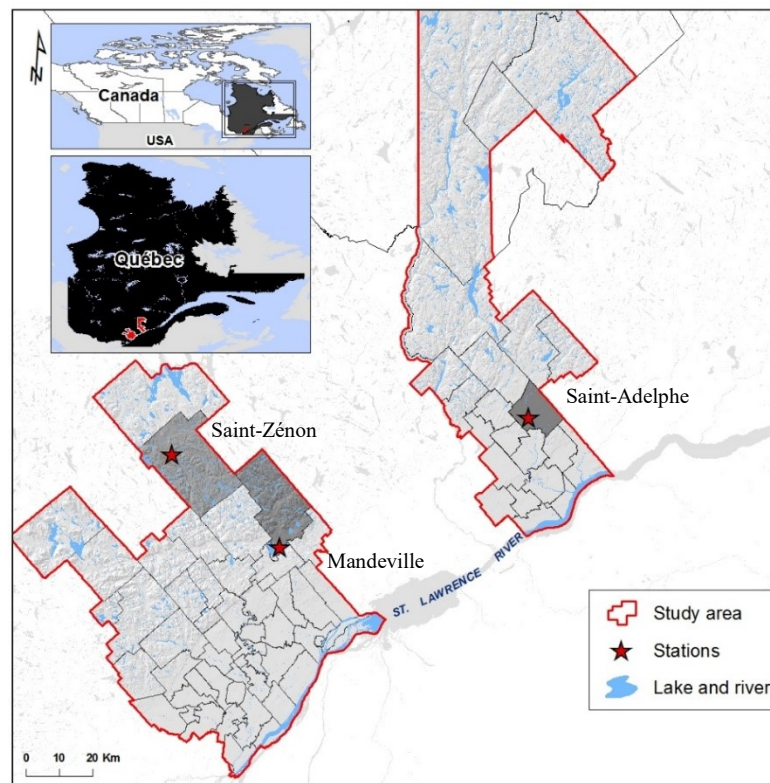


Figure 2- 1: Sites d'études dans les régions de Lanaudière et de la Mauricie au Québec, Canada

## 2.2 GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX

Les territoires à l'étude comprennent deux provinces géologiques distinctes ; au nord la province du Grenville et au sud la Plate-forme du Saint-Laurent (figure 2- 2). La Plate-forme du Saint-Laurent, âgée de 438 à 500 millions d'années repose en discordance sur les roches Grenvilliennes datées entre 1070 et 1400 millions d'années. Le tableau présente la stratigraphie simplifiée des roches du socle rocheux de la province du Grenville et de la Plate-forme du Saint-Laurent. Les lignes pointillées représentent les limites topographiques entre les Hautes-terres, le Piedmont et les Basses-Terres du Saint-Laurent.

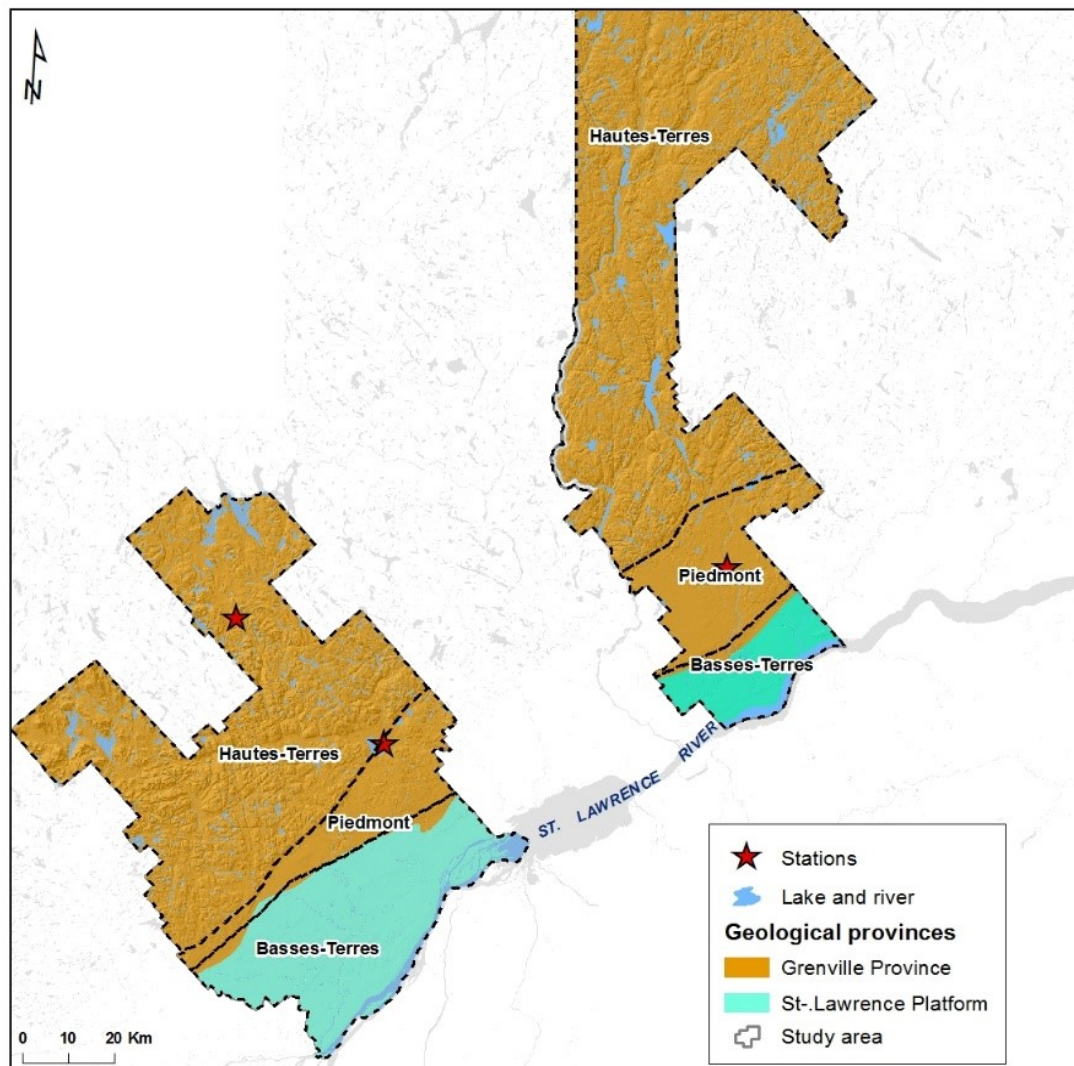


Figure 2- 2 : Provinces géologiques des régions de Lanaudière et de l'est de la Mauricie. Les étoiles représentent les stations à l'étude.

## 2.2.1 PROVINCE DU GRENVILLE

La province géologique du Grenville forme une large bande, d'environ 250 à 325 km d'épaisseur, parallèle à la vallée du Saint-Laurent. La géologie du Grenville se compose principalement de roches précambriennes d'un grade métamorphique avancé (Béland and Bergeron 1959) qui s'exprime par une déformation ductile polyphasée et une fusion partielle importante (MERN 2018). La géologie (figure 2- 3) est principalement composée de complexes gneissiques (migmatite, paragneiss, gneiss), d'unités métasédimentaires et métavolcaniques (amphibolites, quartzite, marbre et roches calco-silicatées), d'intrusions felsiques (synénite, monzonite, granite et mangérite) et d'intrusions mafiques et ultramafiques (leucroctolite, gabbro et anorthosite) (CERM-PACES 2022). Les principales lithologies du territoire à l'étude, soit des régions de Lanaudière et de l'est de la Mauricie, sont présentées en détail dans le tableau 2- 1 et sur la figure 2- 3.

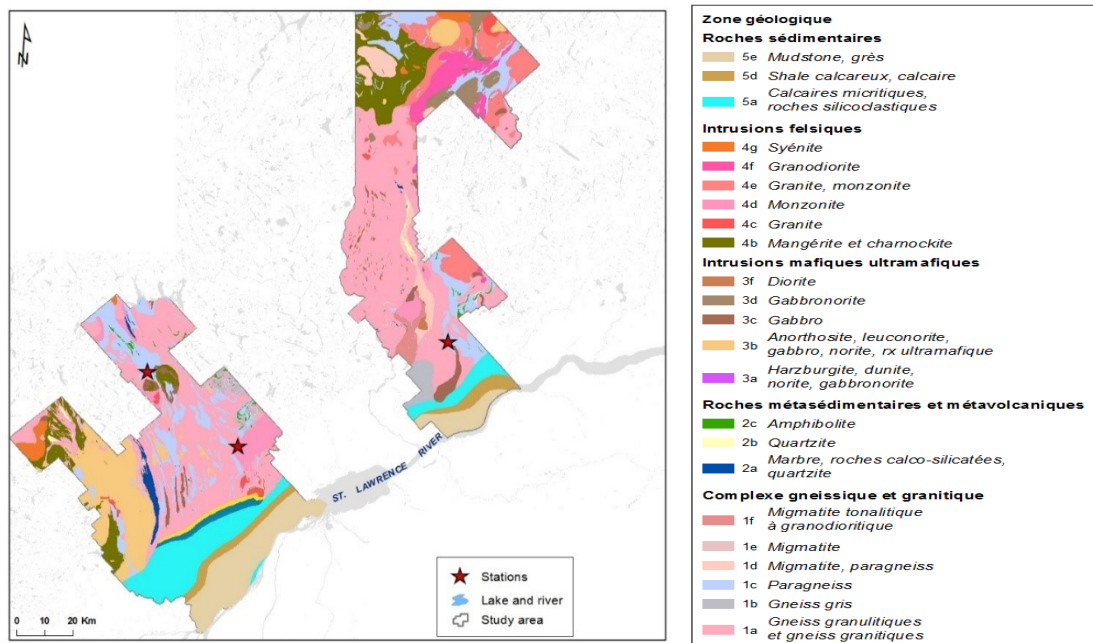


Figure 2- 3 : Géologie du socle rocheux des régions de l'est de la Mauricie et de Lanaudière. Les étoiles représentent les stations à l'étude (données provenant de CERM, 2002)

## 2.2.2 PLATE-FORME DU SAINT-LAURENT

La plate-forme du Saint-Laurent est constituée d'une séquence sédimentaire d'âge paléozoïque, de plus de 3000 mètres d'épaisseur, représentant un cycle complet de transgression et de régression marine (CERM-PACES 2022). Le bassin sédimentaire est limité au nord-ouest par la province du Grenville et au sud-est par la faille Logan, une faille de chevauchement, qui marque le contact avec la province des Appalaches d'âge cambro-ordovicien (CERM-PACES 2022). Le tableau 2- 1 présente la stratigraphie des unités sédimentaires se retrouvant sur le territoire de Lanaudière et de la Mauricie. La figure 2- 3, quant à elle présente la localisation de ces unités.

**Tableau 2- 1 : Stratigraphie des roches du socle rocheux de la province de Grenville et de la Plate-forme du Saint-Laurent (modifiée de CERM, 2022)**

| Ère         | Age (Ka)  | Groupe - formation  | Lithologie   |
|-------------|---|---|--|
| Paléozoïque | de 438 à 500  | Groupe de Lorraine – formation de Nicolet                   | Shale gris et grès   |
|             |   | Groupe d'Utica  | Shale  |
|             |   | Groupe de Trenton – formation de Neuville                   | Calcaire cristallin micritique et nodulaire (member de St-Casimir) et calcaire argileux et shale (member de Grondides) |
|             |   | Groupe de Trenton – formation de Deschambeault              | Calcaire cristallin à fossiles   |
|             |   | Groupe de Trenton – formation de Fontaine                   | Calcaire cristallin  |
|             |   | Groupe Blake River –formation Leray                         | Calcaire plus ou moins gréseux   |
|             |   | Groupe Blake River –formation de La Gabelle                 | Grès   |
|             |   | Précambrien   | 1070   |
| 1080        | Monzonite de St-Didace                                |   | Monzonite et mozogranite porphyrique   |
| 1160        | Terrane de Morin – Complexe de Saint-Paulin           |   | Gneiss non subdivisé   |
|             | Terrane de Morin – Complexe de Jésuite                |   | Roches ignée   |
| 1180        | Terrane de Morin – Paragneiss de Saint-Boniface       |   | Métasédiments détritique ou carbonaté et roches volcaniques  |
| 1370        | Domaine Mékinac Taureau – Complexe de Taureau         |   | Gneiss non subdivisé   |
|             | Domaine Mékinac Taureau – Complexe de Mékinac         |   | Orthogneiss granitique à monzonitique  |
| 1400        | Domaine Portneuf-Mauricie – Complexe de la Bostonnais | Orthogneiss gris tonalitique, granodioritique et dioritique |  |

### **2.3 GÉOLOGIE DES DÉPÔTS DE SURFACE**

Les dépôts de surface sur le territoire de Lanaudière et de l'est de la Mauricie, qui sont présentés sur la figure 2- 4, datent du Quaternaire et principalement de la dernière phase de glaciation, celle du Wisconsinien qui s'est étendue de 80 Ka à 10 ka BP (CERM-PACES 2022). Des dépôts glaciaires (till) recouvrent le socle rocheux et sont surmontés par des dépôts d'origine fluvio-glaciaire, glaciomarine, glaciolacustre et lacustre qui ont suivi la déglaciation. La transgression de la Mer de Champlain dans les Basses-Terres est à l'origine de la mise en place de dépôts d'origine marine sur une grande partie du territoire. Des dépôts plus récents, d'origine éolienne, alluviale et des milieux humides sont également présents sur le territoire. La carte de la géologie du quaternaire présentée à la figure 2- 4 a été faite à partir des données de la base de données du PACES-LAMEMCN (CERM-PACES 2022). La légende utilisée est celle de la commission géologique du Canada (CGC) et est disponible à l'annexe 1.

### **2.4 CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES REGIONAUX**

Différents contextes hydrogéologiques (9) se retrouvent dans les régions de Lanaudière et de la Mauricie et sont très bien décrits dans le rapport final du PACES (CERM-PACES 2022) de la région de Lanaudière. Seuls les contextes d'intérêt pour le projet de recherche seront décrits dans la section suivante. La figure 2- 5 est une coupe conceptuelle des grands ensembles géomorphologiques et géologiques et est tirée du rapport PACES de Lanaudière. Elle permet de conceptualiser les différents contextes qui seront décrits dans cette section.



**Milieu aquifère cristallin fracturé recouvert par une couche confinante (milieu imperméable) (1)**

Il s'agit d'un milieu rocheux cristallin fracturé qui est confiné par une unité imperméable (argiles et silts de la mer de Champlain ou silts de fond de lac).

La nappe d'eau qui s'y retrouve est captive et la recharge assez faible. La nappe confinée peut localement affleurer créant des zones propices aux milieux humides sur des secteurs où l'unité imperméable est plus mince ou absente.

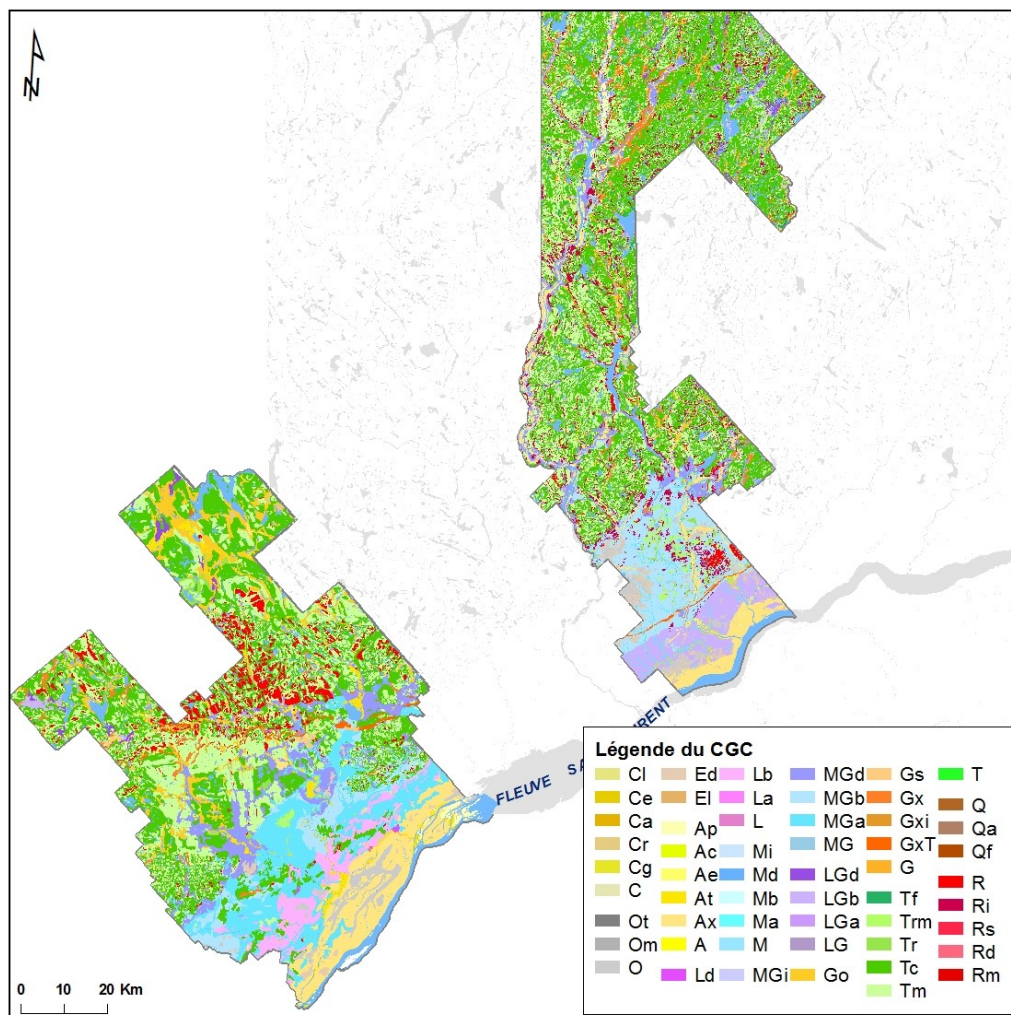


Figure 2- 4: Carte des dépôts du quaternaire (données tirées du CERM, 2022)

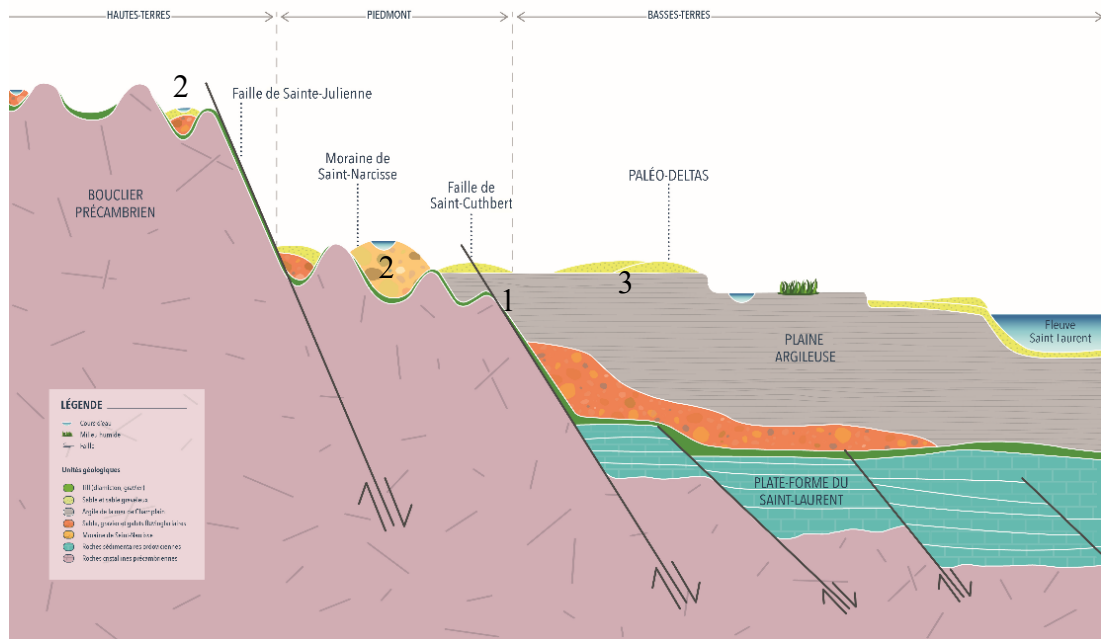


Figure 2- 5 : Coupe conceptuelle des grands ensembles géomorphologiques et géologiques de Lanaudière (CERM-PACES 2022)

***Milieu aquifère granulaire à nappe libre, en possible connexion avec les aquifères de socle rocheux fracturé (2)***

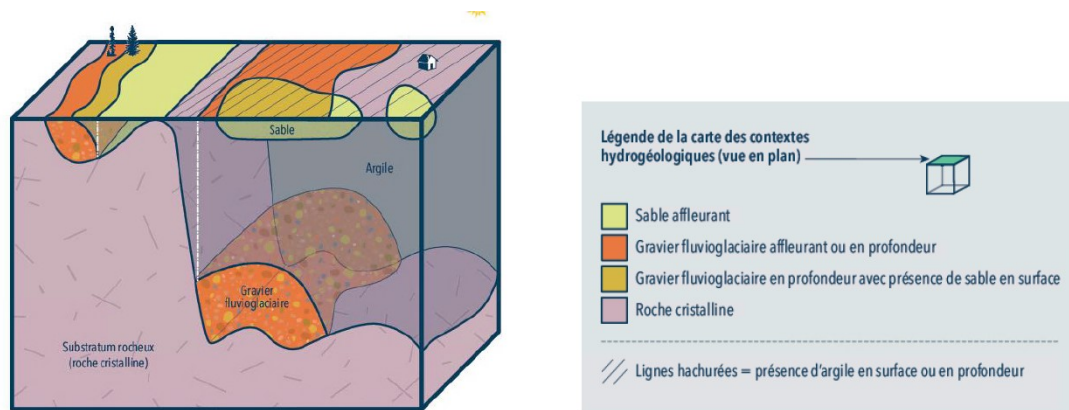
Dans ce contexte, des dépôts granulaires de surface reposent directement sur le socle rocheux cristallin (ou carbonaté). Les aquifères granulaires de surface sont caractérisés par la présence d'une nappe libre, c'est-à-dire en équilibre avec la pression atmosphérique. La recharge est relativement importante et la nappe libre affleure le long de l'hydrographie de surface (lac et rivière). Dans certains secteurs, le socle rocheux présente une forte densité de fracturation ce qui implique que la nappe de surface peut être connectée directement avec l'aquifère rocheux sous-jacent, participant ainsi à sa recharge.

***Deux aquifères perméables et semi-perméables superposés, en milieu poreux et fracturé, à nappe libre et captive (3)***

Ce contexte hydrogéologique régional comporte deux aquifères perméables séparés par un milieu imperméable (argiles et silts de la mer de Champlain ou silts déposés en fond de

lac). L'aquifère en surface est en condition libre et repose sur une unité imperméable qui confine d'éventuels aquifères dans le socle rocheux fracturé.

Les différents contextes hydrogéologiques régionaux décrits précédemment sont visibles pour l'ensemble des régions de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie, sur la figure 2-7 modifiée du CERM, 2022. La figure 2-6 présente le jeu de couleur utilisé pour représenter l'empilement stratigraphique des différents contextes hydrogéologiques sur la carte de la figure 2-7.



**Figure 2- 6 : Modèle conceptuel simplifié expliquant l'utilisation du jeu de couleur de la carte des contextes hydrogéologiques afin de décrire les milieux aquifères affleurants en surface et interprétés en profondeur. (CERM-PACES 2022)**

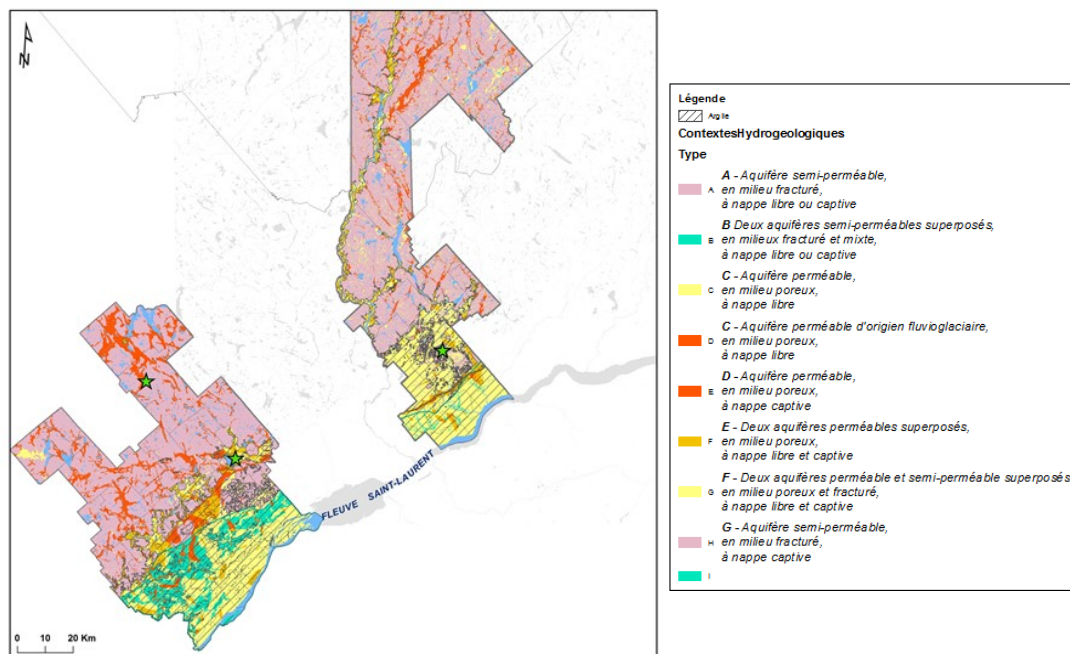


Figure 2- 7 : Contextes hydrogéologiques régionaux (tirée de CERM, 2022). Les étoiles représentent la localisation des stations.

## 2.5 DESCRIPTION DES SITES À L'ÉTUDE

Cette section présente la géologie du socle rocheux, la géologie des dépôts de surface ainsi que les contextes hydrogéologiques des trois stations à l'étude.

### 2.5.1 GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX

Le socle rocheux aux stations de Saint-Zénon et de Saint-Adelphe est composé de paragneiss, soit des roches sédimentaires ayant subi des épisodes de métamorphisme jusqu'au faciès schiste vert ou granulitique. Ces métasédiments d'âge précambrien (~1180 Ka) peuvent être d'origine détritique, carbonatée ou volcanique. La station de Mandeville quant à elle, se situe dans une unité de gneiss granulitiques/gneiss granitiques.

## 2.5.2 GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE

### *Station de Saint-Zénon*

La station de Saint-Zénon est située dans les Hautes-Terres de Lanaudière. Cet environnement est généralement dominé par le roc facturé précambrien qui est sub-affleurant ou recouvert par endroit de till mince à épais (figure 2- 8). La station se situe dans une vallée qui a été comblée par des sédiments d'épandage pro-glaciaire subaérien (GO) et les données de forage confirment la présence en profondeur d'une épaisseur non négligeable (15 mètres) de sables et graviers fluvioglaciaires. À l'est de la station, il est possible d'apercevoir des sédiments d'origine glacio-lacustre deltaïques et pro-deltaïques témoignant de la présence d'un paléo-lac à proximité du site à l'étude. La légende utilisée est celle de la commission géologique du Canada (CGC) et est disponible à l'annexe 1.

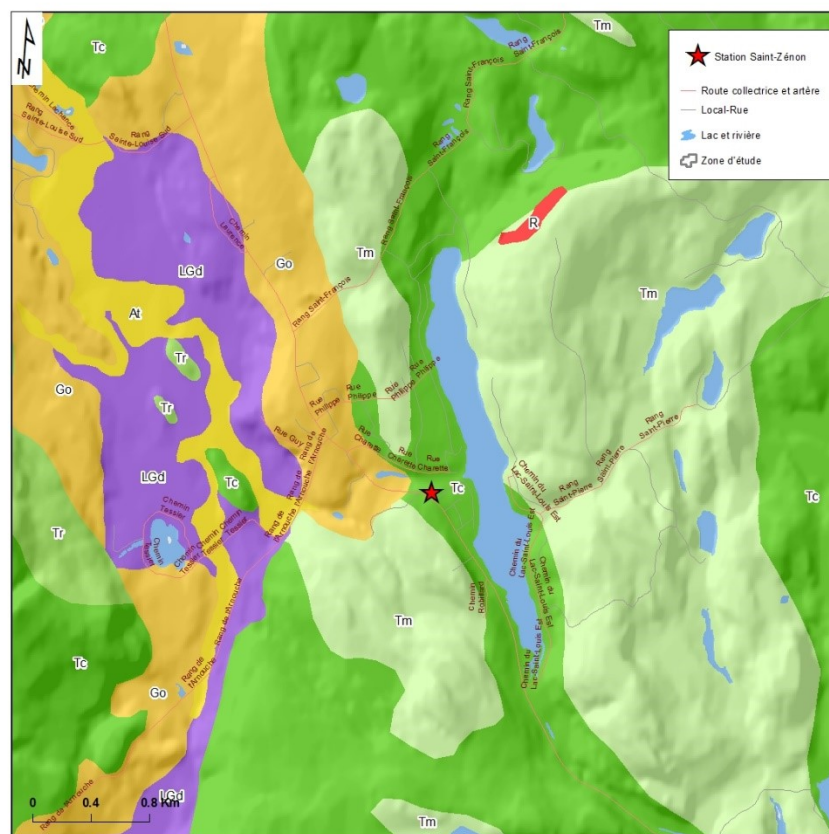


Figure 2- 8: Carte des dépôts de surface pour la station de Saint-Zénon. On y retrouve majoritairement des dépôts de till d'origine glaciaire reposant sur le roc. Des dépôts fluvioglaciaires sont visibles dans la vallée à l'est de la station ainsi que des dépôts

## Station de Mandeville

La station de Mandeville se situe à la limite entre les Hautes-Terres et le Piedmont (figure 2- 9). Cet environnement est dominé par la présence de sédiments glaciomarins témoignant de processus deltaïques et pro-deltaïques (MGd). Ces sédiments sont généralement des sables et sables graveleux s'étant mis en place à l'embouchure d'un cours d'eau se déversant dans la mer de Champlain. Ces unités comprennent localement des sédiments silto-sableux prodeltaïques comme c'est le cas à la station de Mandeville puisque la description du forage fait état de sédiments très fins comme des silts-argileux sur une épaisseur de 10 mètres. Sur la carte, on retrouve également des alluvions de terrasses fluviales (At) qui sont composés de sables, silt-sableux et de graviers contenant un peu de

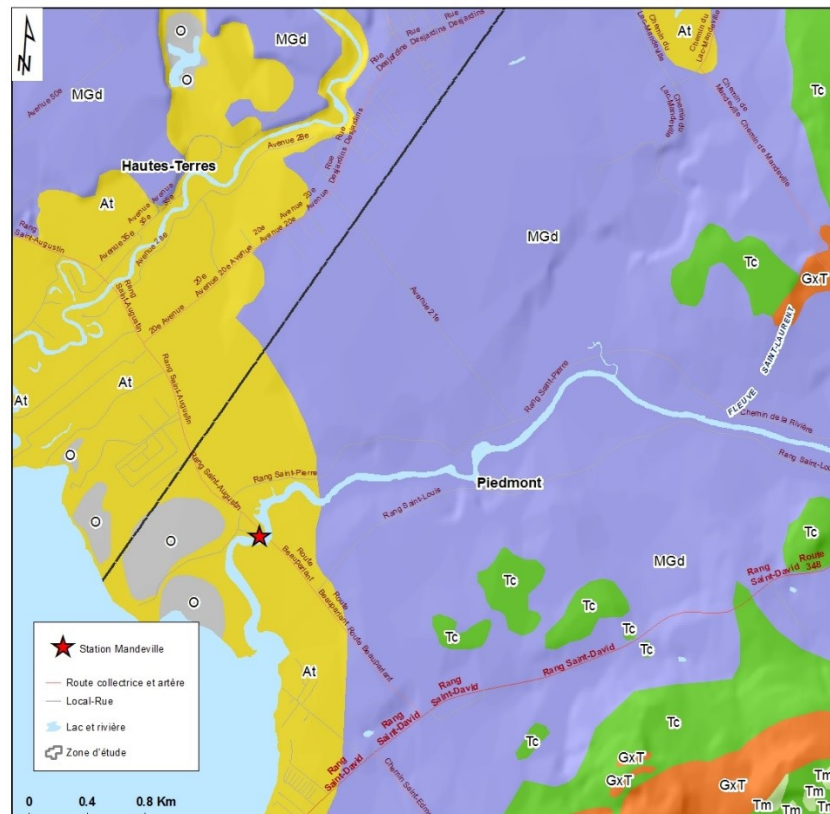


Figure 2- 9: Carte des dépôts de surface de la station de Mandeville. La station est située dans un environnement dominé par les dépôts glaciomarins (deltaïques et pro-deltaïques). Des sédiments alluviaux plus récents sont également présents en surface.

matière organique(O). La légende utilisée est celle de la commission géologique du Canada (CGC) et est disponible à l'annexe 1.

### *Station de Saint-Adelphe*

La station de Saint-Adelphe est localisée dans le Piedmont de la Mauricie, à proximité de la rivière Batiscan (figure 2- 10). L'environnement est dominé par les sédiments glaciomarins d'eau profonde (Mga) et de littoral et pré-littoral (Mgb). Par endroit, des remontées du roc avec des épaisseurs assez minces de till sont visibles. La station est située dans des alluvions de terrasse fluviale anciennes (At) qui sont généralement composées de sables, silt sableux et de matières organiques. La description du forage de cette station fait état d'environ 9 mètres d'épaisseur de sable en surface. La légende utilisée est celle de la commission géologique du Canada (CGC) et est disponible à l'annexe 1.

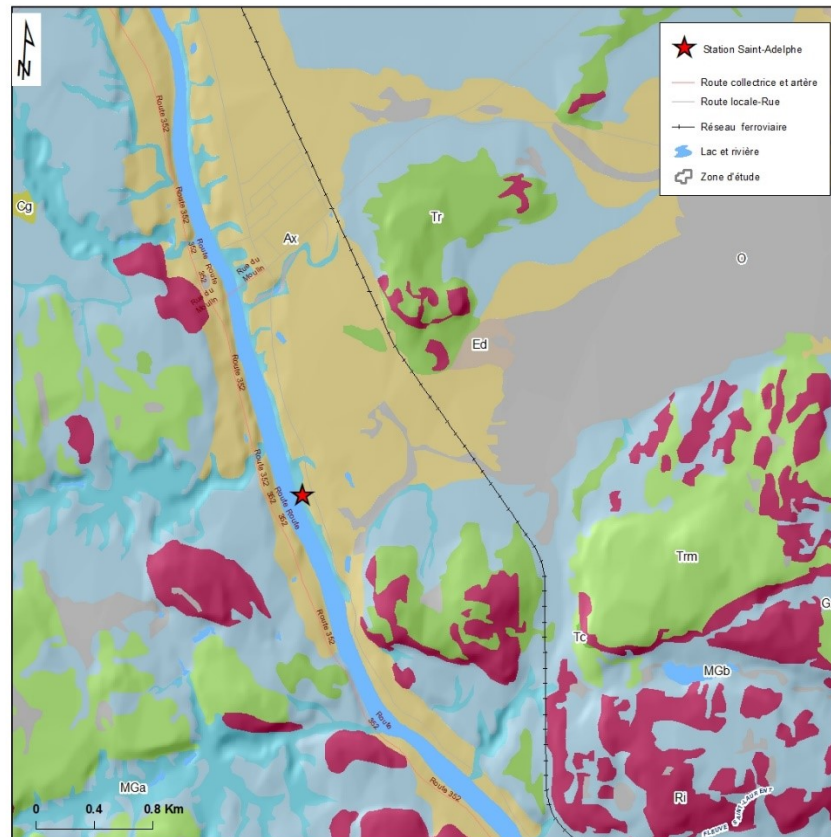


Figure 2- 10: Carte des dépôts de surface de la station de Saint-Adelphe localisée dans le Piedmont. Elle se caractérise par la présence de sédiments fins d'eau profonde (mer de Champlain) surmontés par des sédiments alluviaux anciens (rivière Batiscan).

### 2.5.3 CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES LOCAUX

Dans cette section est présentée une brève description des contextes hydrogéologiques des trois stations (figure 2- 11).

Le puits de la station de Saint-Zénon est foré dans le roc à une profondeur de 90 mètres. Il s'agit d'un milieu aquifère rocheux fracturé (sur 75 mètres) avec une nappe libre sur lequel repose une quinzaine de mètres de dépôts d'origine fluvioglaciale. L'aquifère rocheux est en possible connexion hydraulique avec l'aquifère granulaire en surface.

Le puits de la station de Mandeville est installé dans le socle rocheux avec une profondeur totale de 110 mètres. La nappe est en condition confinée en raison de la présence en surface d'une unité de silt-argileux d'environ 10 mètres.

La station de Saint-Adelphe, quant à elle, présente deux aquifères perméables ou semi-perméables superposés. Le puits est installé dans le socle rocheux fracturé en condition confinée sous une couche imperméable (25 mètres d'argile granulométrique de la mer Champlain) sur laquelle repose un aquifère sableux à nappe libre de 9 mètres d'épaisseur. La profondeur totale du puits est de 93 mètres.

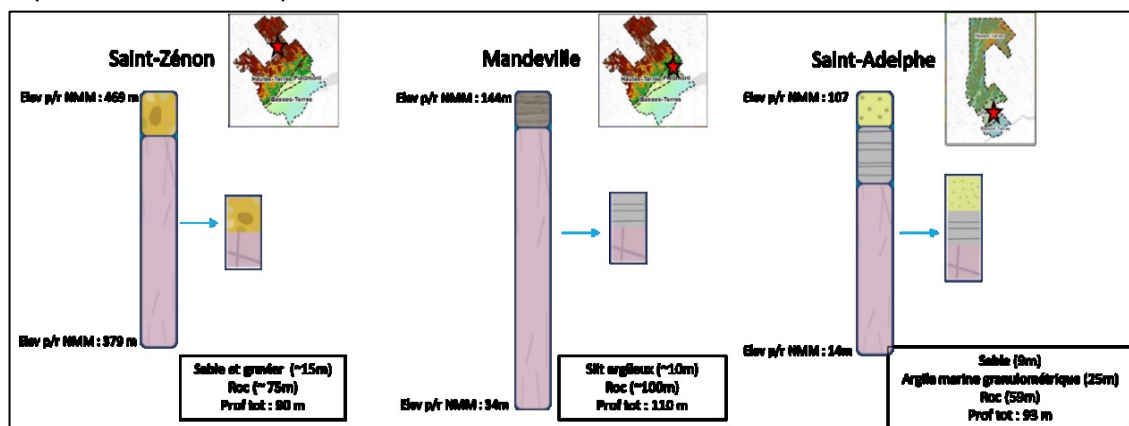


Figure 2- 11: Contextes hydrogéologiques des stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe



## CHAPITRE 3

### MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### 3.1 ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU SOUTERRAINE ET SUIVI DES PARAMÈTRES MESURÉS IN SITU

Ce chapitre présente la méthodologie employée pour l'acquisition de données (paramètres mesurés *in situ*), l'échantillonnage des 3 puits à l'étude ainsi que les méthodes analytiques utilisées par les laboratoires ayant procédé aux analyses.

L'objectif de l'étude étant de décrire et quantifier l'évolution de la chimie analytique et des paramètres mesurés in situ au moment de la purge, des échantillons d'eau ont été prélevés à un pas de temps de 5 minutes lors de la purge des 3 puits présentés précédemment. La campagne d'échantillonnage s'est déroulée entre le 27 et le 29 juillet 2021. Au total, 45 échantillons ont été prélevés dans trois puits privés (15 échantillons par puits) situés dans la province du Grenville. Les échantillons d'eau souterraine pour les analyses des éléments majeurs, mineurs et traces, ont été prélevés dans des contenants appropriés avec des agents de conservation adéquats fournis par le laboratoire ALS (<https://www.alsglobal.com/>). Le tableau suivant (tableau 3- 1) indique le type de contenant et les agents de conservation utilisés lors de l'échantillonnage, ainsi que le laboratoire responsable des analyses pour tous les paramètres analysés dans le cadre de ce projet. Les métaux et les terres rares ont été filtrés sur le terrain à l'aide de filtres en nitrocellulose (PES) non réutilisables de 0,45 µm. La filtration retient la majorité des particules silteuses et argileuses ainsi qu'une partie des hydroxydes de fer et de manganèse (CEAE 2012). Enfin, les échantillons sont conservés au froid (4°C) dans une glacière ou un réfrigérateur avant d'être expédiés à un laboratoire agréé.

**Tableau 3- 1: Paramètres analysés et laboratoire responsable des analyses pour la campagne d'échantillonnage de 2021**

| Bouteille                           | Paramètre analysé   | Agent de conservation  | Filtration terrain | Laboratoire           |                       |
|-------------------------------------|---|--|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Polyéthylène<br/>250 ml</b>      | Aluminium (Al)<br>Antimoine (Sb)<br>Argent (Ag)<br>Arsenic (As)<br>Baryum (Ba)<br>Béryllium (Be)<br>Bismuth (Bi)<br>Bore (B)<br>Calcium (Ca)<br>Chrome (Cr)<br>Cobalt (Co)<br>Cuivre (Cu)<br>Fer (Fe)<br>Lithium (Li) | Magnésium (Mg)<br>Manganèse (Mn)<br>Molybdène (Mo)<br>Nickel (Ni)<br>Potassium (K)<br>Plomb (Pb)<br>Sélénium (Se)<br>Silice (Si)<br>Sodium (Na)<br>Strontium (Sr)<br>Étain (Sn)<br>Titanium (Ti)<br>Uranium (U)<br>Vanadium (V)<br>Zinc (Zn) | Acid Nitrique      | 0.45 µm               | ALS<br>Environemental |
| <b>Polyéthylène<br/>250 ml</b>      | Lanthane (La)<br>Cérium (Ce)<br>Praséodyme (Pr)<br>Néodyme (Nd)<br>Samarium (Sm)<br>Europium (Eu)<br>Gadolinium (Gd)<br>Terbium (Tb)  | Dysprosium (Leybourne et al.)<br>Holmium (Ho)<br>Erbium (Er)<br>Thulium (Th)<br>Ytterbium (Yb)<br>Lutécium (Lu)<br>Yttrium (Y)<br>Scandium (Sc)  | Acide nitrique     | 0.45 µm               | ALS<br>Environemental |
| <b>Verre avec septum<br/>250 mL</b> | Nutriments<br>Phosphores  | Acide sulfurique   | 0.45 µm            | ALS<br>Environemental |                       |
| <b>Verre avec septum<br/>30 mL</b>  | $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$<br>$\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$<br>$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$   | NA   | NA                 | GEOTOP<br>(UQAM)      |                       |

Le protocole utilisé dans le cadre de ce projet est une adaptation du protocole d'échantillonnage utilisé par tous les projets PACES qui implique la purge du puits jusqu'à ce que les paramètres in situ se stabilisent. La figure 3- 1 montre un organigramme du protocole adapté utilisé dans ce projet.

Une cellule d'écoulement de 20 litres a été utilisée pour créer un environnement aussi étanche que possible aux sources externes de contamination (figure 3- 2). Un adaptateur de tuyau d'arrosage en forme de Y est utilisé à la sortie de la maison pour connecter la cellule d'écoulement. La deuxième sortie permet de prélever des échantillons le plus près possible du

puits aux différents temps souhaités. L'objectif d'être aussi proche que possible de la sortie d'eau est de réduire le risque de contamination de l'eau et de s'assurer que l'eau échantillonnée subisse le moins de changement possible en termes de pression et de température lorsqu'elle est retirée du puits. Les flèches bleues, dans la figure 3- 2, représentent la direction de l'écoulement de l'eau.

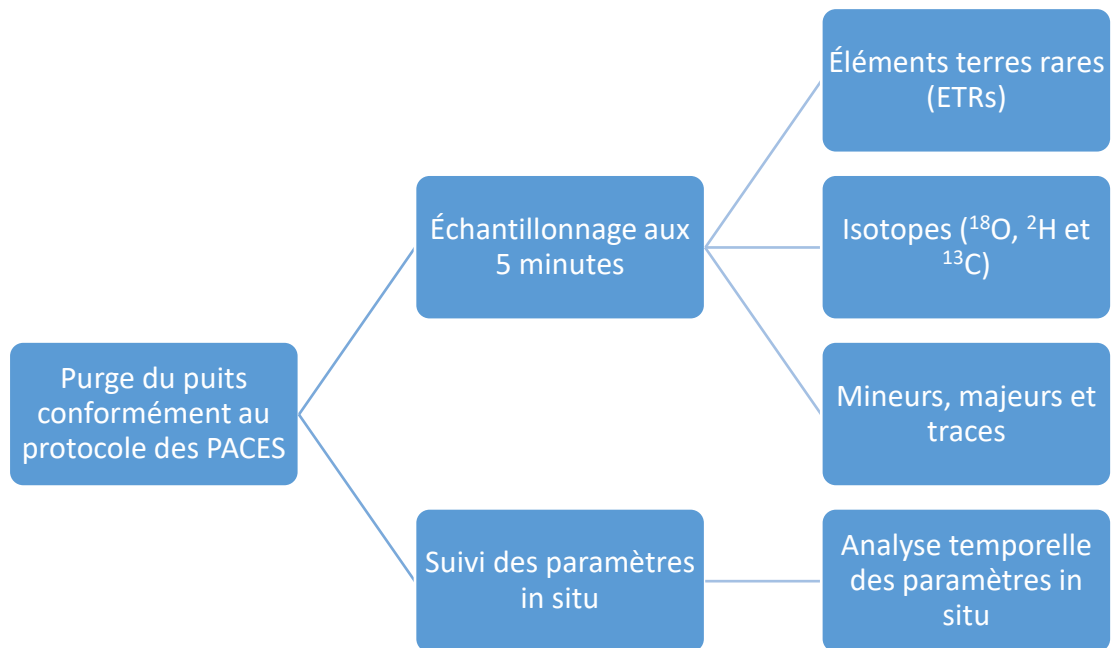


Figure 3- 1: Organigramme simplifié du protocole d'échantillonnage pour la campagne 2021

Une sonde multiparamétrique Hanna (modèle HI929829) est installée dans la cellule d'écoulement. L'eau pénètre dans la cellule d'écoulement par l'entrée située au bas de la cellule et ressort par un tube situé au sommet de la cellule (sortie), ce qui permet de surveiller en temps réel la température, le pH, le Eh et la conductivité électrique spécifique de l'eau souterraine. La section de mesure est située sous environ 40 centimètres d'eau, ce qui est suffisant pour limiter l'interaction avec l'air. Les données (paramètres mesurés in situ) sont enregistrées en continu (aux 5 secondes) dans la sonde et les spécifications de la sonde sont disponibles sur la page du fabricant (<https://hannacan.com/>).

Des échantillons pour les éléments mineurs, majeurs et traces sont prélevés en amont de la cellule d'écoulement toutes les 5 minutes. L'eau est filtrée avec un filtre 0,45 µm (PES) à usage unique avant d'être mise dans les contenants pour les analyses des métaux et des éléments terres rares (ETRs).

Pour les échantillons servant aux analyses isotopiques, l'objectif est de remplir complètement le récipient, sans présence d'air, afin d'éviter tout échange isotopique entre l'eau et l'air. Pour ce faire, le récipient est placé dans la cellule d'écoulement et est ouvert vers l'entrée d'eau. Le bouchon est ensuite vissé fermement dans la chaudière sous le niveau de l'eau. Une fois le contenant sorti de la cellule d'écoulement, la base du bouchon est entourée de ruban électrique pour assurer l'étanchéité et éviter les échanges avec l'air extérieur.

L'alcalinité est également mesurée in situ toutes les 5 minutes à l'aide d'un équipement de titration à l'acide de la marque HANNA (HANNA-HI3811).

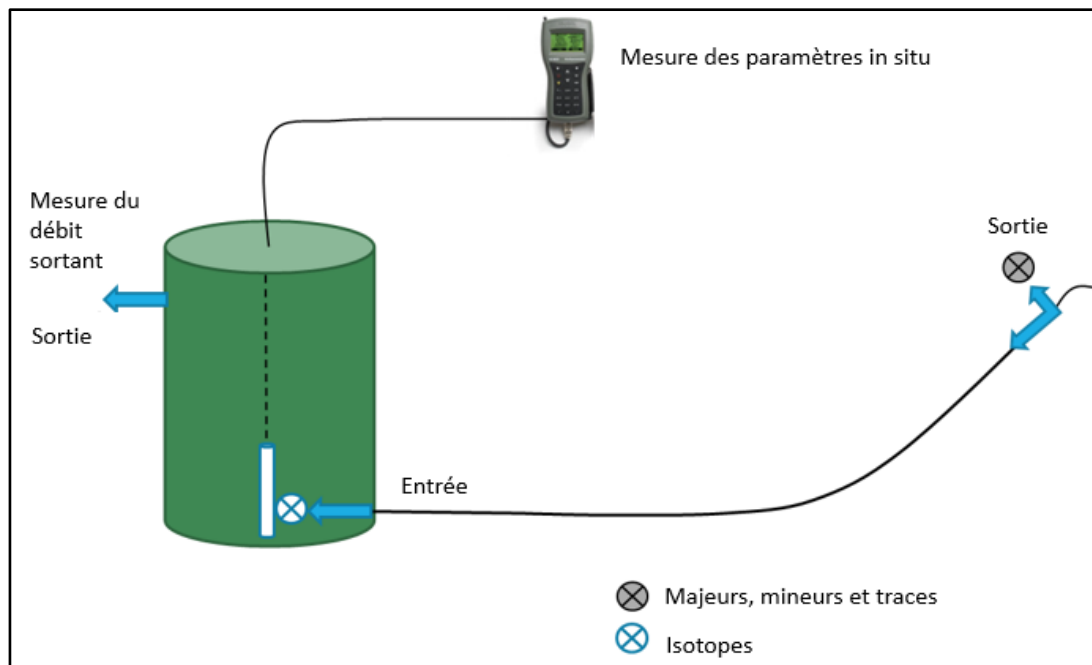


Figure 3- 2: Schéma de la cellule d'écoulement et des points d'échantillonnage

### 3.2 TECHNIQUES ANALYTIQUES

Les informations sur les méthodes analytiques présentées dans cette section proviennent des laboratoires agréés ayant procédé aux analyses soit ALS Environmental pour les majeurs, mineurs et traces et Géotop UQAM pour les analyses  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et  $^{13}\text{C}$ -DIC.

#### 3.2.1 METAUX DISSOUS

Les métaux dissous et les terres rares ont été analysés par ALS Environmental. Les méthodes utilisées sont résumées dans le tableau 3- 2.

Tableau 3- 2: Description des méthodes d'analyse pour les métaux dissous dans l'eau souterraine

| Description du test ALS                              | Emplacement du laboratoire | Référence de la méthode    | Description de la méthode  |
|--|----------------------------|----------------------------|--|
| <b>Métaux dissous dans l'eau par CRC ICPMS</b>       | Waterloo, ON               | APHA 3030B/6020A (mod)     | Les échantillons d'eau sont filtrés (0,45 um), conservés avec de l'acide nitrique et analysés par CRC ICPMS.<br>Limitation de la méthode (concernant le soufre) : Cette méthode ne permet pas de récupérer le soufre et les espèces de soufre volatiles.<br>Analyse effectuée conformément au Protocole pour les méthodes d'analyse utilisées dans l'évaluation des propriétés en vertu de la partie XV.1 de la Loi sur la protection de l'environnement (1er juillet 2011). |
| <b>ETRs dissous dans l'eau par Triple Quad ICPMS</b> | Vancouver, BC              | APHA 3030B/EPA 6020B (mod) | Les échantillons d'eau sont filtrés (0,45 um), conservés avec de l'acide nitrique et analysés par ICPMS triple quadripôle.   |

### 3.2.2 ISOTOPES ( $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^2\text{H}$ ET $\delta^{13}\text{C}$ )

Les analyses des isotopes stables de l'eau ( $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$  et  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) ont été réalisées au laboratoire des isotopes stables légers de Geotop-UQAM. La méthode de laboratoire implique 200  $\mu\text{L}$  d'eau de l'échantillon prélevé avec une pipette dans un flacon de 3 mL, fermé par un bouchon septum et transféré sur un support chauffé à 40.0°C. Pour le  $\delta^2\text{H}$ , un catalyseur hydrophobe en platine (billes Hokko) est ajouté à la fiole. Après une heure, l'air des flacons a été remplacé par du  $\text{CO}_2$  (pour le  $\delta^{18}\text{O}$ ) ou du  $\text{H}_2$  (pour le  $\delta^2\text{H}$ ) à l'aide du système AquaPrep. Les échantillons ont été laissés à l'équilibre pendant 7 heures pour le  $\delta^{18}\text{O}$  ou 4 heures pour le  $\delta^2\text{H}$ . Les échantillons équilibrés ont été analysés à l'aide d'un spectromètre de masse à rapport isotopique (IRMS) de modèle *Micromass Isoprime* couplé à un système AquaPrep en mode "double injection".

Pour les analyses  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , les analyses ont été effectuées au laboratoire d'isotopes stables légers du Geotop-UQAM. Entre 0,5 et 2 mL d'eau d'échantillonnage ont été transférés dans un flacon de verre de 3 mL à l'aide d'une seringue à travers un septum. Les flacons en verre ont été préalablement chargés avec 10 à 15 gouttes d'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) et purgés avec de l'hélium. Les échantillons ont ensuite été placés sur un plateau chauffé à 60°C pendant une heure. Le  $\text{CO}_2$  de l'espace de tête provenant de l'acidification a été analysé à l'aide d'un système *Micromass MicroGasTM* couplé à un IRMS *Isoprime 100TM* en mode de flux continu.

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS ET PRÉSENTATION DES VARIATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES

Ce chapitre présente les résultats analytiques des 45 échantillons d'eau souterraine prélevés lors de la campagne de 2021. Une description statistique des éléments majeurs et mineurs de l'eau y est faite ainsi qu'une description des paramètres mesurés in situ, des résultats obtenus pour les isotopes ( $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$ ) et des résultats obtenus pour les éléments terres rares (ETRs). Par la suite, les variations spatiales et temporelles des paramètres mesurés in situ et de la chimie analytique seront discutées. Soixante éléments chimiques (voir tableau 1- 1) ont été analysés dans cette étude, mais seuls certains paramètres seront abordés dans cette section.

#### 4.1 ÉLÉMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES

Le nombre d'analyses effectuées, le nombre de détections (n), la limite de détection ainsi que les concentrations minimales, médianes et maximales (mg/L) pour les éléments majeurs, mineurs et traces des trois stations sont présentés en détail à l'annexe 2.1 (Saint-Zénon), l'annexe 2.2 (Mandeville) et à l'annexe 2.3 (Saint-Adelphe).

##### *Station de Saint-Zénon (H2021LA2001)*

Pour la station de St-Zénon, quinze (15) échantillons ont été envoyés au laboratoire ALS Canada pour analyses. Tous les échantillons présentaient des concentrations sous les limites de détection du laboratoire pour les éléments suivants : Ag, Al, As, Be, Bi, Co, Cr, Sb, Sn, Ti et V.

Certains éléments, comme le Se, Fe, Li, Mo, Ni, Cd,  $\text{NH}_4$ , Pb et B ont été détectés moins de 7 fois sur 15 pendant la durée de la purge. Pour ces éléments, les valeurs ont été substituées par  $\frac{1}{2}$  fois la limite de détection (LOD) pour le calcul des statistiques.

*Station de Mandeville (H2021LA2002)*

Pour la station de Mandeville, quinze (15) échantillons ont été envoyés au laboratoire ALS Canada pour analyses. Tous les échantillons présentaient des concentrations sous les limites de détection du laboratoire pour les éléments suivants : Ag, Al, As, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V et Zn. Aucune statistique n'a pu être faite sur ces éléments.

Le fer (Fe) n'a été détecté que dans 14 échantillons d'eau sur 15. Pour l'échantillon où le fer n'a pas été détecté, la valeur a été substituée par  $\frac{1}{2}$  fois la limite de détection ou 0.03 mg/L pour le calcul des statistiques.

*Station de Saint-Adelphe (H2021ME2001)*

Pour la station de Saint-Adelphe, quinze (15) échantillons ont été envoyés au laboratoire ALS Canada pour analyses. Tous les échantillons présentaient des concentrations sous les limites de détection du laboratoire pour les éléments suivants : Ag, Al, As, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, et V. Aucune statistique n'a pu être faite sur ces éléments.

Le zinc (Zn) n'a été détecté que dans 12 échantillons d'eau sur 15. Pour les trois autres échantillons, la valeur de substitution utilisée pour le calcul des statistiques est de  $\frac{1}{2}$  fois la limite de détection ou 0.005 mg/L.



#### **4.1.1 QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE EN FONCTION DES OBJECTIFS ESTHÉTIQUES (OE) ET DES CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTÉES (CMA) ET COMPARAISON AVEC STATISTIQUES RÉGIONALES**

Le tableau 4- 1 présente les concentrations minimales, maximales et les médianes pour les échantillons prélevés dans les régions de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie dans le cadre du PACES LAMEMCN. Les éléments soumis à une norme (CMA) ou une recommandation du Gouvernement du Québec sont également présentés. Les objectifs esthétiques sont des recommandations pour les paramètres inorganiques et organiques pouvant avoir un impact sur les propriétés organoleptiques (goût, odeur et couleur) des eaux souterraines, mais n'ayant pas d'effet néfaste connu pour la santé humaine. Les concentrations maximales acceptables sont, quant à elles, des recommandations du gouvernement du Québec sur les concentrations des paramètres inorganiques, organiques et biologiques exigées par le Règlement Québécois sur l'Eau Potable (RQUEP, Q-2, r.40).

Dans cette section, les statistiques faites sur les concentrations en éléments majeurs, mineurs et traces seront comparées avec les statistiques régionales de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie (annexe 2). De plus les concentrations obtenues seront comparées aux recommandations (OE et CMA du RQEP). Cette comparaison a pour objectif de mieux observer la variabilité des concentrations obtenues lors de la purge pour les trois stations.

**Tableau 4- 1: Statistiques régionales (Lanaudière et Est de la Mauricie) pour les différents paramètres analysés dans le cadre de ce projet. Les objectifs esthétiques (OE) et les concentrations maximales acceptables (CMA) du RQEP sont aussi présentés.**

| Paramètres                          | CMA*<br>*OE  | Lanaudière (n=212) |         |         | Mauricie (n=105) |         |         |
|-------------------------------------|--------------|--------------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
|                                     | Norme (mg/L) | Min                | Médiane | Max     | Min              | Médiane | Max     |
| Ag (mg/L)                           | Aucune       | 0.00005            | 0.00005 | 0.00005 | 0.00005          | 0.00005 | 0.00039 |
| Al (mg/L)                           | *0.1         | 0.005              | 0.005   | 1.6     | 0.005            | 0.005   | 0.27    |
| Alcalinité Totale CaCO <sub>3</sub> | Aucune       | 7                  | 90      | 570     | 2.5              | 55.5    | 540     |
| pH 4.5                              |              |                    |         |         |                  |         |         |
| As (mg/L)                           | 0.01*        | 0.00015            | 0.00015 | 0.0033  | 0.00015          | 0.00015 | 0.0078  |
| B (mg/L)                            | 5*           | 0.01               | 0.01    | 1.5     | 0.01             | 0.01    | 0.64    |
| Ba (mg/L)                           | 1*           | 0.001              | 0.024   | 0.95    | 0.001            | 0.017   | 0.37    |
| Be (mg/L)                           | Aucune       | 0.0002             | 0.0002  | 0.0002  | 0.0002           | 0.0002  | 0.0002  |
| Bi (mg/L)                           | Aucune       | 0.00013            | 0.00013 | 0.00013 | 0.00013          | 0.00013 | 0.00013 |
| Ca (mg/L)                           | Aucune       | 0.15               | 20      | 190     | 0.15             | 14      | 180     |
| Cd (mg/L)                           | 0.005*       | 0.0001             | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001           | 0.0001  | 0.0001  |
| Co (mg/L)                           | Aucune       | 0.00025            | 0.00025 | 0.027   | 0.00025          | 0.00025 | 0.0034  |
| Cr (mg/L)                           | 0.05*        | 0.00025            | 0.00025 | 0.0031  | 0.00025          | 0.00025 | 0.0048  |
| Cu (mg/L)                           | *1           | 0.00025            | 0.003   | 0.19    | 0.00025          | 0.0026  | 5.1     |
| Fe (mg/L)                           | *0.3         | 0.03               | 0.03    | 8.5     | 0.03             | 0.03    | 18      |
| K (mg/L)                            | Aucune       | 0.16               | 1.8     | 38      | 0.05             | 1.9     | 16      |
| Li (mg/L)                           | Aucune       | 0.0015             | 0.0015  | 0.35    | 0.0015           | 0.0015  | 0.03    |
| Mg (mg/L)                           | Aucune       | 0.05               | 4.1     | 51      | 0.05             | 2.05    | 18      |
| Mn (mg/L)*                          | *0.02        | 0.0002             | 0.0069  | 1.3     | 0.0002           | 0.012   | 0.41    |
| Mo (mg/L)                           | Aucune       | 0.00025            | 0.00025 | 0.0045  | 0.00025          | 0.00025 | 0.0045  |
| Na (mg/L)                           | *200         | 0.79               | 18      | 1400    | 0.77             | 9.35    | 400     |
| NH <sub>4</sub> (mg N/l)            | Aucune       | 0.01               | 0.053   | 4.3     | 0.01             | 0.0375  | 3.6     |
| Ni (mg/L)                           | Aucune       | 0.0005             | 0.0005  | 0.0071  | 0.0005           | 0.0005  | 0.0093  |
| Pb (mg/L)                           | 0.005*       | 0.00005            | 0.00016 | 0.016   | 0.00005          | 0.00015 | 0.27    |
| Sb (mg/L)                           | 0.006*       | 0.0005             | 0.0005  | 0.0005  | 0.0005           | 0.0005  | 0.0005  |
| Se (mg/L)                           | 0.05*        | 0.0005             | 0.0005  | 0.0005  | 0.0005           | 0.0005  | 0.0005  |
| Si <sub>d</sub> (mg/L)              | Aucune       | 1.3                | 5.8     | 14      | 2.8              | 5.9     | 15      |
| Sn (mg/L)                           | Aucune       | 0.0005             | 0.0005  | 0.0077  | 0.0005           | 0.0005  | 0.013   |
| Sr (mg/L)                           | 7*           | 0.001              | 0.16    | 9.9     | 0.001            | 0.115   | 5.5     |
| Sulfures (mg S/l)                   | *0.05        | 0.01               | 0.01    | 9.6     | 0.01             | 0.01    | 1       |
| Ti (mg/L)                           | Aucune       | 0.005              | 0.005   | 0.094   | 0.005            | 0.005   | 0.005   |
| U (mg/L)                            | 0.02*        | 0.0005             | 0.0005  | 0.01    | 0.0005           | 0.0005  | 0.0066  |
| V (mg/L)                            | Aucune       | 0.001              | 0.001   | 0.0049  | 0.001            | 0.001   | 0.021   |
| Zn (mg/L)                           | *5           | 0.0025             | 0.008   | 0.33    | 0.0025           | 0.0072  | 3.1     |

## **Baryum (Ba)**

Il existe une recommandation de concentration maximale acceptable (CMA) pour le Baryum qui est de 1mg/L. Aucun des échantillons de ce projet ne dépasse cette recommandation.

Pour la station de Saint-Zénon, la concentration médiane en baryum est de 0,1 mg/L, ce qui est dix (10) fois plus élevée que la médiane régionale de Lanaudière qui est de 0,010 mg/L. La concentration minimale et concentration maximale de baryum sont respectivement de 0.094 et 0.104 mg/L.

À Mandeville, la concentration maximale en baryum est de 0,038 mg/L, la concentration minimale est de 0.026 mg/L et la médiane de 0,033 mg/L ce qui est trois (3) fois plus élevé que la concentration médiane régionale.

Pour Saint-Adelphe, la concentration maximale en baryum est de 0,04 mg/L et la concentration minimale est de 0,031 mg/L. La médiane quant à elle est de 0,037 mg/L alors que la médiane régionale de la Mauricie se trouve à 0,017 mg/L.

## **Calcium (Ca)**

Pour le calcium, les trois stations ont des concentrations nettement supérieures aux concentrations médianes régionales de Lanaudière et de la Mauricie (20 mg/L et 14mg/L). Pour la station de Saint-Zénon, on retrouve une concentration minimale de 123 mg/L et une concentration maximale de 146 mg/L. La médiane de cette station est de 131 mg/L.

La concentration maximale et minimale pour la station de Mandeville sont de 34,4 mg/L et de 25,9 mg/L. La médiane est de 30,5 mg/L.

Pour la station de Saint-Adelphe, la concentration maximale en calcium est de 219 mg/L, la concentration minimale est de 183 mg/L et la médiane de 212 mg/L.

### **Cuivre (Cu)**

Il existe un objectif esthétique (OE) émis par le Gouvernement du Québec concernant le cuivre qui est de 1 mg/L. Tous les échantillons de toutes les stations ont des concentrations inférieures à cette limite. Les concentrations médianes régionales en cuivre de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie sont de 0,0030 mg/L et de 0,0026 mg/L respectivement.

La station de Saint-Zénon présente une concentration maximale et une concentration maximale de 0,0147 mg/L et de 0,0097 mg/L. La médiane pour cette station est de 0,0122 mg/L ce qui est quatre (4) fois plus élevé que la concentration médiane régionale de Lanaudière.

Pour les stations de Mandeville et de Saint-Adelphe, tous les échantillons présentaient des concentrations en cuivre inférieures aux limites de détection du laboratoire.

### **Fer (Fe)**

Le gouvernement du Québec a émis une recommandation d'objectif esthétique (OE) pour cet élément qui est de 0,3 mg/L. Toutes les concentrations mesurées dans les trois stations sont sous cette valeur. La concentration médiane régionale de Lanaudière et celle de l'Est de la Mauricie en Fer sont la même, soit une concentration de 0,03mg/L.

Seuls quatre (4) échantillons sur quinze (15) de la station de Saint-Zénon ont des concentrations en fer au-dessus des limites de détection, il est donc possible de conclure que les statistiques ne sont pas significatives pour cette station.

Pour la station de Mandeville, les concentrations en fer varient entre 0,29 mg/L (max) et 0,03 mg/L (min). La concentration médiane pour cette station est de 0,18 mg/L ce qui est significativement plus élevé que la concentration médiane régionale de Lanaudière (0,03 mg/L).

Tous les échantillons de Saint-Adelphe ont des concentrations en fer sous les limites de détection du laboratoire.

### **Potassium (K)**

Pour la région de Lanaudière, la concentration médiane régionale en potassium est de 1,80 mg/L alors que celle de la région de l'Est de la Mauricie est de 1,90 mg/L.

Pour la station de Saint-Zénon, la concentration maximum et minimum sont respectivement de 4,42 mg/L et de 3,87 mg/L la concentration médiane est de 4,14 mg/L ce qui est plus de deux (2) fois plus élevé que la médiane régionale de Lanaudière.

Les échantillons de Mandeville quant à eux, présentent des concentrations variant entre 11,6 mg/L et 10,6 mg/L. Pour cette station, la médiane s'établit à 10,9 mg/L ce qui est environ dix (10) fois plus élevé que la médiane régionale. C'est cette station qui présente les concentrations les plus élevées en potassium.

Pour la station de Saint-Adelphe, les concentrations varient entre 8,57 mg/L (max) et 6,64 mg/L (min). La concentration médiane de cette station est de 7,66 mg/L et est donc près de quatre (4) fois supérieure à la médiane régionale de l'Est de la Mauricie.

### **Lithium (Li)**

Pour le lithium, les deux régions (Lanaudière et Est de la Mauricie) présentent des médianes similaires soit des concentrations de 0,0015 mg/L.

Seuls quatre (4) des échantillons de Saint-Zénon ont des concentrations en lithium au-dessus de la limite de détection du laboratoire. Les statistiques ne sont donc pas représentatives et ne seront pas commentées.

Tous les échantillons de la station de Mandeville ont des concentrations en lithium sous les limites de détection du laboratoire.

Pour la station de Saint-Adelphe, les concentrations en lithium varient entre 0,027 mg/L (max) et 0,021 mg/L (min) alors que la médiane se situe à 0,024 mg/L. La médiane de Saint-Adelphe est donc nettement supérieure à la médiane régionale de l'Est de la Mauricie (0,0015 mg/L).

### **Magnésium (Mg)**

La concentration médiane en magnésium de Lanaudière est de 4,10 mg/L alors que celle de l'Est de la Mauricie est de 2,05 mg/L.

Pour la station de Saint-Zénon, la concentration médiane en magnésium est de 8,96 mg/L ce qui est près de deux (2) fois supérieur à la médiane régionale. La concentration maximum en magnésium de cette station est de 10,8 mg/L et la concentration minimum est de 8,25 mg/L.

Pour la station de Mandeville, les concentrations en magnésium des échantillons varient entre 8,6 mg/L et 7,39 mg/L. La médiane des concentrations est de 7,87 mg/L ce qui représente près du double de la médiane régionale en Magnésium de Lanaudière.

Les échantillons de la station de Saint-Adelphe présentent des concentrations variant entre 9,52 et 7,13 mg/L. La médiane de cette station est de 8,46 mg/L et est donc quatre (4) fois supérieure à la médiane régionale de l'Est de la Mauricie.

## **Manganèse (Mn)**

Le manganèse est assujéti à un objectif esthétique (OE) de 0,02 mg/L. À l'échelle régionale, les médianes sont respectivement de 0,0069 mg/L et 0,012 mg/L pour Lanaudière et l'Est de la Mauricie.

Les échantillons de Saint-Zénon présentent des concentrations allant de 0,0445 mg/L (max) à 0,0202 mg/L (min) avec une médiane de 0,0374 mg/L. La médiane est donc supérieure à la moyenne régionale et tous les échantillons dépassent l'objectif esthétique de 0,02 mg/L.

Pour la station de Mandeville, les concentrations maximum et minimum sont respectivement de 0,0668 mg/L et 0,0527 mg/L. La médiane est de 0,0609 mg/L ce qui est près de dix (10) fois supérieur à la médiane régionale. Pour cette station, tous les échantillons ont des concentrations supérieures à l'objectif esthétique.

Les concentrations en manganèse obtenues pour la station de Saint-Adelphe varient entre 0,0781 mg/L et 0,0621 mg/L. La médiane pour cette station est de 0,0712 mg/L ce qui est environ sept (7) fois supérieur à la médiane régionale de l'Est de la Mauricie. Encore une fois, tous les échantillons présentent des concentrations supérieures à l'objectif esthétique.

## **Molybdène (Mo)**

La concentration en molybdène médiane régionale de Lanaudière est de 0,0025mg/L.

Seuls quatre (4) des quinze (15) échantillons de la station de Saint-Zénon ont des concentrations en molybdène au-dessus des limites de détection, il est donc possible de conclure que les statistiques ne sont pas significatives pour cette station.

Pour la station de Mandeville, les concentrations en molybdène varient entre 0,00692 mg/L (max) et 0,00583 mg/L (min). La concentration médiane pour cette station est de 0,00639 mg/L ce qui est plus de deux (2) fois supérieur à la concentration médiane régionale de Lanaudière (0,0025 mg/L).

Tous les échantillons de Saint-Adelphe ont des concentrations en molybdène sous les limites de détection du laboratoire.

### **Sodium (Na)**

Le sodium est sujet à un objectif esthétique de 200 mg/L. La totalité des échantillons prélevés dans ce projet présente des concentrations qui dépassent cet objectif esthétique. Les médianes régionales en sodium de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie sont respectivement de 18 mg/L et 9,35 mg/L.

La concentration maximum, minimum et médiane en sodium obtenue pour la station de Saint-Zénon sont de 316 mg/L, 249 mg/L et 299 mg/L ce qui est largement au-dessus de la médiane régionale.

Pour la station de Mandeville la concentration médiane en sodium est de 341 mg/L ce qui est plus de treize (13) fois plus élevé que la médiane régionale de Lanaudière. La concentration maximum en sodium pour cette station est de 368 mg/L alors que la concentration minimum est de 338 mg/L.

Les concentrations en sodium mesurées à la station de Saint-Adelphe varient entre 312 mg/L et 244 mg/L. La médiane pour cette station est près de trente (30) fois plus élevée que la médiane régionale avec une concentration médiane de 288 mg/L.



## **Plomb (Pb)**

Pour le plomb, la CMA a été fixée à 0,005 mg/L. À Lanaudière, la médiane régionale est de 0,00016 mg/L alors qu'elle est de 0,00015 mg/L pour l'Est de la Mauricie.

Seuls cinq (5) des quinze (15) échantillons de Saint-Zénon ont des concentrations en plomb au-dessus de la limite de détection du laboratoire et aucune des concentrations obtenues n'est supérieure à la CMA.

Tous les échantillons de la station de Mandeville et de Saint-Adelphe ont des concentrations en plomb sous les limites de détection du laboratoire.

## **Sélénium (Se)**

Le sélénium est également un élément soumis à une recommandation CMA de 0,05 mg/L. Le sélénium n'est que très rarement détecté dans les eaux souterraines des deux régions (Limite de détection (LOD) : 0,001 mg/L) ce qui implique que la plupart des concentrations utilisées pour les statistiques régionales ont été substituées par la moitié de la limite de détection (0,0005 mg/L). Pour les régions de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie, les concentrations médianes sont de 0,0005 mg/L (ou ½ fois la limite de détection du laboratoire).

À Saint-Zénon, le sélénium n'a été détecté qu'à deux reprises, soit après 60 minutes et 75 minutes du début de la purge. Les concentrations mesurées sont de 0,000068 mg/L et 0,000061 mg/L.

Tous les échantillons de Mandeville ont des concentrations sous les limites de détection du laboratoire.

Pour la station de Saint-Adelphe, les concentrations en sélénium varient entre 0,0147 mg/L et 0,00679 mg/L avec une médiane se situant à 0,01030 mg/L. Tous les échantillons présentent des concentrations plus faibles que la CMA (0,05 mg/L), mais supérieures à la médiane régionale (0,0005 mg/L).

### **Silice (Si)**

Les concentrations médianes en silice des régions de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie sont respectivement de 5,8 mg/L et de 5,9 mg/L.

Les échantillons de Saint-Zénon ont des concentrations en silice variant entre 7,36 mg/L et 5,78 mg/L. La médiane pour cette station est de 6,21 mg/L, ce qui est supérieur à la médiane régionale de Lanaudière.

Pour la station de Mandeville, la médiane est de 6,4 mg/L de silice et est donc supérieure à la médiane régionale (5,8 mg/L). La concentration maximum est de 7,02 mg/L et la concentration minimum est de 4,91 mg/L.

Les échantillons de Saint-Adelphe, quant à eux, présentent une concentration médiane en silice de 6,08 mg/L, soit légèrement au-dessus de la médiane régionale de l'Est de la Mauricie. Les concentrations varient entre 6,64 mg/L et 5,06 mg/L au cours de la purge.

### **Strontium (Sr)**

La recommandation de santé (CMA) pour le strontium est de 7mg/L. À l'échelle régionale, la concentration médiane de Lanaudière est de 0,16 mg/L alors que celle de l'Est de la Mauricie est plus faible (0,115 mg/L).

Les concentrations en strontium mesurées à la station de Saint-Zénon varient entre 1,29 mg/L et 0,959 mg/L. Tous les échantillons ont des concentrations nettement supérieures à la médiane régionale de Lanaudière, mais inférieures à la CMA.

Pour la station de Mandeville, les concentrations maximum et minimum mesurées en strontium sont de 0,928 mg/L et 0,762 mg/L et sont inférieures à la CMA. La médiane est de 0,836 mg/L et est donc cinq (5) fois plus élevée que la médiane régionale.

Les échantillons prélevés à Saint-Adelphe ont des concentrations en strontium qui varient entre 5,08 mg/L et 6,12 mg/L et qui sont inférieures à la CMA. La médiane des concentrations est de 5,86 mg/L ce qui est près de cinquante (50) fois la médiane régionale de l'Est de la Mauricie.

## **Uranium (U)**

L'uranium peut occasionner des problèmes de santé (CMA) lorsque sa concentration dépasse 0,02 mg/L dans l'eau potable. Aucun des échantillons prélevés dans le cadre de ce projet ne dépasse cette recommandation.

L'uranium n'est que très rarement détecté dans l'eau souterraine ce qui explique que les médianes régionales sont de la valeur de la moitié de la limite de détection (0,0005 mg/L) et ne sont donc pas significatives.

La concentration maximum en uranium mesuré à Saint-Zénon est de 0,00390 mg/L alors que la concentration minimum est de 0,00298 mg/L. La médiane de cette station est de 0,00348 mg/L et est donc près de sept (7) fois plus élevée que la médiane régionale.

À Mandeville, les concentrations en uranium mesurées sur les échantillons d'eau souterraine varient entre 0,0001 mg/L et 0,00047 mg/L et la médiane est de 0,0004 mg/L.

Pour la station de Saint-Adelphe, la concentration médiane est de 0,0007 mg/L alors que la concentration maximum est de 0,0008 mg/L et la concentration minimum est de 0,0006 mg/L.

### **Zinc (Zn)**

Aucun des échantillons de ce projet ne dépasse l'objectif esthétique (OE) en zinc qui est de 5 mg/L. Les médianes régionales de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie sont toutes deux de 0,001 mg/L.

Les échantillons de Saint-Zénon ont des concentrations qui se situent entre 0,0109 mg/L et 0,029 mg/L. La médiane pour ces échantillons d'eau souterraine est de 0,0190 mg/L.

Tous les échantillons de Mandeville ont des concentrations en zinc sous les limites de détection du laboratoire.

Les concentrations en zinc ont été détectées dans douze (12) échantillons sur quinze (15). Les concentrations mesurées à Saint-Adelphe varient entre 0,0430 mg/L et 0,0050 mg/L avec une médiane de 0,026 mg/L. La médiane est environ dix (10) fois supérieure à la médiane régionale de l'Est de la Mauricie.

## **4.2 PARAMÈTRES IN SITU**

Le tableau 4- 2 présente les résultats des paramètres mesurés in situ pour les trois stations (Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe). Les valeurs de température (°C), de pH, du Eh (mV), de conductivité électrique spécifique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), d'oxygène dissous (%) et de

matières totales dissoutes (ppm) sont présentées pour tous les échantillons prélevés aux 5 minutes pendant la purge. Le volume d'eau purgé (l) est également présenté.

Pour la station de Saint-Zénon, la température est de 9,57°C (début de la purge) et varie entre 7,98°C et 7,71°C avec une moyenne de 7,95°. La température varie entre 8,87°C et 9,19°C avec une moyenne de 8,99°C pour la station de Mandeville, et entre 9,05°C et 9,17°C avec une moyenne de 9,13°C pour la station de Saint-Adelphe.

Le pH de la station de Saint-Zénon est neutre entre 7,09 et 7,29. L'eau souterraine des stations de Mandeville et de Saint-Adelphe est légèrement alcaline avec des valeurs de pH comprises entre 8,42 et 8,79 et entre 8,23 et 8,29 respectivement. En général, les valeurs de pH de toutes les stations ont tendance à augmenter avec le temps.

**Tableau 4- 2: Paramètres in situ (Température, pH, Eh Conductivité électrique spécifique, TDS et oxygène dissout) pour les échantillons des stations de Saint-Adelphe, Mandeville et Saint-Zénon**

| IDUQAC           | Temps<br>(min) | Vol<br>(L) | T<br>(°C) | pH   | Eh<br>(mV) | Cond<br>( $\mu$ S/cm) | TDS<br>(ppm) | O <sub>2</sub><br>(%) |
|------------------|----------------|------------|-----------|------|------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| SAINT-ADELPHE-01 | 5              | 120        | 9,07      | 8,23 | 95,7       | 2599                  | 1300         | 81,7                  |
| SAINT-ADELPHE-02 | 10             | 240        | 9,05      | 8,22 | 96,1       | 2608                  | 1304         | 83,2                  |
| SAINT-ADELPHE-03 | 15             | 360        | 9,1       | 8,25 | 94,4       | 2593                  | 1296,5       | 86,1                  |
| SAINT-ADELPHE-04 | 20             | 480        | 9,13      | 8,26 | 93,8       | 2341                  | 1170,5       | 80,6                  |
| SAINT-ADELPHE-05 | 25             | 600        | 9,13      | 8,26 | 93,3       | 2286                  | 1143         | 77,9                  |
| SAINT-ADELPHE-06 | 30             | 720        | 9,11      | 8,27 | 92,7       | 2256                  | 1128         | 76,1                  |
| SAINT-ADELPHE-07 | 35             | 840        | 9,13      | 8,28 | 92,3       | 2206                  | 1103         | 76,6                  |
| SAINT-ADELPHE-08 | 40             | 960        | 9,21      | 8,29 | 92,2       | 2127                  | 1063,5       | 77,7                  |
| SAINT-ADELPHE-09 | 45             | 1080       | 9,18      | 8,29 | 92,3       | 2113                  | 1056,5       | 78,13                 |
| SAINT-ADELPHE-10 | 50             | 1200       | 9,18      | 8,29 | 92,3       | 2115                  | 1057,5       | 78,7                  |
| SAINT-ADELPHE-11 | 55             | 1320       | 9,12      | 8,29 | 92,5       | 2095                  | 1047,5       | 76,4                  |
| SAINT-ADELPHE-12 | 60             | 1440       | 9,09      | 8,29 | 92,7       | 2092                  | 1046         | 76                    |
| SAINT-ADELPHE-13 | 65             | 1560       | 9,1       | 8,29 | 92,8       | 2096                  | 1048         | 76,1                  |
| SAINT-ADELPHE-14 | 70             | 1680       | 9,17      | 8,29 | 92,8       | 2091                  | 1045,5       | 80,2                  |
| SAINT-ADELPHE-15 | 75             | 1800       | 9,16      | 8,29 | 92,8       | 2085                  | 1042,5       | 77,4                  |
| MANDEVILLE-01    | 5              | 45         | 9,19      | 8,47 | 50,1       | 1997                  | 998,5        | 2,7                   |
| MANDEVILLE-02    | 10             | 90         | 8,84      | 8,42 | 48,6       | 1971                  | 985,5        | 1,2                   |
| MANDEVILLE-03    | 15             | 135        | 8,93      | 8,48 | 42,3       | 1940                  | 970          | 0,6                   |
| MANDEVILLE-04    | 20             | 180        | 8,91      | 8,58 | 39,7       | 1860                  | 930          | 0,6                   |
| MANDEVILLE-05    | 25             | 225        | 8,92      | 8,6  | 41,7       | 1989                  | 994,5        | 0,8                   |
| MANDEVILLE-06    | 30             | 270        | 8,87      | 8,6  | 41,8       | 2024                  | 1012         | 1                     |
| MANDEVILLE-07    | 35             | 315        | 8,95      | 8,54 | 43,4       | 2034                  | 1017         | 1,3                   |
| MANDEVILLE-08    | 40             | 360        | 9,01      | 8,52 | 44         | 2036                  | 1018         | 1,3                   |

|                |    |      |      |      |      |      |        |      |
|----------------|----|------|------|------|------|------|--------|------|
| MANDEVILLE-09  | 45 | 405  | 9,03 | 8,51 | 44,2 | 2026 | 1013   | 0    |
| MANDEVILLE-10  | 50 | 450  | 9,04 | 8,51 | 43,3 | 2014 | 1007   | 0    |
| MANDEVILLE-11  | 55 | 495  | 9,09 | 8,52 | 39,9 | 2011 | 1005,5 | 0    |
| MANDEVILLE-12  | 60 | 540  | 9,03 | 8,6  | 36,4 | 2010 | 1005   | 0    |
| MANDEVILLE-13  | 65 | 585  | 9,03 | 8,71 | 37,1 | 1988 | 994    | 4,3  |
| MANDEVILLE-14  | 70 | 630  | 9,06 | 8,78 | 39,8 | 1934 | 967    | 3,2  |
| MANDEVILLE-15  | 75 | 675  | 9,09 | 8,79 | 42,6 | 1926 | 963    | 2,9  |
| SAINT-ZÉNON-01 | 5  | 90   | 9,57 | 7,09 | 22   | 1895 | 947,5  | 26   |
| SAINT-ZÉNON-02 | 10 | 180  | 7,86 | 7,13 | 22,7 | 1944 | 972    | 28,1 |
| SAINT-ZÉNON-03 | 15 | 270  | 7,71 | 7,17 | 20   | 1948 | 974    | 30,9 |
| SAINT-ZÉNON-04 | 20 | 360  | 7,88 | 7,16 | 19   | 1930 | 965    | 32,3 |
| SAINT-ZÉNON-05 | 25 | 450  | 7,78 | 7,17 | 18,5 | 1912 | 956    | 33,9 |
| SAINT-ZÉNON-06 | 30 | 540  | 7,93 | 7,18 | 17,8 | 1875 | 937,5  | 33,8 |
| SAINT-ZÉNON-07 | 35 | 630  | 7,88 | 7,2  | 17,4 | 1856 | 928    | 31,8 |
| SAINT-ZÉNON-08 | 40 | 720  | 7,75 | 7,22 | 17   | 1768 | 884    | 31,6 |
| SAINT-ZÉNON-09 | 45 | 810  | 7,77 | 7,24 | 16,8 | 1812 | 906    | 29,4 |
| SAINT-ZÉNON-10 | 50 | 900  | 7,98 | 7,24 | 16,7 | 1789 | 894,5  | 28,9 |
| SAINT-ZÉNON-11 | 55 | 990  | 7,83 | 7,25 | 16,9 | 1706 | 853    | 27,6 |
| SAINT-ZÉNON-12 | 60 | 1080 | 7,91 | 7,26 | 16,8 | 1740 | 870    | 27,2 |
| SAINT-ZÉNON-13 | 65 | 1170 | 7,88 | 7,27 | 16,7 | 1678 | 839    | 24,6 |
| SAINT-ZÉNON-14 | 70 | 1260 | 7,79 | 7,28 | 16,8 | 1700 | 850    | 25,4 |
| SAINT-ZÉNON-15 | 75 | 1350 | 7,76 | 7,29 | 17   | 1671 | 835,5  | 23   |

La station de Saint-Adelphe présente les conductivités électriques spécifiques les plus élevées (avec une moyenne de 2236  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou un TDS de 1118 ppm). Les valeurs ont tendance à diminuer au début de la purge et se stabilisent (variation de  $\pm 4\%$  entre deux valeurs consécutives) après 25 minutes de purge. La station de Saint-Zénon présente la conductivité

électrique spécifique la plus faible (moyenne de 1815  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou un TDS de 907 ppm) et la première stabilisation, selon le protocole, est atteinte après 20 minutes de purge. La conductivité électrique spécifique de la station de Mandeville se stabilise après une purge de 40 minutes et la valeur moyenne de la conductivité est de 1984  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (variation de  $\pm 2,04\%$  entre deux valeurs consécutives).

Les trois stations ont des eaux oxydantes avec des potentiels redox (Eh) qui varient moins que le critère de stabilisation (20 mV) tout au long de la purge. En moyenne, la station de Saint-Adelphe présente un Eh de 93,2 avec une valeur maximale de 96,1 mV et une valeur minimale de 92,2 mV. L'eau de la station de Saint-Zénon a un Eh moyen de 18,1 mV, un Eh maximal de 22,7 mV et un Eh minimal de 16,7 mV. Le Eh de la station de Mandeville a une valeur moyenne de 42,3 mV, une valeur minimale de 36,4 mV et une valeur maximale de 50,1 mV. Globalement, le Eh diminue progressivement tout au long de la purge pour les 3 stations.

### 4.3 ISOTOPES

Pour les trois stations (Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe), des échantillons pour la composition en isotopes stables ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ ) ont été prélevés toutes les 5 minutes pendant la purge de 75 minutes pour un total de 15 données par station. De plus, des données d'isotopes stables ont été prises en 2020 pour la station de St-Zénon toutes les 5 minutes pendant une purge de 90 minutes (même protocole qu'en 2021). Le tableau 4- 3 présente la moyenne et l'écart-type pour les différentes stations. L'incertitude analytique globale du laboratoire est meilleure que  $\pm 0,1\text{‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\pm 2,0\text{‰}$  pour  $\delta^2\text{H}$ . Compte tenu de l'incertitude analytique du laboratoire, les variations observées pour le  $\delta^2\text{H}$  ne sont pas statistiquement significatives pour la totalité des échantillons. Pour les échantillons des stations de Saint-Zénon et de Mandeville et Saint-Adelphe prélevés en 2021, les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  présentent des écarts-types inférieurs à l'incertitude analytique ( $0,1\text{‰}$ ) et leur valeur est respectivement de  $0,06\text{‰}$ ,  $0,06\text{‰}$  et  $0,08\text{‰}$ . Pour la station de Saint-Zénon, les échantillons prélevés en 2020 présentent un écart type de  $0,45\text{‰}$  pour le  $\delta^{18}\text{O}$ .



**Tableau 4- 3: Moyennes et écarts types pour les valeurs de  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  pour les stations de Saint-Zénon (2020 et 2021), Mandeville (2021) et Saint-Adelphe (2021)**

| Station            | n  | $\delta^2\text{H}$ (‰ vs VSMOW) |              | $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs VSMOW) |              | $\delta^{13}\text{C-DIC}$ (‰) |              |
|--------------------|----|---------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
|                    |    | Moyenne                         | Écarts-types | Moyenne                            | Écarts-types | Moyenne                       | Écarts-types |
| Saint-Zénon 2021   | 15 | -85,87                          | 1,14         | -12,35                             | 0,06         | -15,49                        | 0,14         |
| Mandeville 2021    | 15 | -82,24                          | 1,08         | -11,82                             | 0,06         | -17,63                        | 0,18         |
| Saint-Adelphe 2021 | 15 | -97,66                          | 1,34         | -13,94                             | 0,08         | -21,77                        | 0,15         |
| Saint-Zénon 2020   | 19 | -88,72                          | 0,80         | -12,98                             | 0,45         | -15,64                        | 0,14         |

Quinze (15) échantillons d'eau souterraine ont également été prélevés en 2021 à chaque station afin d'être analysés pour le contenu isotopique  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ . Pour les analyses  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , l'incertitude analytique est meilleure que  $\pm 0,1$  ‰. Chaque station a une signature  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  distincte (tableau 4- 3). La station de Saint-Zénon a un rapport  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  plus élevé que les deux autres stations, alors que la station de Saint-Adelphe a le rapport le plus faible. Les valeurs varient de -21,34 ‰ à -21,96 ‰ pour la station de Saint-Adelphe avec une moyenne de  $-21,77\text{‰} \pm 0,15$ . Pour la station de Mandeville, la valeur maximale est de -17,33 ‰, la valeur minimale est de -18,02 ‰ et la moyenne est de  $-17,63\text{‰} \pm 0,18$ . Pour la station de Saint-Zénon, les valeurs varient entre -15,95 ‰ et -15,16 ‰ avec une moyenne de  $-15,49\text{‰} \pm 0,14$ . En 2020, dix-neuf (19) échantillons ont également été collectés toutes les 5 minutes pour l'analyse  $\delta^{13}\text{C-DIC}$  à la station de Saint-Zénon. Les valeurs de 2020 sont cohérentes avec les résultats de 2021.

#### 4.4 ÉLÉMENTS TERRES RARES

Les éléments terres rares sont un groupe de 15 éléments, les Lanthanides. Selon les configurations électroniques, ils se divisent en 2 sous-groupes ; les terres rares légères (LREEs ; lanthane (La), cérium (Ce), praséodyme (Pr), néodyme (Nd), samarium (Sm), europium (Eu) et gadolinium (Gd)), qui sont plus abondantes naturellement dans le matériel géologique et les terres rares lourdes (HREEs ; terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), l'ytterbium (Yb), lutécium (Lu) ± l'yttrium (Y)) qui y sont moins abondantes. Certains auteurs utilisent également la nomenclature MREEs, ou terres rares moyennes, pour décrire les éléments qui se situent entre ces deux extrêmes.

Tous les échantillons prélevés à la station de Mandeville ont des valeurs de terres rares inférieures aux limites de détection du laboratoire. Les résultats des concentrations en terres rares pour les 2 autres stations sont présentés à l'annexe 3.1 (Saint-Zénon) et à l'annexe 3.2 (Saint-Adelphe). La figure 4- 1 présente les profils de terres rares normalisés à la croûte continentale moyenne (CCM) pour tous les échantillons des stations de Saint-Zénon (a) et de Saint-Adelphe (b). Les éléments terres rares (ETRs) de ce projet ont été normalisés à la croûte continentale moyenne (Taylor et al. 1981) afin de minimiser l'effet des variations d'abondances naturelles des terres rares. Les valeurs utilisées pour les concentrations en ETRs de la croûte moyenne continentale sont celles de Taylor, 1981.

Tous les échantillons de la station de Saint-Zénon (figure 4- 1 - a) partagent un profil similaire caractérisé par un enrichissement en LREEs par rapport aux HREEs. Une anomalie négative en Cérium (Ce) est également observée. Tous les échantillons de Saint-Zénon ont des concentrations inférieures à la limite de détection pour le Terbium (Tb), l'Holmium (Ho) et le Thulium (Th). Au total, 7 échantillons sur 15 présentent des concentrations de Cérium (Ce) inférieures aux limites de détection. Les terres rares plus lourdes que le dysprosium (Dy) démontrent une légère augmentation de l'abondance avec l'augmentation du numéro atomique (Er et Yb).

Les échantillons collectés lors de la purge à la station de Saint-Adelphe présentent tous un profil d'ETR similaire (figure 4- 1 -b) caractérisé par une forme générale en "M" et montrant un enrichissement en MREEs par rapport aux HREEs et LREEs. Les concentrations en terres rares augmentent avec le numéro atomique entre le Lanthane (La) et le Gadolinium (Gd) et diminuent légèrement entre le Gd et l'Ytterbium (Yb). L'échantillon prélevé après 5 minutes de purge présente une concentration de Praséodyme (Pr) inférieure à la limite de détection et 13 échantillons sur 15 présentent des concentrations de Tm inférieures aux limites de détection du laboratoire.

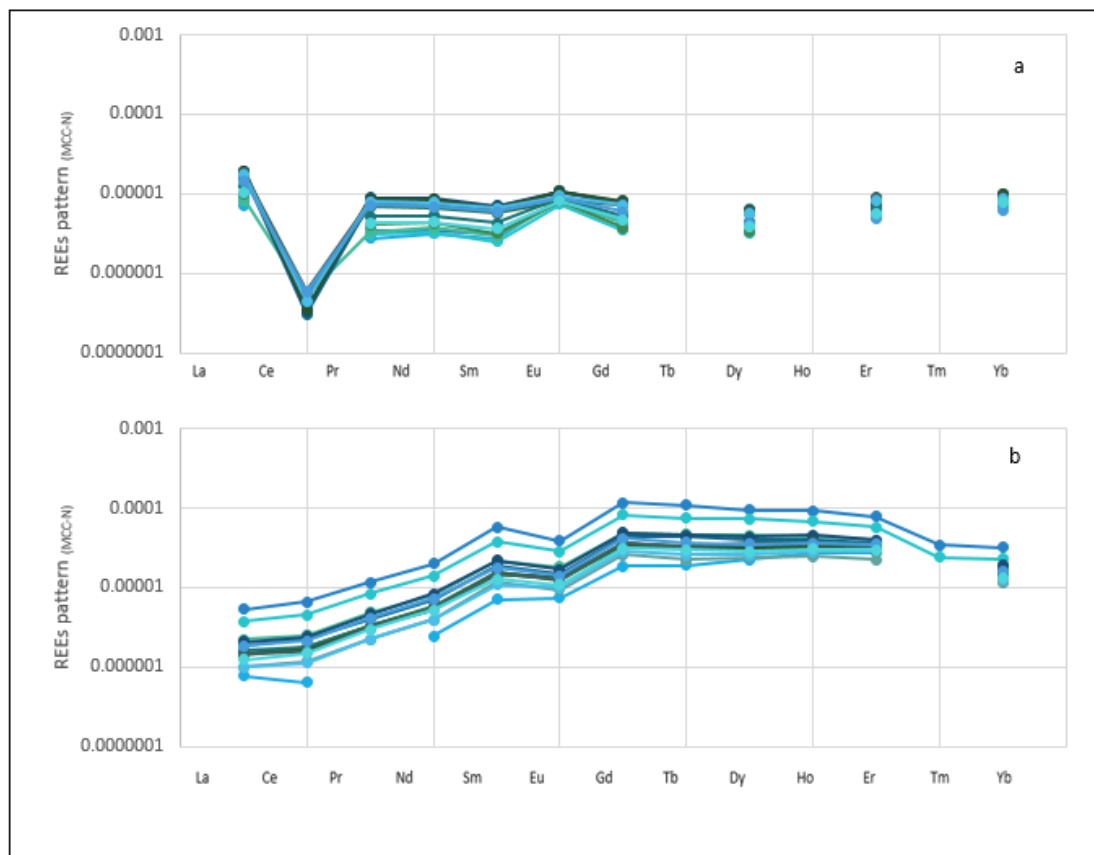


Figure 4- 1: Concentrations en ETRs normalisées à la croûte continentale moyenne (CCM) pour les stations de (a) Saint-Zénon et (b) Saint-Adelphe. Chaque couleur représente un des 15 échantillons d'une même station. Les concentrations sous les limites de détection ne sont pas présentées.

#### 4.5 VARIATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES PARAMETRES MESURES IN SITU

Selon les critères de stabilité du protocole (tableau 1- 1), la stabilisation des paramètres in situ pour la station de Saint-Adelphe se produit après 35 minutes lorsque tous les paramètres présentent des variations inférieures aux critères de stabilisation pendant trois lectures consécutives (température  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , pH  $\pm 0,2$  unité de pH, conductivité électrique spécifique  $\pm 4\%$  de la lecture précédente en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , oxygène dissous  $\pm 0,4$  mg/L et  $\pm 20$  mV pour le potentiel d'oxydoréduction).

La station de Saint-Zénon, quant à elle, montre une première stabilisation des paramètres in situ après 25 minutes de purge. Cependant, des variations de la conductivité électrique spécifique se produisent après 40 minutes ( $-4,7\%$  de la valeur précédente) et 55 minutes ( $-4,6\%$ ). Une nouvelle stabilisation de tous les paramètres est atteinte après 70 minutes.

Pour la station de Mandeville, tous les paramètres mesurés in situ présentent des variations inférieures aux critères de stabilisation pendant trois lectures consécutives après 40 minutes de purge.

Certains éléments chimiques (arsenic, chrome, molybdène, radium, sélénium et uranium) sont sensibles aux conditions d'oxydoréduction dans l'eau, et même un changement mineur des conditions d'oxydoréduction peut entraîner des changements significatifs dans la mobilité des éléments traces (Ayotte et al. 2011). Des changements dans les conditions d'oxydoréduction peuvent se produire, par exemple, lorsque l'eau d'un aquifère est mélangée ou remplacée par de l'eau dont la géochimie est différente. Des changements mineurs dans d'autres paramètres physico-chimiques tels que le pH de l'eau souterraine, l'échange d'ions et la complexation des ions affectent également la mobilité des éléments traces (Ayotte et al. 2011). Cependant, dans cette étude, aucune corrélation directe n'a été trouvée entre les variations de pH/Eh observées in situ et la chimie mesurée en laboratoire. Cela peut s'expliquer par le fait que ces paramètres ne contrôlent pas la spéciation chimique pendant la purge en

raison des taux de réaction nécessaires pour mobiliser/solubiliser ces ions (Domenico and Schwartz 1990) qui peuvent être supérieurs à la vitesse de l'écoulement. D'autre part, le manque de corrélation entre la variation des paramètres observés in situ et la chimie mesurée en laboratoire peut s'expliquer par le manque de sensibilité de la sonde utilisée pour effectuer les mesures sur le terrain.

## **4.6 VARIATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES DE LA COMPOSITION ISOTOPIQUE**

### **4.6.1 $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$**

Le graphique binaire  $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  de la figure 4- 2 présente les valeurs obtenues pour les échantillons prélevés, ainsi que la ligne météorique des précipitations globales (GMWL) et locales (Lanaudière et Mauricie). Les échantillons prélevés sont pour la plupart au-dessus des lignes météoriques des précipitations, à l'exception d'un échantillon de la station de St-Zénon en 2020 ( $t= 70$  min) et d'un échantillon de la station de Mandeville ( $t= 40$  min). Les données de la ligne météorique locale proviennent des données PACES (CERM-PACES 2022). Les échantillons se trouvent tous à l'interface entre l'eau de recharge hivernale (froide comme la neige) et l'eau de recharge pluviale (plus chaude). Tous les échantillons d'une même station sont regroupés au même endroit sur le graphique. Les trois stations diffèrent les unes des autres par leur rapport  $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ . Les échantillons de Mandeville sont enrichis en isotopes légers par rapport aux deux autres stations, tandis que les échantillons de la station de Saint-Adelphe sont enrichis en éléments lourds. Par rapport aux deux autres stations, les échantillons de Saint-Zénon ont une position intermédiaire en 2021. Contrairement à 2021, les

échantillons prélevés en 2020 à Saint-Zénon ne sont pas groupés et montrent une grande variabilité des concentrations en  $\delta^{18}\text{O}$  tout au long de la purge.

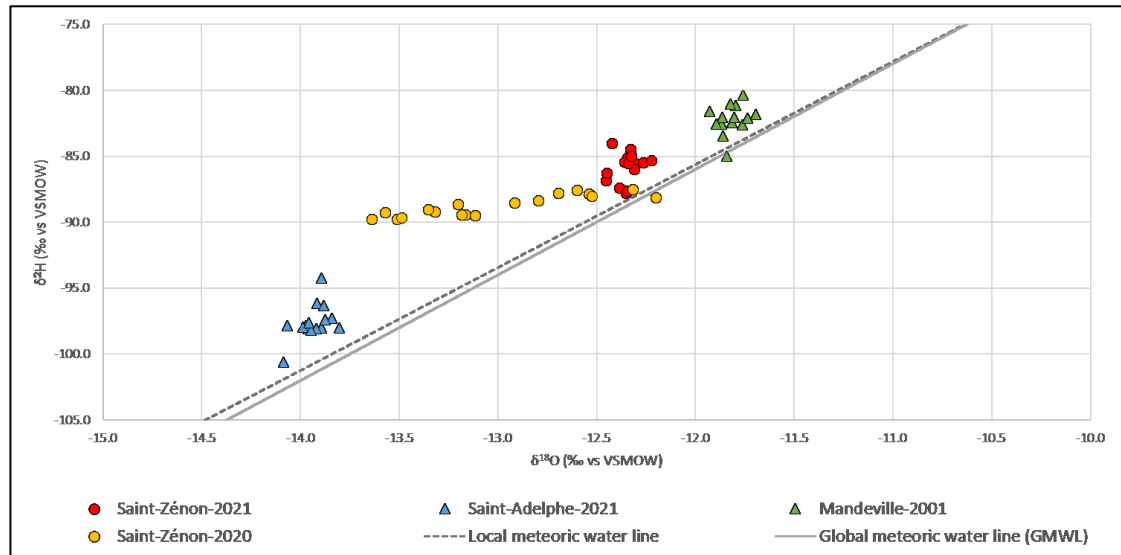
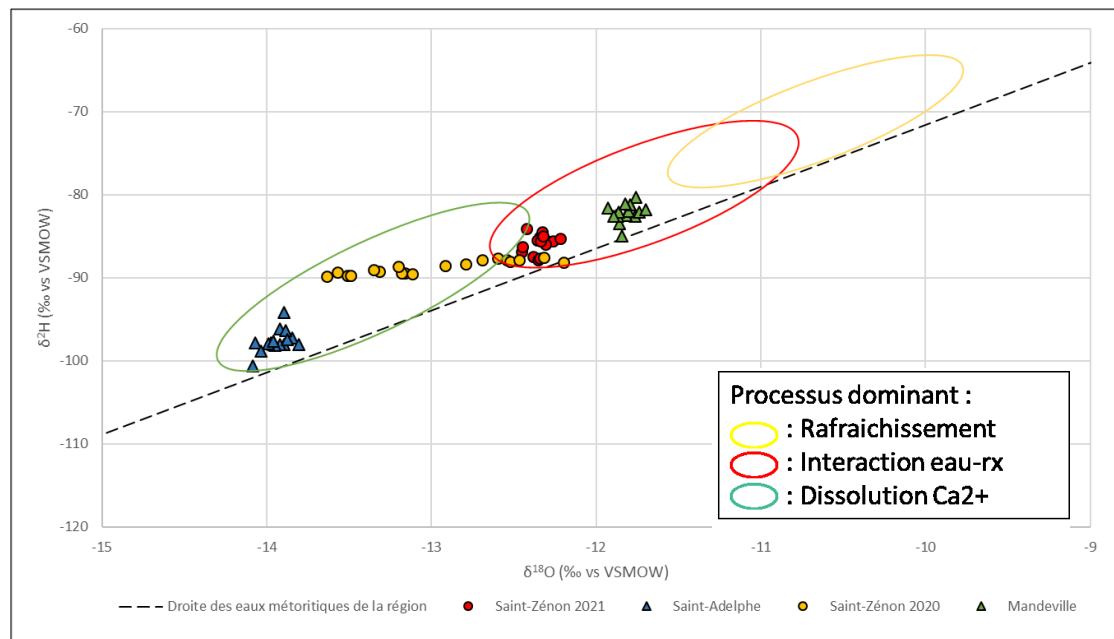


Figure 4- 2: Diagramme binaire de  $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$ . La droite météorique locale a été obtenue à partir des données du PACES-LAMEMCN (CERM-PACES 2022)

Tremblay et al. (2021), ont développé un modèle hydrogéologique conceptuel des régions de Lanaudière et de la Mauricie en faisant des statistiques multivariées sur une base de données à l'échelle régionale (plus de 300 échantillons d'eau souterraine). Ce qui leur a permis d'établir une série de processus dominant la chimie de l'eau spécifique aux régions de Lanaudière et de l'Est de la Mauricie. Ils ont ainsi pu mettre en relation les processus dominants et la chimie isotopique ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ ) de l'eau souterraine. Selon leur modèle, la dissolution de la calcite domine pour les échantillons d'eau souterraine avec des rapports isotopiques plus faibles qui correspondent à des conditions de recharge plus froides. Dans de telles conditions, la concentration de  $\text{CO}_{2(\text{aq})}$  augmente pour former de l'acide carbonique,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , qui diminue le pH de l'eau souterraine et permet la dissolution de la calcite (Appelo and Postma 2004; Tremblay et al. 2021). Les échantillons dominés par le rafraîchissement et les interactions entre l'eau et la roche présentent des rapports isotopiques relativement élevés. Le volume d'eau douce pouvant être mélangé à l'eau de mer est plus important au début du printemps et à la fin de l'été, périodes caractérisées par des isotopes plus lourds. Ces résultats isotopiques suggèrent que les paramètres physicochimiques des eaux souterraines, tels que

la température de l'eau de recharge, ont un impact plus important sur les processus hydrogéochimiques affectant la chimie des eaux souterraines que l'environnement géologique (Tremblay et al. 2021). La figure 4- 3 est adaptée de Tremblay et al. (2021) et permet de comparer, en termes de processus hydrogéochimiques, les échantillons de la présente étude avec les échantillons prélevés sur tout le territoire du PACES-LAMEMCN. Tous les échantillons de Saint-Adelphe sont dans le champ de la dissolution de la calcite. Les échantillons de Mandeville sont regroupés dans la zone où le rafraîchissement et l'interaction eau-roche sont prédominants. Pour la station de Saint-Zénon, les échantillons prélevés lors de la purge 2020 montrent l'influence d'une composition mixte entre les processus de " dissolution de la calcite " et " interactions eau-roche ".



de l'eau souterraine échantillonnée.

**Figure 4- 3: Diagramme binaire de  $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$ . Les ellipses représentent les processus hydrogéochimiques dominants des eaux souterraines (modifiés de Tremblay et al. 2021)**

Les données obtenues en 2021 pour les stations de Saint-Adelphe et de Mandeville sont conformes à cette attente puisqu'elles montrent une variabilité temporelle non significative pendant la purge et que les variations ne suivent pas de tendance au cours du temps. Les

données collectées à Saint-Zénon en 2020 montrent une variabilité temporelle pendant la purge, ainsi qu'entre 2020 et 2021 (variations interannuelles). L'enrichissement en oxygène 18 suggère un changement dans la recharge des eaux pompées en 2020 qui est renforcé par le décalage des points vers les eaux plus chaudes et les points de 2021. Le contexte hydrogéologique (aquifère libre) de la station et le comportement isotopique stable de l'eau suggèrent un mélange potentiel dans la source de l'eau purgée.

#### 4.6.2 $\delta^{13}\text{C-DIC}$

La figure 4- 4 est un diagramme du  $\delta^{13}\text{C-DIC}$  en fonction du temps pour les trois stations. Les barres d'erreur représentent l'incertitude sur la méthode. Les variations observées pendant la purge pour ce paramètre sont faibles ou peu significatives et ne suivent aucune tendance marquée. Comme mentionné précédemment, les valeurs obtenues pour la station de Saint-Zénon en 2020 et 2021 sont très rapprochées ce qui implique qu'il n'y a pas de variations interannuelles importantes dans le contenu en  $\delta^{13}\text{C-DIC}$ .

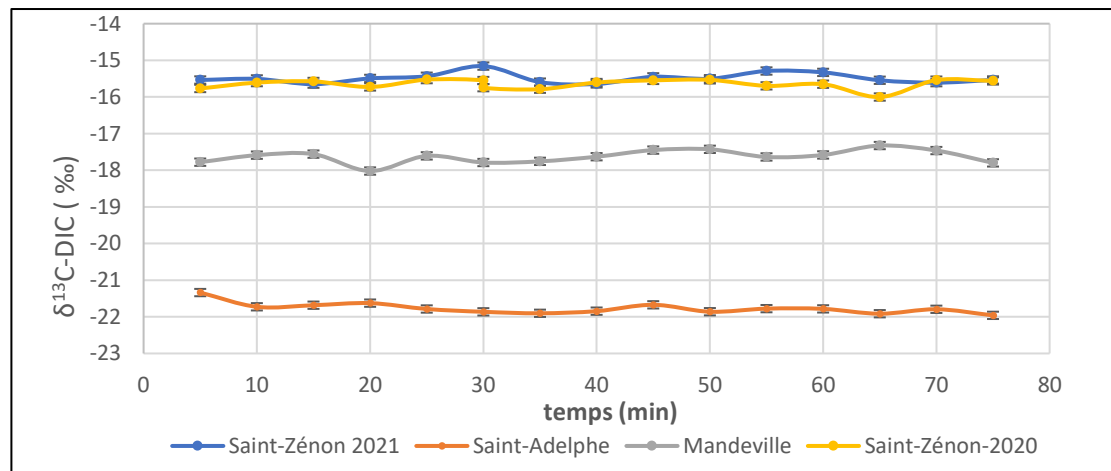


Figure 4- 4:  $\delta^{13}\text{C-DIC}$  en fonction du temps (min) pour les stations de Saint-Zénon (2020-2021), Mandeville (2021) et Saint-Adelphe (2021)

La station de Saint-Adelphe présente un contenu en  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  qui est appauvri comparativement aux deux autres stations avec des valeurs avoisinant les -22 ‰. Cette signature en  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$



s'apparente à la dégradation de la végétation naturelle (C-3) des régions tempérées modernes, qui possèdent des valeurs entre -23 ‰ à -27‰ (Clark and Fritz 1997). La présence d'argile reposant sur le roc, la proximité de milieux humides ainsi que l'accumulation de CO<sub>2</sub> dans la zone racinaire sont des sources crédibles de matière organique dans l'aquifère. Le contexte hydrogéologique de cette station et ces résultats suggèrent un très faible taux de dissolution des carbonates ou l'influence de la matière organique dans l'aquifère.

#### **4.7 VARIATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS MAJEURS ET MINEURS**

Les figures suivantes (figure 4- 5, figure 4- 6 et figure 4- 7) sont des représentations graphiques schématiques sans dimension de la concentration en fonction du temps des différents éléments chimiques (baryum, bore, cadmium, calcium, cuivre, fer, lithium, magnésium, manganèse, molybdène, nickel, plomb, potassium, sélénium, sodium, strontium, uranium et zinc) analysés pour les trois stations échantillonnées. Ils permettent d'avoir une vision globale de l'évolution temporelle des concentrations tout au long de la purge et de constater certains comportements récurrents. Les points rouges représentent des échantillons dont les concentrations se trouvent sous les limites de détection du laboratoire. Les lignes verticales rouges représentent le moment où la stabilisation des paramètres mesurés in situ a été constatée pour la première fois.

Pour les échantillons de Saint-Zénon (figure 4- 5), les principaux éléments (calcium, magnésium, potassium et sodium) présentent des profils sans tendance apparente tout au long de la purge, tandis que les concentrations de cuivre suivent une diminution relativement constante. À partir de 40 minutes, les concentrations en calcium, en potassium et en manganèse augmentent et les concentrations en sodium, uranium et baryum diminuent. Le lithium, le molybdène, le nickel et le sélénium présentent tous des concentrations inférieures à

la limite de détection pendant les 60 premières minutes et des concentrations détectables par la suite.

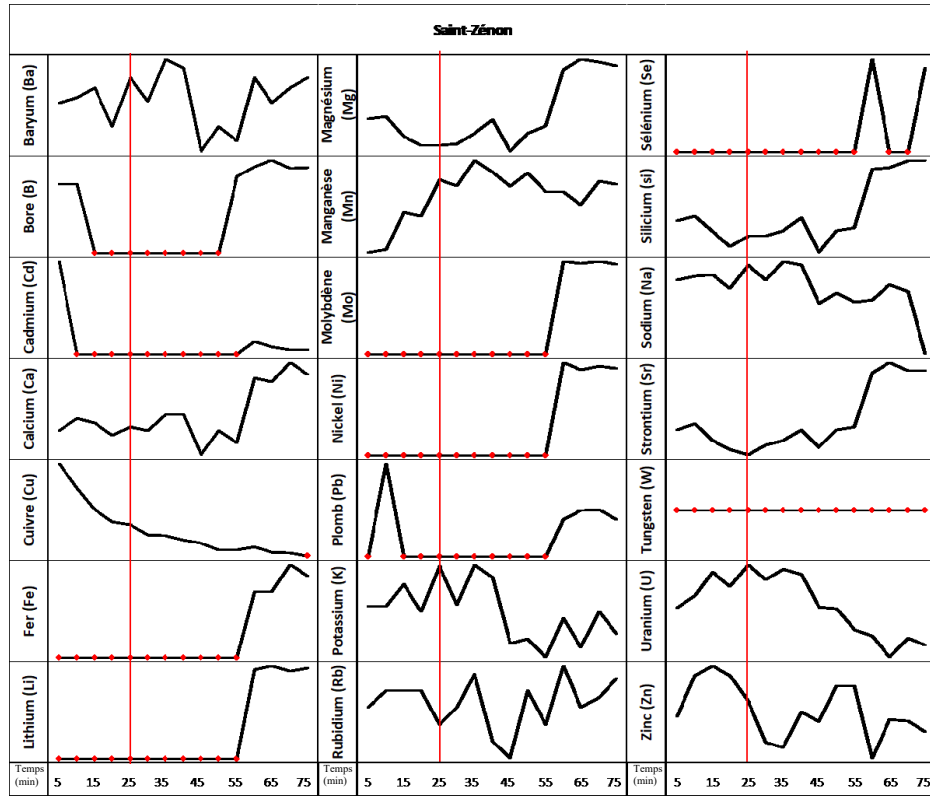


Figure 4- 5: Graphique adimensionnel des concentrations en fonction du temps (baryum, bore, cadmium, calcium, cuivre, fer, lithium, magnésium, manganèse, molybdène, nickel, plomb, potassium, sélénium, sodium, strontium, uranium et zinc) de la station de Saint-Zénon. Les lignes verticales rouges représentent le moment où la stabilisation des paramètres mesurés in situ a été constatée pour la première fois.

Les échantillons de Mandeville (figure 4- 6) présentent des patrons d'évolution temporelle (variations) similaires pour la plupart des éléments dont les concentrations ont pu être détectées par le laboratoire. Bien que la stabilisation des paramètres se produit après 40 minutes, il est possible de voir un changement brusque dans les concentrations qui se traduit par une augmentation des concentrations de la plupart des éléments (sauf le rubidium et le fer) suivie d'une diminution graduelle.

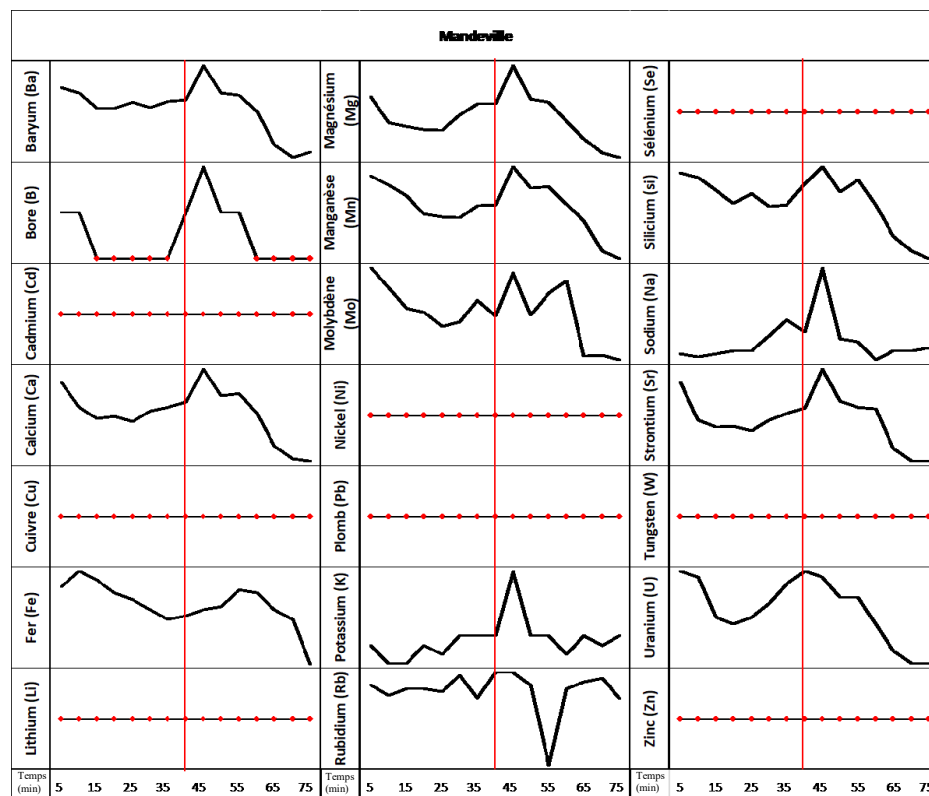


Figure 4- 6: Graphique adimensionnel des concentrations en fonction du temps (baryum, bore, cadmium, calcium, cuivre, fer, lithium, magnésium, manganèse, molybdène, nickel, plomb, potassium, sélénium, sodium, strontium, uranium et zinc) de la station de Mandeville. Les lignes verticales rouges représentent le moment où la stabilisation des paramètres mesurés in situ a été constatée pour la première fois

La chimie des échantillons de Saint-Adelphe (figure 4- 7) montre un schéma de variation grossier qui suggère que, dans une certaine mesure, les concentrations en éléments majeurs, mineurs et traces, sont toutes contrôlées par les mêmes facteurs. Les concentrations en Ba, B, Ca, Li, Mg, Mn, K, Rb, Si, Na, Sr, W et U varient conjointement alors que les concentrations en Se et Zn semblent présenter une tendance inverse aux autres éléments.

Avec l'objectif d'évaluer les variations temporelles des concentrations, les concentrations obtenues après stabilisation pour un élément sont comparées avec une valeur de référence. Cette valeur de référence est déterminée par la concentration obtenue lors de la stabilisation des paramètres mesurés in situ. Il devient donc possible d'identifier le nombre

d'échantillons subséquents dont les concentrations varient de plus de 5%, 10% ou 20% (équation 1).

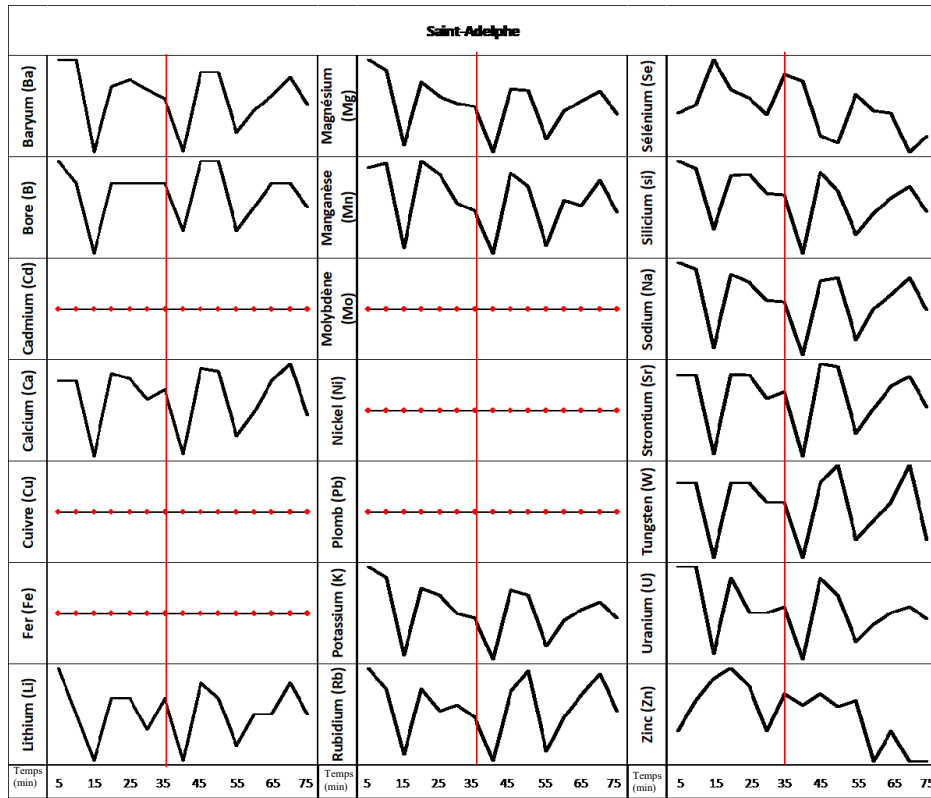


Figure 4- 7: Graphique adimensionnel des concentrations en fonction du temps (baryum, bore, cadmium, calcium, cuivre, fer, lithium, magnésium, manganèse, molybdène, nickel, plomb, potassium, sélénium, sodium, strontium, uranium et zinc) de la station Saint-Adelphe. Les lignes verticales rouges représentent le moment où la stabilisation des paramètres mesurés in situ a été constatée pour la première fois

Le calcul du pourcentage de variation de la concentration à un temps t se fait à l'aide de l'équation suivante :

Équation 1: Calcul du pourcentage de variation de la concentration à un temps t.

$$\%Variation_t = \left( \frac{[Concentration]_t - [Concentration]_{stabilisation}}{[Concentration]_{stabilisation}} \right) * 100$$

Dans laquelle,

$\%Variation_t$  = % de variation de la concentration par rapport à la concentration mesurée lors de la stabilisation

$[Concentration]_t$  = Concentration obtenue pour un temps t

$[Concentration]_{stabilisation}$  = Concentration de référence (mesurée lors de la stabilisation)

Par exemple, pour les concentrations en strontium de la station de Saint-Zénon, la valeur de référence est de 0,959 mg/L, soit la concentration de l'échantillon prélevé après 25 minutes de purge, ce qui correspond à la première stabilisation des paramètres in situ. Voici un exemple de calcul permettant de calculer le pourcentage de variation de la concentration (1,26mg/L) de l'échantillon prélevé à 75 minutes à la station de Saint-Zénon :

$$\%Variation_{75min} = \left( \frac{1,26 \text{ mg/L} - 0,959 \text{ mg/L}}{0,959 \text{ mg/L}} \right) * 100$$

$$\%Variation_{75min} = -31,38\%$$

En répétant le calcul, il est possible de dénombrer le nombre d'échantillons qui présentent des variations spécifiques (plus de 5%, plus de 10% et plus de 20%) des concentrations suite à l'atteinte de la stabilité des paramètres in situ. Pour le strontium, 8 échantillons sur 10 (80%) des échantillons prélevés à Saint-Zénon après la stabilisation présentent des concentrations qui varient de plus de 5% par rapport à la valeur de référence alors que 5 des 10 échantillons (50%) prélevés après la stabilisation ont des concentrations variant de plus de 10% par rapport à la valeur de référence. Finalement, seulement 40% des échantillons présentent des variations supérieures à 20%.

Chaque station présente des patrons de variations qui lui sont propres. Les valeurs obtenues pour tous les éléments analysés pour les trois stations sont présentées dans le tableau 4- 4. Pour la station de Saint-Zénon, les éléments présentant les plus forts taux de variation (plus de 20% p/r à la valeur de référence) sont le cuivre (60% des échantillons), la silice (20% des échantillons), le sodium (10% des échantillons), le strontium (40% des échantillons), l'uranium (20% des échantillons) et le zinc (40% des échantillons).

Pour la station de Mandeville, les éléments présentant les concentrations avec les plus fortes variations (plus de 20%) par rapport à la valeur de référence sont le baryum (14% des

échantillons), le fer (43% des échantillons), le rubidium (29% des échantillons) et l'uranium (43% des échantillons).

Pour la station de Saint-Adelphe, seuls le sélénium et le zinc présentent des concentrations variant de plus de 20% par rapport à la valeur de référence ce qui représente respectivement 75% et 50% des échantillons prélevés après la stabilisation.

Tableau 4- 4: Pourcentage des échantillons qui présentent des variations significatives (>5%, >10% et >20%) suite à l'atteinte de la stabilisation des paramètres. Les statistiques sont calculées en considérant la concentration obtenue lors de la stabilisation comme valeur de référence.

| % variation p/r valeur de stabilisation | Saint-Zénon |      |      | Mandeville |      |      | Saint-Adelphe |      |      |
|---|-------------|------|------|------------|------|------|---------------|------|------|
|   | 5%          | 10%  | 20+% | 5%         | 10%  | 20+% | 5%            | 10%  | 20+% |
| Baryum (Ba)                             | 30%         | 0%   | 0%   | 57%        | 57%  | 14%  | 63%           | 13%  | 0%   |
| Bore (B)                                | <LOD        | <LOD | <LOD | 0%         | 0%   | 0%   | 75%           | 25%  | 0%   |
| Cadmium (Cd)                            | <LOD        | <LOD | <LOD | <LOD       | <LOD | <LOD | <LOD          | <LOD | <LOD |
| Calcium (Ca)                            | 50%         | 20%  | 0%   | 57%        | 57%  | 0%   | 50%           | 13%  | 0%   |
| Cuivre (Cu)                             | 100%        | 100% | 60%  | <LOD       | <LOD | <LOD | <LOD          | <LOD | <LOD |
| Fer (Fe)                                | <LOD        | <LOD | <LOD | 100%       | 86%  | 43%  | <LOD          | <LOD | <LOD |
| Lithium (Li)                            | <LOD        | <LOD | <LOD | <LOD       | <LOD | <LOD | 25%           | 13%  | 0%   |
| Magnésium (Mg)                          | 60%         | 40%  | 0%   | 57%        | 57%  | 0%   | 63%           | 25%  | 0%   |
| Manganèse (Mn)                          | 60%         | 10%  | 0%   | 43%        | 43%  | 0%   | 63%           | 13%  | 0%   |
| Molybdène (Mo)                          | <LOD        | <LOD | <LOD | 71%        | 0%   | 0%   | <LOD          | <LOD | <LOD |
| Nickel (Ni)                             | <LOD        | <LOD | <LOD | <LOD       | <LOD | <LOD | <LOD          | <LOD | <LOD |
| Plomb (Pb)                              | <LOD        | <LOD | <LOD | <LOD       | <LOD | <LOD | <LOD          | <LOD | <LOD |
| Potassium (K)                           | 80%         | 50%  | 0%   | 14%        | 0%   | 0%   | 50%           | 13%  | 0%   |
| Rubidium (Rb)                           | 60%         | 30%  | 0%   | 86%        | 71%  | 29%  | 75%           | 13%  | 0%   |
| Sélénium (Se)                           | <LOD        | <LOD | <LOD | <LOD       | <LOD | <LOD | 88%           | 88%  | 75%  |
| Silicium (Si)                           | 60%         | 40%  | 20%  | 71%        | 43%  | 29%  | 63%           | 25%  | 0%   |
| Sodium (Na)                             | 60%         | 10%  | 10%  | 14%        | 0%   | 0%   | 63%           | 25%  | 0%   |
| Strontium (Sr)                          | 80%         | 50%  | 40%  | 57%        | 29%  | 0%   | 50%           | 13%  | 0%   |
| Tungstène (W)                           | <LOD        | <LOD | <LOD | <LOD       | <LOD | <LOD | 63%           | 13%  | 0%   |
| Uranium (U)                             | 70%         | 70%  | 20%  | 86%        | 57%  | 43%  | 38%           | 13%  | 0%   |
| Zinc (Zn)                               | 100%        | 90%  | 40%  | <LOD       | <LOD | <LOD | 88%           | 88%  | 50%  |

Dans les prochains paragraphes, l'évolution temporelle de certains éléments ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{+}$ ) ainsi que l'évolution temporelle du ratio  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  et du ratio  $\text{Na}^{+}/\text{Ca}^{2+}$  seront discutées plus en profondeur.

## Calcium

Les concentrations en calcium (figure 4- 8) sont très variables entre les trois stations. La station de St-Zénon présente des concentrations de calcium relativement stables au cours des 40 premières minutes de la purge (128 mg/L à 133 mg/L). Cependant, les variations augmentent en intensité entre 40 minutes et 75 minutes (entre 123 et 146 mg/L). La station de Saint-Adelphe présente les concentrations de calcium les plus élevées tout au long de la purge avec des concentrations variant considérablement entre un minimum de 183 mg/L et un maximum de 219 mg/L. La station de Mandeville présente des concentrations en calcium plus faibles que les deux autres stations et varie très peu au cours de la purge (26 mg/L - 34 mg/L).

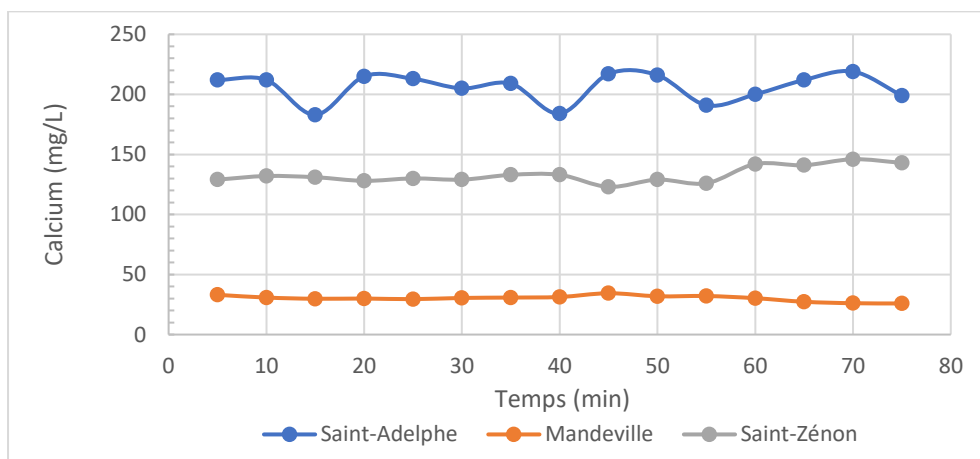


Figure 4- 8: Concentrations en calcium (mg/L) en fonction du temps passé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe

Le calcium qui est un élément majeur de l'eau souterraine, se retrouve en concentration importante ( $>20$  mg/L) dans tous les échantillons analysés dans le cadre de ce projet. Des variations significatives de cet élément peuvent indiquer un changement dans les



processus chimiques dominants ayant lieu dans le puits pendant la purge, mais également peuvent être indicatrices d'un mélange entre des eaux de compositions différentes. Pour la station de Saint-Zénon, les variations mesurées des concentrations sont bien corrélées avec les changements observés (à 40 minutes et à 70 minutes) pour les paramètres in situ pour cette station. Les variations significatives des concentrations en calcium mesurées à Saint-Adelphe ne peuvent être corrélées avec les mesures des paramètres in situ observés pour cette station, puisque, les paramètres sont demeurés stables après les 35 premières minutes de la purge. Cependant, comme mentionné précédemment, ces variations suivent la même tendance que plusieurs autres éléments chimiques (Ba, B, Li, Mg, Mn, K, Rb, Si, Na, Sr, W et U). L'origine des variations du calcium (et autres éléments) peut s'expliquer par l'effet de la purge à haut débit avec l'utilisation d'une cuve de garde. La pompe s'active à haut débit dans le puits lorsque le niveau d'eau dans la cuve de garde diminue ce qui peut faire venir une certaine quantité d'eau ayant une chimie distincte des unités surplombant le roc comme l'eau interstitielle des argiles ou l'eau de l'aquifère sableux en surface par une connexion hydraulique induite par le forage. Ces connexions hydrauliques naturelles et anthropiques ont été documentées (Richard et al. 2014).

### **Strontium**

Les concentrations de strontium (figure 4- 9) aux stations de Mandeville et de Saint-Zénon sont très similaires et varient peu pendant la purge, avec des concentrations maximales de 0,928 mg/L et 1,29 mg/L et des concentrations minimales de 0,762 mg/L et 0,959 mg/L respectivement. Les concentrations de strontium à Saint-Zénon ont tendance à augmenter légèrement après 45 minutes alors que celles de Mandeville ont tendance à diminuer après 45 minutes. Pour la station de Saint-Zénon, cela correspond au moment où il y a eu une variation significative (plus grande que le critère de stabilité) des paramètres observés in situ. La station de Saint-Adelphe présente des concentrations en strontium de cinq (5) à six (6) fois

supérieures à celles des deux autres stations (entre 5,08 mg/L et 6,12 mg/L) qui varient tout au long de la purge.

Le strontium dans l'eau souterraine provient principalement de l'hydrolyse des minéraux, comme les feldspaths potassiques, qui incorporent le strontium en traces dans leur structure cristalline (Walter et al. 2018). Les interactions eaux-roches prolongées peuvent être à l'origine d'un enrichissement en strontium dans l'eau (Zhang et al. 2018). La forte concentration en strontium de la station de Saint-Adelphe suggère un contact prolongé entre l'eau souterraine et le milieu géologique de l'aquifère. Les variations observées quant à elles ne suivent pas de tendance précise dans le temps, mais sont cohérentes avec les variations observées pour les autres éléments présentés dans le graphique adimensionnel de la station de Saint-Adelphe.

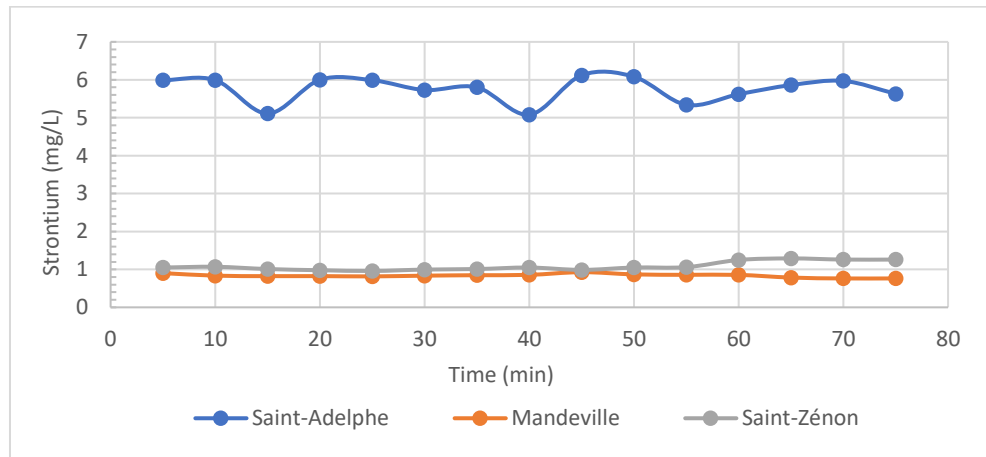


Figure 4- 9: Concentrations en strontium (mg/L) en fonction du temps passé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe

### Ratio $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$

Walter et al. (2018) ont proposé un rapport de masse  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  de  $\approx 40$  pour caractériser la signature chimique des eaux souterraines de type saumures précambriennes du Bouclier canadien (PSB-type). Ce rapport de masse  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  est compatible avec celui

obtenu pour les plagioclases des roches cristallines ( $\approx 50$ ) constituant la croûte terrestre. L'hydrolyse des plagioclases est responsable des teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Sr}^{2+}$  des eaux souterraines plus profondes. Pour les eaux plus jeunes ou plus près des zones de recharge, les carbonates sont responsables des teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Sr}^{2+}$  (Walter et al. 2023).

Le rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  a été calculé pour les trois stations et est présenté à la figure 4-10. La station de Saint-Zénon présente un rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  beaucoup plus élevé que les deux autres stations, qui varie significativement au cours de la purge avec une moyenne de  $123,24 \pm 14$ . Les concentrations en strontium et en calcium augmentent toutes les deux lors de la purge, mais l'augmentation du ratio  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  est l'expression d'une augmentation plus importante des concentrations en calcium par rapport à celles en strontium. Le contexte hydrogéologique de Saint-Zénon (aquifère rocheux surmonté d'un aquifère granulaire à nappe libre) et les résultats suggèrent que les variations sont causées par un changement dans la provenance de l'eau alimentant le puits ou l'influence d'une eau plus jeune ou moins évoluée ( $\text{Ca-HCO}_3$ ) par mélange.

Saint-Adelphe et Mandeville présentent des ratios  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  similaires qui varient très peu dans le temps. ( $35,77 \pm 0,4$  et  $36,07 \pm 1,02$  respectivement) et qui s'approchent de celui des PSB-type, ce qui suggère que la chimie des eaux souterraines a évolué par des interactions eaux-roches prolongées.

Les concentrations en calcium et en strontium de Saint-Adelphe sont variables tout au long de la purge. Cependant, comme plusieurs éléments varient conjointement, dont le calcium, le ratio demeure relativement stable.

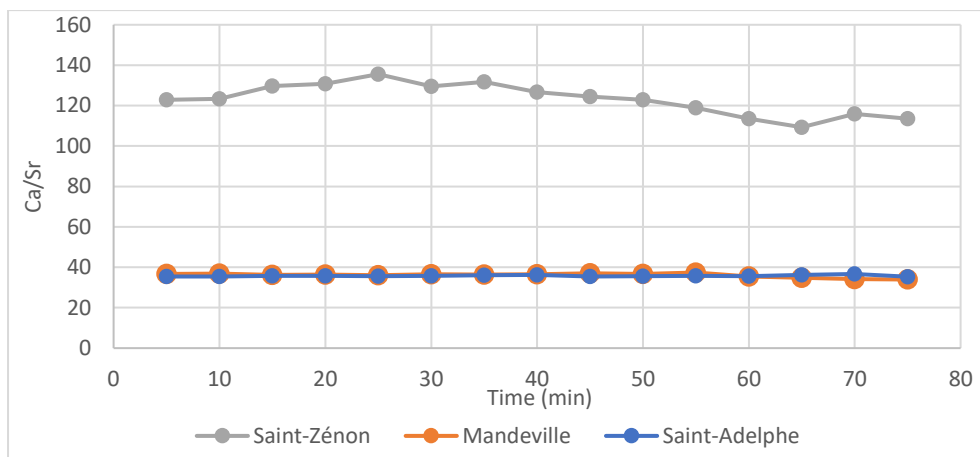


Figure 4- 10: Ratio calcium/strontium ( $Ca^{2+}/Sr^{2+}$ ) en fonction du temps passé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe

### Manganèse

Les concentrations en manganèse sont très variables pour les trois stations (figure 4-11). Les concentrations en manganèse des stations de Saint-Adelphe et de Mandeville diminuent alors que la station de Saint-Zénon montre une augmentation des concentrations de manganèse au cours du temps. Les concentrations de manganèse de la station Saint-Adelphe demeurent les plus élevées des 3 stations considérées dans cette étude, avec une valeur minimale de 0,062 mg/L, une valeur maximale de 0,078 mg/L et une moyenne de 0,072 mg/L  $\pm$  0,005. La station de Saint-Zénon présente la concentration la plus faible (min : 0,020mg/L, max : 0,045 et moyenne : 0,035mg/L  $\pm$  0,007) et celles de Mandeville sont intermédiaires (min : 0,006mg/L, max : 0,067 moyenne : 0,061 mg/L  $\pm$  0,004)

Les variations des concentrations en manganèse ne sont pas corrélées aux variations des paramètres in situ en lien avec les conditions d'oxydoréduction ( $O^2$  et Eh). Cependant, il une corrélation négative est observée entre les concentrations en Manganèse et le  $\delta^{13}C$  tel que présenté sur la figure 4- 12.

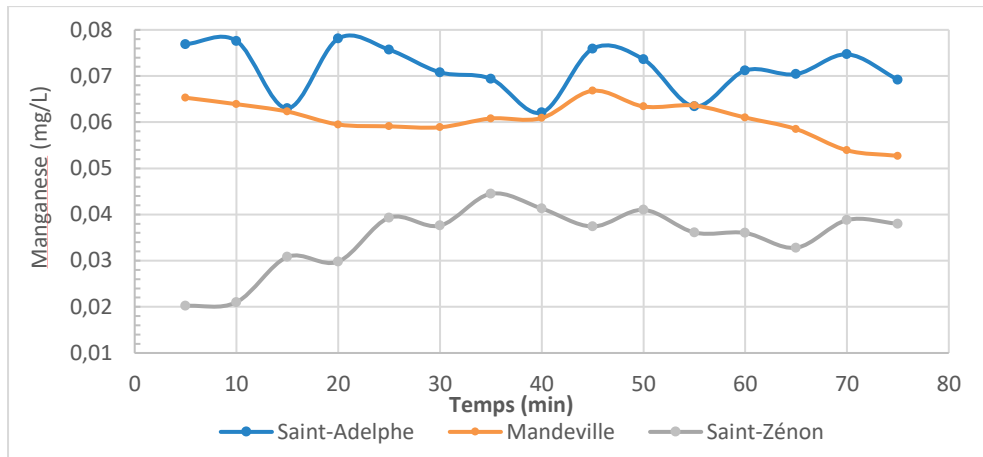


Figure 4- 11: Concentrations en manganèse (mg/L) en fonction du temps passé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe

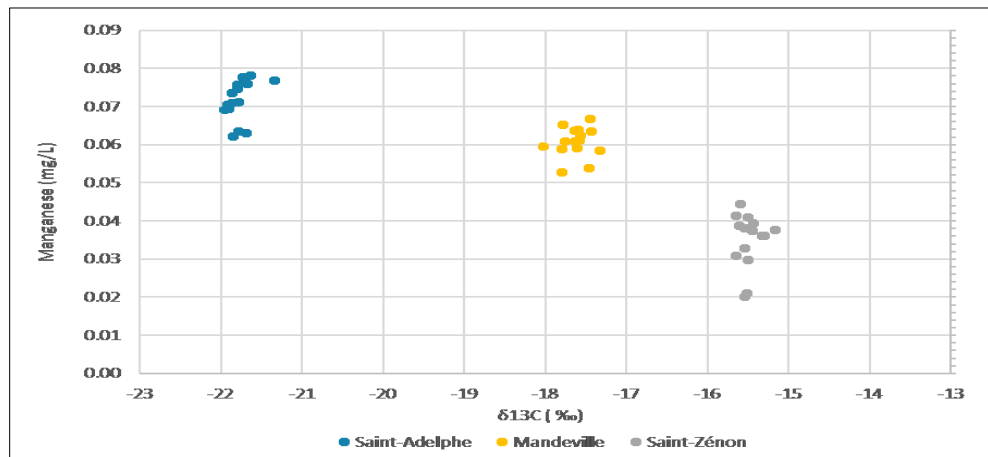


Figure 4- 12: Diagramme binaire du Manganèse et du  $\delta^{13}\text{C}$  pour les stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe

La présence matière organique dans l'eau souterraine rend l'environnement réducteur favorisant ainsi la dissolution des oxydes de manganèse présents dans l'aquifère (Stenvik et al. 2022). Le contexte géologique et les concentrations plus élevées en manganèse dans les échantillons de Saint-Adelphe et dans une moindre mesure de Mandeville, suggèrent que l'eau souterraine de ces stations a pu entrer en contact avec de la matière organique. Considérant que des valeurs entre -23 ‰ à -27‰ s'apparentent à la dégradation de la végétation naturelle (C-3) des régions tempérées modernes (Clark and Fritz 1997), il est possible d'émettre l'hypothèse que les valeurs obtenues en  $\delta^{13}\text{C}$  dans les échantillons de Saint-Adelphe et de

Mandeville ne sont pas seulement une conséquence de la libération de  $\text{CO}_2$  dans la zone racinaire et que la présence de matière organique dans le système permet de maintenir les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  à environ  $-22\text{‰}$  et de mobiliser le manganèse.

### Ratio $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$

La figure 4- 13 présente le ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ , calculé en mol/L, pour les trois stations pendant les 75 minutes de purge. La station de Saint-Zénon présente un ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  qui varie entre 4,20 et 3,04 avec une moyenne de 3,90 et un écart type de 0,3. Le ratio est relativement stable pendant les 40 premières minutes de la purge et diminue progressivement par la suite. Les échantillons prélevés à Mandeville ont un ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  qui varie entre 17,90 et 23,02 avec une moyenne de 19,94 et un écart type de 1,48. Les variations observées sur la figure 4- 13 sont représentatives des variations des concentrations en calcium et en potassium observées sur la figure 4- 6. Les échantillons de Saint-Adelphe présentent un ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  assez stable tout au long de la purge avec une moyenne de  $2,41 \pm 0,06$ .

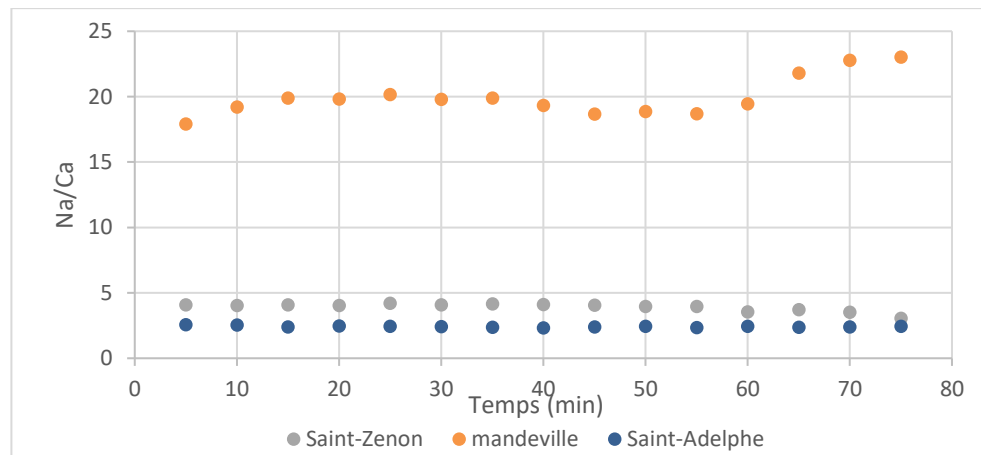


Figure 4- 13: Ratio sodium sur calcium (Na/Ca) en fonction du temps écoulé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon, Mandeville et Saint-Adelphe

Des ratios élevés en  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  comme ceux de Mandeville sont souvent associés à des eaux susceptibles d'être plus évoluées chimiquement, reflétant ainsi les interactions eaux-roche avec les minéraux du socle rocheux tout au long du chemin de l'écoulement (Bondu et

al. 2018). Le sodium et le calcium étant des éléments majeurs de l'eau, des variations dans ce ratio suggèrent un changement significatif dans la composition de l'eau échantillonnée qui peut s'expliquer par l'effet de la purge à haut débit du puits. Une modification des conditions d'écoulement, causée par la purge, peut modifier la contribution de différentes fractures dans le socle rocheux occasionnant un mélange entre deux (ou plusieurs) eaux de compositions chimiques différentes s'exprimant ici par une augmentation du ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  au cours de la purge.

#### **4.8 VARIATION TEMPORELLE DE LA SIGNATURE EN ÉLÉMENTS TERRES RARES (ETRs)**

En l'absence de toute activité minière industrielle susceptible de libérer des terres rares dans l'environnement, les concentrations en terres rares sont uniquement liées à des facteurs géogéniques (Omonona and Okogbue 2017). Plusieurs auteurs s'accordent pour dire que la spéciation aqueuse des terres rares (le patron) n'est pas directement contrôlée par le temps de séjour, le pH ou le potentiel d'oxydoréduction (Guo et al. 2010; Omonona and Okogbue 2017; Tweed et al. 2005; Tweed et al. 2006) et que les schémas des terres rares reflètent principalement un stade précoce de la dissolution minérale (Tweed et al. 2006). Ainsi, les terres rares peuvent être de bons traceurs de l'écoulement et du mélange des eaux souterraines lorsque la minéralogie des différents aquifères varie (Johannesson et al. 1999; Omonona and Okogbue 2017; Smedley 1991) ou lorsque l'effet cumulatif des interactions eau-roche sur les ions majeurs masque les détails du mélange avec de l'eau à faible TDS (Tweed et al. 2006).

Il est donc attendu que si la stabilisation des paramètres in situ pendant la purge implique que l'eau est représentative de l'aquifère échantillonné, les profils des ETR et des concentrations des différents éléments devraient être constants après cette stabilisation.

Afin d'évaluer l'évolution des motifs de terres rares au cours de la purge, les concentrations absolues d'ETR (concentrations totales d'ETR en fonction du temps) et les

motifs de fractionnement (rapport Er/Nd) en fonction du temps, sont représentés dans la figure 4- 14. Le rapport Er/Nd est utilisé (Johannesson 2005) pour évaluer le fractionnement des terres rares et permet de vérifier la présence de changements dans les ratios entre les éléments lourds et légers. Un changement dans le ratio des éléments lourds sur légers peut s'expliquer par différents processus notamment par l'ajout dans le système d'agents complexants (i.e. LnMO (matière organique),  $\text{LnCO}_3^{3+}$ ,  $\text{Ln}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ ,  $\text{Ln}(\text{PO}_4)^0$ ,  $\text{Ln}(\text{SO}_4)^+$  etc..) qui peuvent modifier les concentrations et les profils des terres rares provenant de l'altération de la roche encaissante (Johannesson 2005). Un mélange entre des eaux provenant de différents aquifères peut également être à l'origine d'un changement dans le patron en ETRs, et dans le ratio (Er/Nd) de l'eau prélevée dans un puits.

Pour la station de Saint-Zénon, la concentration totale en terres rares (figure 4- 14-a) de l'eau souterraine est stable au cours des 25 premières minutes et augmente légèrement entre 25 et 40 minutes de purge. Par la suite, les concentrations totales varient légèrement jusqu'à la fin de la purge. Le rapport Er/Nd (figure 4- 14-b) diminue légèrement tout au long de la purge. Cette diminution suggère que l'eau prélevée présente un patron en terres rares qui évolue au cours de la purge avec des concentrations en éléments légers (LREE) qui augmentent ou des concentrations en éléments lourds (HREEs) qui diminuent. Ce comportement suggère un mélange entre des eaux présentant des patrons de terres rares différents.

Les eaux souterraines de la station de Saint-Adelphe présentent des variations importantes de la concentration totale en terres rares (figure 4- 14-a) au cours de la purge, plus particulièrement entre 5 et 10 minutes où les concentrations absolues augmentent de 0,0016 mmol/L à 0,0093 mmol/L. Les concentrations totales diminuent de 0,002 mmol/L à 0,001 mmol/L entre l'échantillon prélevé à 30 minutes et la fin de la purge des eaux souterraines. Le rapport Er/Nd montre également un changement dans le fractionnement entre 5 et 10 minutes et tend à sensiblement augmenter pour le reste de la durée de la purge.



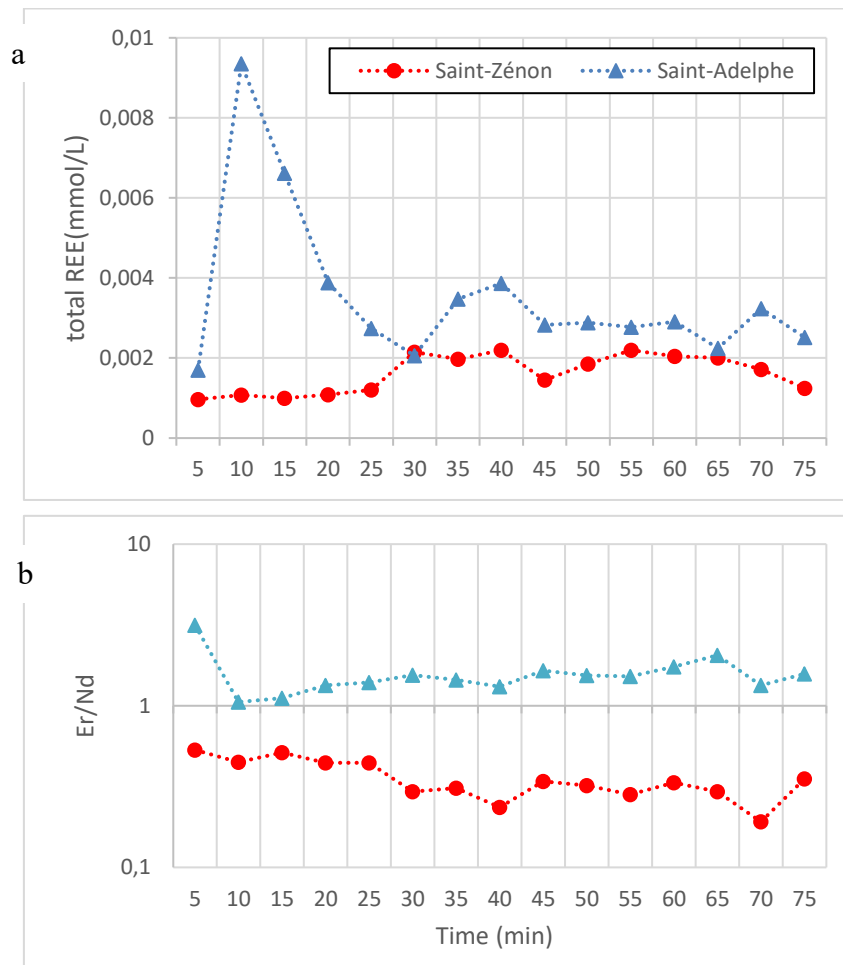
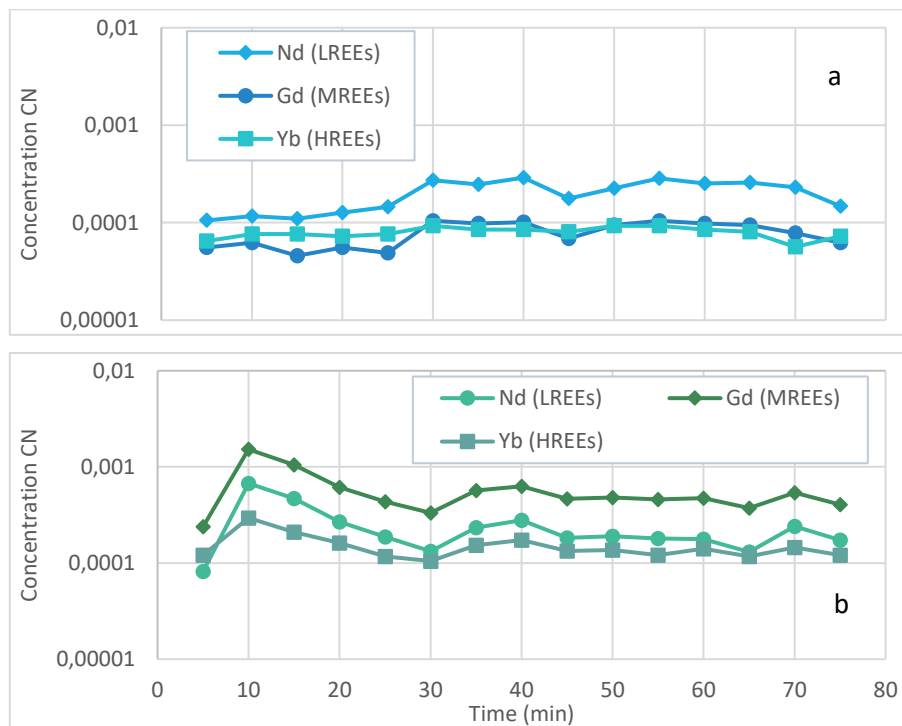


Figure 4- 14: Évolution des (a) concentrations totales en ETRs et (b) ration Er/Nd en fonction du temps passé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon et Saint-Adelphe

Les concentrations de Nd, Gd et Yb sont représentées à la figure 4- 15 en fonction du temps pendant la purge des eaux souterraines. Ces éléments représentent respectivement le groupe des terres rares légères (LREEs), le groupe des terres rares moyennes (MREEs) et le groupe des terres rares lourdes (HREEs). Cette présentation permet de mettre en évidence les changements dans le patron de terres rares (HREEs, MREEs et LREEs) au cours de la purge.

Pour la station de Saint-Zénon (figure 4- 15-a), les terres rares légères (Nd) et les terres rares moyennes (Gd) se comportent essentiellement de la même manière en

augmentant après 25 minutes et en diminuant après 45 minutes. Les terres rares lourdes (Yb), en revanche, ont des concentrations qui varient peu au cours de la période de purge. Ces variations de concentrations pour les LREE, MREE et HREE en fonction du temps montrent un changement dans le patron des terres rares pendant la purge alors que l'Ytterbium ne suit pas le même schéma que les deux autres éléments (Gd et Nd). Ceci suggère deux processus : 1) le mélange d'eau avec deux profils distincts ou 2) l'ajout d'ions carbonatés (mélange avec de l'eau plus jeune) qui permettent l'adsorption préférentielle des terres rares lourdes par rapport aux terres rares légères (Tang and Johannesson 2006).



**Figure 4- 15: Évolution des terres rares légères (Nd), moyennes (Gd) et lourdes (Yb) en fonction du temps passé pendant la purge pour les stations de Saint-Zénon(a) et de Saint-Adelphe(b)**

Les concentrations de LREEs, MREEs et HREEs à la station de Saint-Adelphe (figure 4- 15-b) montrent un schéma similaire pendant la purge, sauf pendant les 5 premières minutes de la purge où la concentration de Nd est plus faible que celle de Yb. Les concentrations augmentent rapidement pour les trois éléments (Nd, Gd et Yb) pendant les 10 premières minutes de la purge et diminuent progressivement jusqu'à 30 minutes. Les concentrations des

HREEs, MREEs et LREEs varient à peu près de la même manière jusqu'à la fin de la purge, ce qui implique que le profil des REEs reste le même jusqu'à la fin de la purge. Pour cette station, la stabilisation des paramètres in situ s'est produite après 35 minutes de purge, ce qui correspond approximativement au moment où les concentrations semblent atteindre un plateau ce qui suggère qu'il n'y a pas (ou très peu) de changements dans la provenance de l'eau pour cette station suivant la stabilisation des paramètres in situ.

À la station de Saint-Adelphe, la variation importante des concentrations en ETR au moment du déclenchement de la purge pourrait s'expliquer par la purge de l'eau qui se trouvait dans le tubage du puits et dont la chimie a pu être modifiée par son contact prolongé avec l'atmosphère (rééquilibration). Une autre façon d'expliquer ce changement significatif des concentrations est l'effet du pompage. L'activation d'un pompage à haut débit peut modifier les conditions physico-chimiques de l'aquifère en ajoutant de l'oxygène dans le système et permettant ainsi la mobilisation des terres rares dans l'eau. (Johannesson 2005).

## CHAPITRE 5

### DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre comprend la discussion et les recommandations de l'étude.

#### 5.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette section, une synthèse des faits saillants présentés dans les sections précédentes est discutée station par station tel que vu sur le tableau 5- 1.

Tableau 5- 1: Synthèse des points saillants pour les stations de Saint-Adelphe, Saint-Zénon et Mandeville

|                          | <i>Saint-Zénon</i>  | <i>Mandeville</i>  | <i>Saint-Adelphe</i>  |
|--------------------------|---|--|---|
| Contexte hydrogéologique | <ul style="list-style-type: none"><li>• Hautes-Terres</li><li>• Près d'une frontière hydraulique (ruisseau et lac)</li><li>• Nappe non confinée</li><li>• Puits (90 m prof) : 15 m de sable et gravier reposant sur le roc fracturé</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Limite entre les Hautes-Terres et le Piedmont</li><li>• Près d'un frontière hydraulique (10 m d'un lac)</li><li>• Nappe confinée</li><li>• Puits (107 m prof) : 10 m de silt-argileux reposant sur le roc fracturé</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Piedmont</li><li>• Près d'une frontière hydraulique (20 m de la rivière Batiscan)</li><li>• Nappe confinée</li><li>• Puits (92 m prof) : 9 m de sable déposé sur 25 m d'argile reposant sur le roc fracturé</li></ul> |
| Paramètres in situ       | <ul style="list-style-type: none"><li>• Première stabilisation après 25 minutes</li><li>• Des variations significatives de la conductivité électrique spécifique se produisent après 40 minutes</li><li>• Une nouvelle stabilisation de tous les paramètres se produit à 70 minutes</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• La stabilisation des paramètres in situ se produit à 40 minutes</li></ul>  | <ul style="list-style-type: none"><li>• La stabilisation des paramètres in situ se produit à 35 minutes.</li></ul>  |

|                            |  |   |  |
|----------------------------|--|---|--|
| Majeurs, mineurs et traces | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca<sup>2+</sup>: Relativement stable dans les 40 premières min. Variations significatives entre 40 et 70 min.</li> <li>• Sr<sup>2+</sup>: Varie légèrement</li> <li>• Ca<sup>2+</sup>/ Sr<sup>2+</sup>: 123.24±14 ; Suggère mélange avec une eau plus jeune</li> <li>• Mn<sup>2+</sup>: Variations significatives et concentrations augmentent avec le temps</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca<sup>2+</sup>: Peu de variation</li> <li>• Sr<sup>2+</sup>: Peu de variation</li> <li>• Ca<sup>2+</sup>/ Sr<sup>2+</sup>: 36.07 ± 1.02</li> <li>• Mn<sup>2+</sup>: Tends à diminuer lentement pendant la purge</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca<sup>2+</sup>: Variations significatives des concentrations</li> <li>• Sr<sup>2+</sup>: Concentrations les plus élevées et variant tout au long de la purge</li> <li>• Ca<sup>2+</sup>/ Sr<sup>2+</sup>: 35.77 ± 0.4</li> <li>• Mn<sup>2+</sup>: Concentrations les plus élevées, variations significatives</li> </ul>        |
| Signature isotopique       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• δ<sup>2</sup>H vs. δ<sup>18</sup>O: Variations temporelles (purge) et interannuelles</li> <li>• δ<sup>2</sup>H vs. δ<sup>18</sup>O: Suggère un mélange entre de l'eau souterraine influencée par la dissolution de Ca<sup>2+</sup> et de l'eau influencée par les interactions eau-roche</li> <li>• δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub>: valeurs les plus élevées des trois stations. Signatures similaires entre 2020 et 2021</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• δ<sup>2</sup>H vs. δ<sup>18</sup>O: Pas de variation significative</li> <li>• δ<sup>2</sup>H vs. δ<sup>18</sup>O: Suggère de l'eau souterraine influencée par du <i>rafraichissement</i> et par les <i>interactions eau-roche</i></li> <li>• δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> : Suggère peu de dissolution des carbonates ou la présence de matière organique dans le système.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• δ<sup>2</sup>H vs. δ<sup>18</sup>O: Peu de variation</li> <li>• δ<sup>2</sup>H vs. δ<sup>18</sup>O: Suggère un processus dominant de <i>dissolution de Ca<sup>2+</sup></i></li> <li>• δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> : Suggère peu de dissolution des carbonates ou la présence de matière organique dans le système.</li> </ul> |

|      |   |  |   |
|------|---|--|---|
| ETRS | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Légers changements dans les patrons de fractionnement : les HREE (Yb) varient moins que les MREE et les LREE.</li> <li>• Peu de variations dans la concentration totale</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentrations sous les limites de détection</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Légers changements dans les patrons de fractionnement (début de la purge)</li> <li>• Variations significatives des concentrations totales</li> </ul> |
|------|---|--|---|

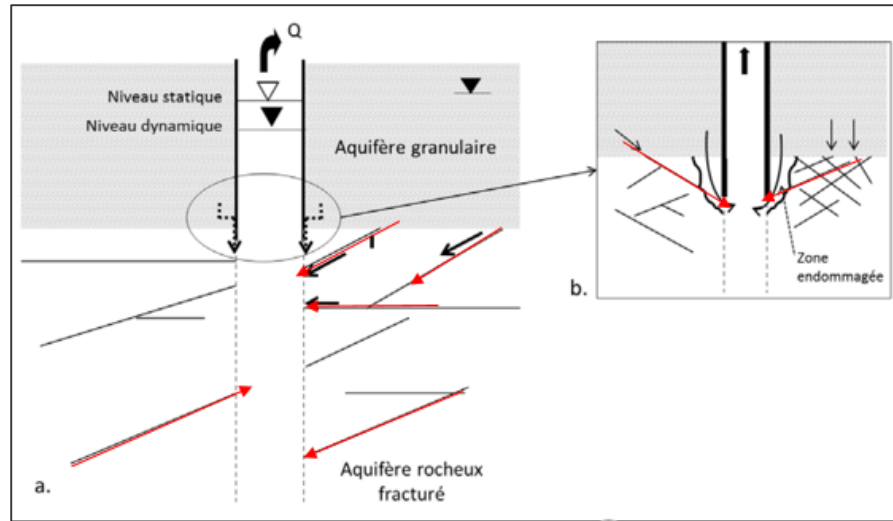
### 5.1.1 SAINT-ZENON

Le puits de la station de Saint-Zénon est installé dans le roc précambrien à 90 mètres de profondeur. On retrouve une quinzaine de mètres de dépôts de sable et gravier en surface qui repose directement sur le roc.

Les variations temporelles au cours de la purge du puits (paramètres mesurés in situ, concentrations en calcium, sodium, potassium et magnésium, signature isotopique,  $Ca^{2+}/Sr^{2+}$ , profils des terres rares, etc.) peuvent être expliquées par la possibilité d'un mélange entre différents horizons de l'aquifère ou avec l'eau de surface à proximité. Un aquifère à nappe libre tel que l'aquifère de Saint-Zénon semble être plus sensible au mélange que les aquifères confinés de cette étude.

Sous l'influence du pompage, les connexions hydrauliques naturelles entre les aquifères granulaires et de roches fracturées peuvent être accentuées (Richard et al. 2014). Lors du pompage, le cône de rabattement souterrain s'élargit autour du puits pompé. Ce phénomène permet à l'eau de l'aquifère granulaire de s'écouler à travers les fractures de la roche-mère et de se diriger vers le puits de pompage. Si le tubage en acier est mal ancré dans la roche, l'eau de l'aquifère granulaire peut également s'écouler à travers les ouvertures créées par l'ancrage défectueux et être aspirée dans le puits installé dans l'aquifère rocheux (Elliott 2014). La figure 5- 1, modifiée de Richard et al. (2024), présente une schématisation du puits

de la station de Saint-Zénon. Les flèches rouges représentent les possibles connexions hydrauliques (naturelles ou induites) à l'origine de certaines variations observées pendant la purge.



**Figure 5- 1: Contexte hydrogéologique de Saint-Zénon. L'aquifère pompé est dans le socle rocheux fracturé et est surmonté d'un aquifère granulaire à nappe libre. Les connexions hydrauliques potentielles naturelles et anthropiques sont présentées en rouge (modifiée de Richard, 2014)**

Un appel d'eau provenant de l'aquifère granulaire en surface, peut notamment expliquer les variations observées dans le rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  par l'ajout dans le système d'une eau plus jeune, ou moins évoluée, avec un ratio  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$  différent de celui de l'aquifère dans le roc fracturé échantillonné.

Cette hypothèse est renforcée par le comportement de la signature isotopique ( $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$ ) en 2020 et 2021, qui suggère un mélange entre de l'eau souterraine influencée par la dissolution de  $\text{Ca}^{2+}$  et de l'eau influencée par les interactions eau-roche.

Les variations du patron des terres rares tout au long de la purge, exprimées par de légers changements dans les patrons de fractionnement, appuient cette hypothèse en suggérant un mélange entre deux patrons distincts en ETRs à 40 minutes du début de la purge.

En résumé, la plupart des variations temporelles observées lors de la purge pour la station de Saint-Zénon sont directement liées au contexte hydrogéologique.

### 5.1.2 MANDEVILLE

Le puits de Mandeville est installé dans le roc fracturé (110 mètres de profondeur) et les 10 mètres de silt-argileux en surface agissent comme une couche confinante. La figure 5-2 présente une schématisation des différentes fractures (en rouge) pouvant contribuer à l'écoulement pendant la purge du puits.

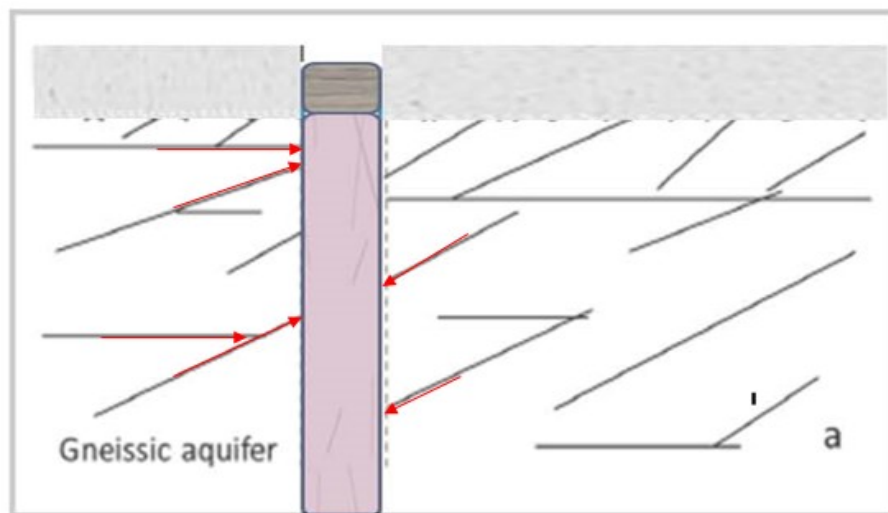


Figure 5- 2: Contexte hydrogéologique de la station de Mandeville. Le puits est installé dans le roc gneissique fracturé surmonté d'une couche de silt-argileux. Les lignes rouges représentent la contribution potentielle de différentes fractures. Modifiée de Richard (2014)

Pour cette station, très peu de variations ont été observées pour le  $\text{Ca}^{2+}$ , le  $\text{Sr}^{2+}$  et le ratio  $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$ . Cela peut s'expliquer par l'absence de connexion hydraulique entre les silts-argileux en surface et l'aquifère rocheux sollicité lors du pompage. Le changement de régime d'écoulement naturel occasionné par le pompage peut permettre à différentes fractures de contribuer à l'écoulement, favorisant ainsi un mélange presque imperceptible expliquant la variation du ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  au cours de la purge.



Le diagramme binaire du  $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  suggère que le processus dominant l'eau de Mandeville est l'interaction eau-roche. L'eau est également légèrement enrichie en isotopes du carbone ( $^{13}\text{C}$ -DIC) ce qui suggère une influence de la matière organique assez récente (C3) sur la chimie de l'eau souterraine et un taux de dissolution de la carbonates faible.

Il est assez bien documenté (Leybourne and Cameron 2010; Smedley 1991) que la solubilité des terres rares est fortement influencée par le pH. L'augmentation du pH de l'eau entraîne la diminution des concentrations d'ETR par adsorption des ETR et complexation avec des ligands organiques ( $\text{LnHM}$ ) et inorganiques ( $\text{LnCO}_3^+$ ,  $\text{Ln}(\text{CO}_3)_2^-$ ,  $\text{Ln}(\text{PO}_4)_0$ ,  $\text{Ln}(\text{SO}_4)^+$ ) (Johannesson 2005; Lee and Byrne 1993). On s'attend donc à ce que les concentrations d'ETR diminuent le long d'une trajectoire d'écoulement (Johannesson et al. 1999; Tang and Johannesson 2006) à mesure que le temps de séjour de l'eau augmente et que le pH s'accroît. La station de Mandeville a un pH relativement élevé (entre 8,42 et 8,79) pour les eaux souterraines et la présence de silt argileux en surface et la proximité du lac peut être une source de matière organique dans les eaux souterraines qui conduirait à la complexation des ETR. Une autre explication plausible est le mélange de l'eau souterraine avec de l'eau saumâtre ou de l'eau de mer qui occasionnerait une diminution des concentrations en ETR (Tang and Johannesson 2006) dans l'eau échantillonnée. Cette hypothèse est renforcée par l'histoire géologique de la région de Lanaudière, qui à la suite de la dernière glaciation a été envahie par la mer de Champlain. Plusieurs auteurs (Walter 2010, 2018; Walter et al. 2018) mentionnent que le lessivage des argiles (avec un fort contenu en sel dans l'eau interstitielle) pourrait permettre d'augmenter les concentrations en sel des eaux présentes dans les aquifères sous-jacents. D'autres phénomènes pourraient également être à l'origine de la salinisation des eaux continentales, par exemple, un mélange entre les eaux superficielles présentes dans le roc et des eaux plus profondes comme les saumures du Bouclier canadien. Le total des solides dissous (TDS) et le ratio Na/Ca élevé de cette station renforce l'hypothèse d'une eau évoluée.

### 5.1.3 SAINT-ADELPHE

Le puits de la station de Saint-Adelphe est installé dans le roc fracturé à une profondeur de 92 mètres. La stratigraphie indique un puits en condition confinée sous 25 mètres d'argile granulométriques surplombé d'un aquifère granulaire de 9 mètres. La figure 5-3 présente un schéma du puits ainsi que les possibles connexions hydrauliques (flèches rouges).

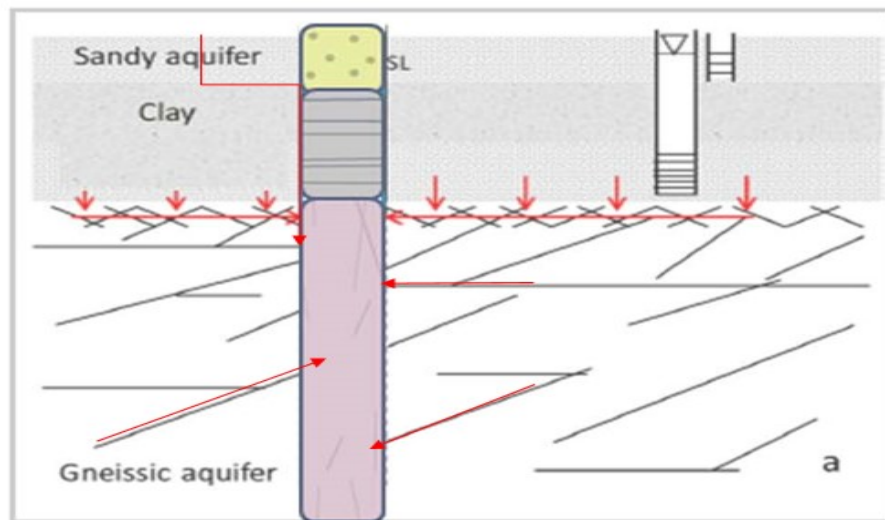


Figure 5- 3: Contexte hydrogéologique de la station de Saint-Adelphe. La séquence stratigraphique est composée de sable, d'argile et de roc fracturé. Le puits est installé dans le roc. Les flèches rouges représentent les connexions hydrauliques potentielles (modifiée de Richard, 2014)

La plupart de la chimie analytique observée à Saint-Adelphe tire son origine dans le contexte hydrogéologique (profils des ETR, concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ ). Par exemple, la corrélation négative des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  avec les concentrations en manganèse suggèrent l'influence du carbone organique (lié au contexte) sur la mobilité de ces métaux. Les variations en harmonie des différents éléments chimiques, quant à elles, peuvent tirer leurs origines dans l'activation et l'arrêt de la pompe dans le puits, ce qui modifie les conditions naturelles d'écoulement et favorise un apport en eau porale de l'argile ou un apport en eau de la nappe de surface (aquifère libre).

La présence de concentrations élevées de  $\text{Sr}^{2+}$  dans les eaux souterraines de Saint-Adelphe est potentiellement liée à la présence de minéraux riches en strontium dans l'aquifère rocheux confiné. Les minéraux contenant du Sr dans les aquifères sont la principale source d'enrichissement en  $\text{Sr}^{2+}$  des eaux souterraines par la dissolution des minéraux carbonatés et sulfatés tels que la célestite, le gypse, la calcite, la strontianite et d'autres (Yang et al. 2022). L'eau interstitielle contenue dans l'argile peut également être enrichie en  $\text{Sr}^{2+}$  car elle a un temps de résidence permettant une interaction prolongée entre l'eau et les minéraux enrichis en  $\text{Sr}^{2+}$  contenus dans l'argile. L'hypothèse d'un apport d'eau des argiles peut s'expliquer par l'effet du pompage, mais cela reste à démontrer.

Le diagramme binaire du  $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  suggère que le processus dominant la chimie des 15 échantillons est la dissolution de minéraux enrichis en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Les valeurs faibles en carbone ( $^{13}\text{C-DIC}$ ), peuvent s'expliquer par la présence de matière organique de type C3 dans la zone de recharge et potentiellement dans le système. L'argile marine présente en surface de l'aquifère est de nature pro-deltaïque. Cet environnement est réputé contenir d'importante quantité de matière organique (CERM-PACES 2022) puisqu'il consiste en des boues de fonds océaniques. Le relâchement de matière organique dans l'aquifère peut se faire de façon passive via les fractures à la surface du socle rocheux ou de façon dynamique, ou induite, par le pompage à haut débit du puits.

Les variations significatives des concentrations totales en terres rares dans les premières minutes du pompage suggèrent que l'initiation du pompage permet la mobilisation des terres rares. Les deux hypothèses proposées sont 1) que l'eau restée dans la tubulure s'est rééquilibrée avec l'atmosphère, l'oxygène favorisant la mise en solution des terres rares, ce qui est concordant avec les concentrations élevées mesurées dans cette eau dans les cinq premières minutes et 2) que l'initiation du pompage introduit une quantité d'oxygène dans le puits ce qui favorise la solubilisation de complexes ioniques présents dans l'eau du puits.

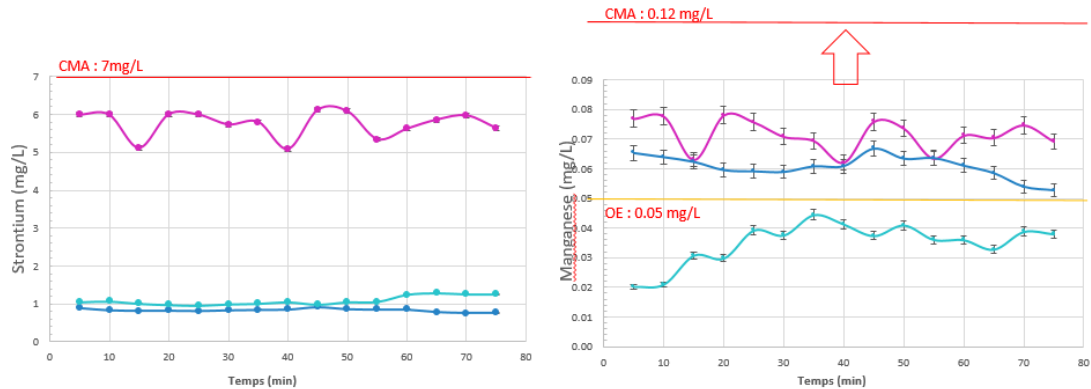
Les légères variations observées sur le patron des terres rares pendant la purge (30 et 65 minutes) suggèrent quant à elles que le pompage induit un court-circuit hydraulique entre la nappe de surface granulaire et l'aquifère rocheux fracturé ou l'aquitard d'argile marine (ligands organiques) se trouvant directement sur le roc. Ce mélange entre des eaux possédant des patrons différents et des conditions physico-chimiques différentes peuvent permettre la mobilisation/complexation des Terres rares.

## 5.2 RECOMMANDATIONS

Un des objectifs principaux des PACES est de dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines sur le territoire. Cela implique la caractérisation de la géochimie de l'eau souterraine à l'aide des données obtenues en conformité au protocole d'échantillonnage uniformisé du CEAE (2012) utilisé dans le cadre des PACES. Une revue des travaux réalisés entre 2009 et 2015 sur ces projets d'acquisition de connaissances a été réalisée par Larocque et ses collègues (Larocque et al. 2018). Cet article met en lumière les différents types d'études qui ont été réalisées sur le territoire québécois à partir des données obtenues avec le protocole standardisé lors des PACES. Ces résultats ont notamment servi à caractériser les contextes hydrogéologiques de différentes régions (Montcoudiol et al. 2015; Tremblay et al. 2021; Walter 2018) et à mieux définir les sources et la distribution des contaminants d'origine naturelle (Bondu et al. 2018; Bondu et al. 2020). Considérant les résultats obtenus dans cette étude, il devient pertinent de jeter un regard nouveau sur ces résultats obtenus à la suite de l'utilisation de ce protocole d'échantillonnage, plus précisément sur les résultats obtenus pour plus de 3500 puits privés depuis 2008 dans le cadre des PACES.

Un autre objectif des PACES est de répondre aux préoccupations du milieu en ce qui concerne la ressource en eau souterraine. La potabilité de l'eau est l'une des plus grandes préoccupations des propriétaires de puits (CERM-PACES 2022). C'est pourquoi tous les résultats d'analyses des puits privés sont par la suite transmis aux utilisateurs qui peuvent s'en servir pour déterminer la potabilité de leur eau en conformité aux normes québécoises et canadiennes. Cependant, les utilisateurs consomment l'eau lorsqu'ils en ont besoin et non suite à un suivi des paramètres in situ. Les variations observées de la chimie analytique de l'eau souterraine pendant la purge peuvent être significatives et pour certains éléments traces, ces variations pourraient faire la différence entre une eau potable à un temps donné et une eau non potable quelques minutes plus tard. Aucun des échantillons prélevés dans le cadre de ce projet ne dépasse les CMA et les OE. Cependant, l'analyse de la figure 5-4 met en évidence le fait que lorsque les concentrations en éléments traces sont élevées, comme pour

le strontium à la station de Saint-Adelphe qui varie entre 5.08 et 6.12 mg/L, les variations peuvent être suffisantes pour faire la différence entre une eau potable et non potable.



**Figure 5- 4: Évolution des concentrations en strontium (gauche) et en manganèse (droite) en fonction du temps (min). Les lignes rouges présentent les concentrations maximales acceptables (CMA) et les objectifs esthétiques (OE).**

La description et la quantification de l'évolution de la chimie analytique des eaux souterraines lors de la purge ont permis une meilleure compréhension du comportement de la chimie des eaux souterraines au fur et à mesure de son utilisation et mettent en évidence la pertinence de se questionner sur les méthodes utilisées couramment pour déterminer la potabilité de l'eau souterraine des puits domestiques.

L'étude met de l'avant l'hypothèse de l'influence des contextes hydrogéologiques sur la chimie analytique de l'eau lors de la purge. Il serait donc recommandé de reproduire le protocole et la méthodologie dans différents contextes hydrogéologiques afin de valider les conclusions tirées lors de ce projet. Une meilleure compréhension de la stratigraphie et une étude des réseaux de fracture présents dans les puits favoriseraient grandement l'interprétation et la compréhension des phénomènes ayant cours dans un puits. Par exemple, une connaissance de la chimie des différentes eaux pouvant contribuer à l'écoulement (aquifère libre, réseaux de fractures...), permettrait de quantifier les mélanges et de confirmer ou d'infirmer les hypothèses de connexions hydrauliques présentées dans cette étude. Il serait également pertinent de répéter ce protocole lors d'un essai de pompage longue durée en

comparant l'évolution de la chimie analytique avec les données hydrauliques (puits de pompage et puits d'observation).

L'effet de la présence d'une cuve de garde sur l'évolution des paramètres mesurés in situ et de la chimie analytique devrait également être étudié afin de mieux comprendre les processus en cours dans ce type d'installation. Une façon de mieux comprendre l'effet de cette cuve de garde serait de reproduire en laboratoire l'utilisation d'une cuve de garde avec un pompage à haut débit en mesurant les paramètres in situ et la chimie analytique de l'eau avant la cuve, à l'intérieur de la cuve et à sa sortie. Ce type d'expérience permettrait de mesurer l'importance de l'influence de la cuve de garde sur l'évolution des paramètres chimiques.

## CHAPITRE 6

### CONCLUSION

Le présent projet de recherche visait une meilleure compréhension de la relation entre le pompage (la purge), les variations temporelles des paramètres in situ et l'évolution du contenu en éléments traces. Pour ce faire, trois objectifs avaient été fixés :

1. Décrire et quantifier l'évolution de la chimie analytique (analyse des isotopes, des éléments majeurs, mineurs et traces) des eaux souterraines au fur et à mesure de la purge ;
2. Identifier et tester différents éléments chimiques (traceurs de l'eau souterraine) permettant de décrire et d'interpréter les variations des paramètres
3. Proposer des hypothèses quant à l'origine probable des variations des propriétés géochimiques et leurs impacts potentiels sur la santé

Les résultats de cette étude ont permis de répondre aux trois objectifs fixés. L'évolution de nombreux paramètres géochimiques au cours de la purge a été décrite et de quantifiée permettant ainsi la mise en évidence de variations spatiales et temporelles, et ce malgré l'atteinte de la stabilité des paramètres mesurés in situ. Le projet a utilisé une approche exploratoire qui a permis de mettre en évidence l'efficacité des éléments terres rares (ETRs) et des isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$ ) comme traceurs hydrogéologiques lors d'un pompage à haut débit sur une courte durée.

D'après les observations réalisées à partir des résultats obtenus, il semble que les variations de certains paramètres chimiques ( $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^+$ , ETRs, etc.) demeurent significatives si on les compare aux concentrations des échantillons prélevés lors de la stabilisation des paramètres in situ. Les résultats indiquent donc que la purge influence différemment l'évolution temporelle de paramètres chimiques spécifiques et qu'une stabilisation des paramètres in situ ne signifie pas nécessairement la stabilité de la chimie des eaux souterraines. Les variations spatiales et temporelles observées dans ce projet ont des



sources et des origines diverses qui peuvent être séparées en deux groupes principaux : (1) Influence du contexte hydrogéologie et de la géologie locale et (2) influence de la purge à haut débit.

Pour la station de Saint-Zénon, qui est en contexte non confiné, la principale cause des variations observées est reliée au contexte hydrogéologique et aux connexions hydrauliques présentes naturellement entre les deux aquifères et qui sont exacerbées par l'application du pompage. Cette hypothèse est renforcée par le comportement des paramètres in situ pendant la purge, les variations observées dans le patron d'ETRs et par la signature isotopique.

Pour la station de Mandeville, plusieurs éléments suggèrent que le pompage n'a que très peu d'influence sur la chimie de l'eau souterraine et cela peut s'expliquer par le contexte hydrogéologique dans lequel le puits est installé. La présence d'une unité imperméable en surface diminue les risques de connectivité hydraulique. Cependant, les ETRs, le ratio  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  ainsi que le TDS de l'eau souterraine suggèrent l'influence à long terme des interactions eau-roches, ce qui est relié au contexte hydrogéologique.

Pour la station de Saint-Adelphe, la présence d'une unité d'argile est la source suspectée pour la présence de matière organique et par extension, pour les concentrations en manganèse. Le pompage influence les concentrations et la distribution du patron de terres rares, principalement dans les 10 premières minutes de la purge, paramètres qui sont relativement stables par la suite (entre 15 et 75 minutes). Cependant, les concentrations en éléments majeurs, mineurs et traces semblent subir d'autres processus reliés au changement de régime hydraulique lors de l'application du pompage (effet de la cuve de garde ?) qui s'expriment par des variations en harmonie de la plupart des éléments chimiques analysés.

En conclusion, ce projet de recherche a permis d'élaborer de nombreuses hypothèses quant à l'origine des variations spatiales et temporelles observées lors de la purge d'un puits

domestique. Ces différentes hypothèses méritent d'être approfondies afin d'être confirmées/infirmées, comme mentionné dans les recommandations.

## LISTE DE RÉFÉRENCES













- Appelo, C.A.J., et Postma, D. 2004. *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- Ayotte, J.D., Szabo, Z., Focazio, M.J., et Eberts, S.M. 2011. Effects of human-induced alteration of groundwater flow on concentrations of naturally-occurring trace elements at water-supply wells. *Applied Geochemistry* **26**(5): 747-762. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.01.033.
- Béland, J., et Bergeron, R. 1959. Esquisse géologique du Québec méridional. *Cahiers de géographie du Québec* **3**(6): 131-138. doi: <https://doi.org/10.7202/020172ar>.
- Bondu, R., Cloutier, V., et Rosa, E. 2018. Occurrence of geogenic contaminants in private wells from a crystalline bedrock aquifer in western Quebec, Canada: Geochemical sources and health risks. *Journal of Hydrology* **559**: 627-637. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.042>.
- Bondu, R.I., Cloutier, V., Rosa, E., et Roy, M. 2020. An exploratory data analysis approach for assessing the sources and distribution of naturally occurring contaminants (F, Ba, Mn, As) in groundwater from southern Quebec (Canada). *Applied Geochemistry* **114**. doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.104500.
- CEAE, C.d.e.e.a.e. 2012. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Ministère de l'environnement et de la faune, Direction des laboratoires, [Québec]. Disponible à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/1560334> [cité.
- CERM-PACES. 2022. Résultats du projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire municipalisé de Lanaudière, de l'est de la Mauricie et de la Moyenne-Côte-Nord, PACES-LAMEMCN – section Lanaudière.: 210.
- CERM-UQAC. 2020. PACES LAMEMCN- Rapport d'étape de la phase 2. Travaux de terrain et résultats préliminaires. 59p.
- Clark, B.R., Landon, M.K., Kauffman, L.J., et Hornberger, G. 2007. Simulations of Groundwater Flow, Transport, Age, and Particle Tracking near York, Nebraska, for a Study of Transport of Anthropogenic and Natural Contaminants (TANC) to Public-Supply Wells.
- Clark, I.D., et Fritz, P. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. FL, Boca Raton.
- Domenico, P.A., et Schwartz, F.W. 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley, New York
- Toronto.
- Elliott, A.-P. 2014. Mise en évidence de connections hydrauliques locales et régionales entre aquifères rocheux et granulaires : exemple de la région du Saguenay-Lac-St-Jean.
- Guo, H., Zhang, B., Wang, G., et Shen, Z. 2010. Geochemical controls on arsenic and rare earth elements approximately along a groundwater flow path in the shallow aquifer of the Hetao Basin, Inner Mongolia. *Chemical Geology* **270**(1-4): 117-125. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.11.010.
- Imbrigiotta, T.E., et Harte, P.T. 2020. Passive sampling of groundwater wells for determination of water chemistry. Report. 1-D8.

- Jia, Y., Xi, B., Jiang, Y., Guo, H., Yang, Y., Lian, X., et Han, S. 2018. Distribution, formation and human-induced evolution of geogenic contaminated groundwater in China: A review. *Science of the Total Environment* **643**: 967-993. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.201.
- Johannesson, K.H. 2005. Rare earth elements in groundwater flow systems. Springer, Dordrecht ; Disponible à <https://link.springer.com/10.1007/1-4020-3234-X> [cité.
- Johannesson, K.H., Farnham, I.M., Guo, C., Stetzenbach, K.J., et Old Dominion Univ, N.V.A. 1999. Rare earth element fractionation and concentration variations along a groundwater flow path within a shallow, basin-fill aquifer, southern Nevada, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **63**(18). doi: 10.1016/S0016-7037(99)00184-2.
- Larocque, M., Cloutier, V., Rosa, E., et Levison, J. 2018. Results from the Quebec Groundwater Knowledge Acquisition Program. *Canadian Water Resources Journal* **43**(2): 69-74. doi: 10.1080/07011784.2018.1472040.
- Lee, J.H., et Byrne, R.H. 1993. Complexation of trivalent rare earth elements (Ce, Eu, Gd, Tb, Yb) by carbonate ions. *Geochimica et Cosmochimica Acta; (United States)* **57**(2): 295-302. doi: 10.1016/0016-7037(93)90432-V.
- Leybourne, M.I., et Cameron, E.M. 2010. Groundwater in geochemical exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* **10**(2): 99-118. doi: 10.1144/1467-7873/09-222.
- Leybourne, M.I., Goodfellow, W.D., Boyle, D.R., et Hall, G.M. 2000. Rapid development of negative Ce anomalies in surface waters and contrasting REE patterns in groundwaters associated with Zn-Pb massive sulphide deposits. *Applied Geochemistry* **15**(6): 695-723. doi: 10.1016/S0883-2927(99)00096-7.
- Malcuit, E., Négrel, P., Petelet-Giraud, E., Atteia, O., Franceschi, M., et Schmidt, S. 2010. La "Zone minéralisée de l'Entre-deux-Mers" : Caractérisation hydrogéologique, géochimique et isotopique - CARISMEAU 2.
- MDELCC. 2022. Eaux souterraines. Disponible à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/index.htm> [cité le 06-09 2022].
- MERN. 2018. Province du Grenville [Page web]. Disponible à <https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-de-grenville/#References> [cité 2022].
- Montcoudiol, N., Molson, J., et Lemieux, J.M. 2015. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal : Official Journal of the International Association of Hydrogeologists* **23**(2): 377-396. doi: 10.1007/s10040-014-1190-5.
- Omonona, O.V., et Okogbue, C.O. 2017. Geochemistry of rare earth elements in groundwater from different aquifers in the Gboko area, central Benue Trough, Nigeria. *Environmental Earth Sciences* **76**(1): 1-19. doi: 10.1007/s12665-016-6329-3.
- Richard, S., Chesnaux, R., Rouleau, A., Morin, R., Walter, J., et Rafini, S. 2014. Field evidence of hydraulic connections between bedrock aquifers and overlying granular aquifers: examples from the Grenville Province of the Canadian Shield. *Hydrogeology Journal* **22**(8): 1889-1904. doi: 10.1007/s10040-014-1183-4.
- Smedley, P.L. 1991. The geochemistry of rare earth elements in groundwater from the Carnmenellis area, southwest England. *Geochimica et Cosmochimica Acta; (United States)* **55**(10): 2767-2779. doi: 10.1016/0016-7037(91)90443-9.











- Stenvik, L.A., Hilmo, B.O., et Frengstad, B.S. 2022. Elevated manganese concentrations in groundwater wells after longtime abstraction with bank filtration: developing and testing of a sorption model for Ringerike waterworks, Norway. *Hydrogeology Journal* **30**(7): 2059-2071. doi: 10.1007/s10040-022-02538-w.
- Tang, J., et Johannesson, K. 2006. Rare Earth Element Concentrations, Speciation, and Fractionation along Groundwater Flow Paths: The Carrizo Sand (Texas) and Upper Floridan Aquifers. pp. 223-251.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., Armstrong, R.L., Tarney, J., Moorbath, S.E., et Windley, B.F. 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **301**(1461): 381-399. doi: 10.1098/rsta.1981.0119.
- Tremblay, R., Walter, J., Chesnaux, R., et Boumaiza, L. 2021. Investigating the Potential Role of Geological Context on Groundwater Quality: A Case Study of the Grenville and St. Lawrence Platform Geological Provinces in Quebec, Canada. *Geosciences* (2076-3263) **11**(12).
- Tweed, S.O., Weaver, T.R., et Cartwright, I. 2005. Distinguishing groundwater flow paths in different fractured-rock aquifers using groundwater chemistry: Dandenong Ranges, southeast Australia. *Hydrogeology Journal* **13**(5-6): 771-786. doi: 10.1007/s10040-004-0348-y.
- Tweed, S.O., Weaver, T.R., Cartwright, I., et Schaefer, B. 2006. Behavior of rare earth elements in groundwater during flow and mixing in fractured rock aquifers: An example from the Dandenong Ranges, southeast Australia. *Chemical Geology* **234**(3): 291-307. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.05.006.
- Walter, J. 2010. Les eaux souterraines à salinité élevée autour du Lac-Saint-Jean : Origines et incidences. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi: 186.
- Walter, J. 2018. Modèle d'évolution naturelle de l'eau souterraine dans une région du Bouclier Canadien à partir de la détermination de pôles hydrogéochimiques régionaux.
- Walter, J., Chesnaux, R., Boumaiza, L., Brindha, K., et Regenspurg, S. 2023. Conceptual model for the chemical evolution of groundwater in a region of the Canadian Precambrian shield covered by soft Quaternary deposit of glacial and marine origin. *Applied Geochemistry* **150**. doi: 10.1016/j.apgeochem.2023.105574.
- Walter, J., Rouleau, A., Chesnaux, R., Lambert, M.I., et Daigneault, R.a. 2018. Characterization of general and singular features of major aquifer systems in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* **43**(2): 75-91. doi: 10.1080/07011784.2018.1433069.
- Yang, N., Su, C., Liu, W., et Zhao, L. 2022. Occurrences and mechanisms of strontium-rich groundwater in Xinglong County, northern China: insight from hydrogeological and hydrogeochemical evidence. *Hydrogeology Journal*. doi: 10.1007/s10040-022-02533-1.
- Zhang, Z., Guo, H., Zhao, W., Liu, S., Cao, Y., et Jia, Y. 2018. Influences of groundwater extraction on flow dynamics and arsenic levels in the western Hetao Basin, Inner Mongolia, China. *Hydrogeology Journal* **26**(5): 1499-1512. doi: 10.1007/s10040-018-1763-9.

## ANNEXE 1












### ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES DU CGQ











| ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES                  |                                 |             |     |     |  |   |
|--|---------------------------------|-------------|-----|-----|--|---|
| Nom et code du dépôt<br>(CODE_DEPOT_MORP_SEDM) | Code du symbole<br>(CODE_SYMBL) | Couleur RVB |     |     | Symbole  | Description   |
|  |                                 | R           | V   | B   |  |   |
| <b>Dépôt anthropogénique</b>                   |                                 |             |     |     |  |   |
| Dépôt anthropogénique (H)                      | H                               | 190         | 140 | 140 |    | Dépôt remanié ou mis en place à la suite d'activités anthropiques (mines, villes, industries, etc.)   |
| <b>Dépôts de versant</b>                       |                                 |             |     |     |  |   |
| Grèze lité (Cl)                                | Cl                              | 230         | 230 | 128 |    | Cailloutis sablo-graveleux substratifié à stratifié formant des cônes et des tabliers au pied des escarpements rocheux  |
| Dépôt d'éboulis (Ce)                           | Ce                              | 230         | 204 | 0   |    | Cailloux et blocs anguleux gélifractés formant des cônes ou des tabliers au pied des escarpements rocheux   |
| Dépôt d'avalanche (Ca)                         | Ca                              | 230         | 178 | 0   |    | Cailloux et blocs anguleux gélifractés déposés au droit de couloirs d'avalanche, le long des escarpements rocheux   |
| Dépôt de glacier rocheux (Cr)                  | Cr                              | 230         | 204 | 128 |    | Cailloux et blocs anguleux à subanguleux mis en place sur des pentes raides et se déformant plastiquement à cause de la présence de glace interstitielle  |
| Dépôt de glissement de terrain (Cg)            | Cg                              | 230         | 230 | 38  |    | Silt et argile remaniés par des glissements de terrain et occupant généralement des amphithéâtres caractérisés par des modelés chaotiques ou en gradins au pied de cicatrices de glissement. Selon la nature du matériel recouvrant les argiles et les silts, ces sédiments peuvent comprendre des passées sableuses ou graveleuse entraînées par les glissements   |
| Dépôt de versant non différencié (C)           | C                               | 230         | 230 | 178 |    | Dépôt colluvionnaire dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |
| <b>Sédiments organiques</b>                    |                                 |             |     |     |  |   |
| Sédiment de tourbière (Ot)                     | Ot                              | 128         | 128 | 128 |    | Tourbe plus ou moins décomposée mise en place dans des fens ou des bogs   |
| Sédiment de marécage et de marais (Om)         | Om                              | 178         | 178 | 178 |  | Sédiment organique généralement riche en particules minérales et mis en place dans des milieux palustres caractérisés par des plans d'eau ouverts (étangs)  |
| Sédiment organique non différencié (O)         | O                               | 204         | 204 | 204 |  | Sédiment de tourbière, de marécage et de marais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée  |
| <b>Sédiments éoliens</b>                       |                                 |             |     |     |  |   |
| Sédiment éolien (Ed)                           | Ed                              | 230         | 204 | 178 |  | Sable fin à stratifications obliques diffuses mis en place par le vent sous la forme de dunes paraboliques formées à la surface des sédiments littoraux et alluviaux fraîchement exondés. Peut contenir des niveaux organiques tels des paléosols. L'éolisation des dunes stabilisées et des autres surfaces sableuses peut reprendre si la couverture végétale est enlevée, soit en raison de feux de forêts ou d'activités anthropiques |
| Loess (El)                                     | El                              | 230         | 178 | 102 |  | Silt ou silt sableux massifs mis en place par le vent. Forme généralement des placages minces de moins d'un mètre   |









| ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES                    |                                 |             |     |     |         |   |
|--|---------------------------------|-------------|-----|-----|---------|---|
| Nom et code du dépôt<br>(CODE_DEPOT_MORP_SEDM)   | Code du symbole<br>(CODE_SYMBL) | Couleur RVB |     |     | Symbole | Description   |
|  |                                 | R           | V   | B   |         |   |
| <b>Sédiments alluviaux</b>                       |                                 |             |     |     |         |   |
| Alluvion actuelle (Ap)                           | Ap                              | 255         | 255 | 178 |         | Sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant couramment de la matière organique. Forme des levées, des barres et les plaines alluviales actuelles  |
| Cône alluvial (Ac)                               | Ac                              | 230         | 255 | 0   |         | Galet, gravier et sable stratifiés formant des cônes légèrement inclinés au débouché de cours d'eau en terrain plus plats. Surface généralement chenalisée  |
| Sédiment estuarien ancien (Ae)                   | Ae                              | 255         | 255 | 102 |         | Silt, silt sableux et sable contenant généralement des fragments organiques, communément des plantes aquatiques. Caractérisé par une structure massive, sublaminaire ou rythmique. Sédiments déposés lors d'épisodes transgressifs qui reposent en discordance sur les dépôts sous-jacents  |
| Alluvion de terrasse fluviale (At)               | At                              | 255         | 230 | 0   |         | Sable, silt sableux, sable graveleux et gravier pouvant contenir de la matière organique. Surface remaniée par endroits par l'action éolienne et généralement marquée par des levées et des barres alluviales. L'abaissement du niveau de base se manifeste par l'étagement des terrasses   |
| Alluvion de terrasse fluviale ancienne (Ax)      | Ax                              | 255         | 230 | 128 |         | Sable, silt sableux et gravier contenant un peu de matière organique et déposés dans des zones excédant les limites des couloirs fluviaux actuels. Les faciès estuariens sont communs dans cette unité. Surface généralement marquée par des levées et des barres alluviales et remaniée par endroits par l'action éolienne. L'abaissement du niveau de base se manifeste par l'étagement des terrasses   |
| Alluvion non différenciée (A)                    | A                               | 255         | 255 | 0   |         | Sédiment alluvionnaire mis en place le long de cours d'eau, mais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |
| <b>Sédiments lacustres</b>                       |                                 |             |     |     |         |   |
| Sédiment lacustre deltaïque et prodeltaïque (Ld) | Ld                              | 230         | 76  | 255 |         | Sable, sable graveleux et gravier stratifiés et bien triés, mis en place à l'embouchure des cours d'eau se déversant dans des lacs actuels. Montre une surface plane généralement marquée par des chenaux abandonnés et parfois remaniée par l'action éolienne  |
| Sédiment lacustre littoral et pré-littoral (Lb)  | Lb                              | 255         | 178 | 255 |         | Sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés. Sédiment mis en place en eaux peu profondes lors de la phase plénilacustre et lors de l'exondation. Montre une surface généralement marquée par des cordons littoraux ou pré-littoraux et remaniée par endroits par l'action éolienne. Lorsqu'associé à des faciès d'exondation, forme généralement une couverture mince reposant sur des sédiments d'eau profonde |
| Sédiment lacustre fin d'eau profonde (La)        | La                              | 255         | 128 | 255 |         | Silt et argile généralement laminés formant par endroits des rythmites. Sédiment mis en place dans les dépressions plus profondes des bassins lacustres actuels   |
| Sédiment lacustre non différencié (L)            | L                               | 230         | 128 | 204 |         | Sédiment mis en place dans un plan d'eau lacustre actuel, mais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |
| <b>Sédiments marins</b>                          |                                 |             |     |     |         |   |

| ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES                        |                                 |             |     |     |   |  |
|--|---------------------------------|-------------|-----|-----|---|--|
| Nom et code du dépôt<br>(CODE_DEPOT_MORP_SEDM)       | Code du symbole<br>(CODE_SYMBL) | Couleur RVB |     |     | Symbole   | Description  |
|  |                                 | R           | V   | B   |   |  |
| <b>Sédiments marins</b>                              |                                 |             |     |     |   |  |
| Sédiment marin intertidal (Mi)                       | Mi                              | 204         | 230 | 255 |    | Silt et silt sableux généralement massifs ou légèrement stratifiés. Sédiment mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou des bras de mer actuels abrités, généralement à proximité de grands complexes deltaïques  |
| Sédiment marin deltaïque et prodeltaïque (Md)        | Md                              | 102         | 178 | 255 |    | Sable, sable graveleux et gravier stratifiés et bien triés. Sédiment mis en place à l'embouchure de cours d'eau se déversant dans les mers actuelles. Comprend localement des sédiments silto-sableux prodeltaïques  |
| Sédiment marin littoral et pré littoral (Mb)         | Mb                              | 204         | 255 | 255 |    | Sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés. Sédiment mis en place en eaux peu profondes lors de la phase plénaire et lors de l'exondation. Montre une surface généralement marquée par des cordons littoraux ou pré littoraux et remaniée par endroits par l'action éolienne. Lorsqu'associé à des faciès d'exondation, forme généralement une couverture mince reposant sur des sédiments d'eau profonde |
| Sédiment marin fin d'eau profonde (Ma)               | Ma                              | 102         | 255 | 255 |    | Silt argileux et argile silteuse gris moyen à gris foncé, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites. Sédiment mis en place principalement par décantation dans les dépressions plus profondes des bassins marins actuels   |
| Sédiment marin non différencié (M)                   | M                               | 153         | 230 | 255 |    | Sédiment mis en place dans une mer ou un océan actuel, mais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |
| <b>Sédiments glaciomarins</b>                        |                                 |             |     |     |   |  |
| Sédiment glaciomarin intertidal (MGi)                | MGi                             | 204         | 204 | 255 |    | Silt et silt sableux généralement massifs ou légèrement stratifiés. Sédiment mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies abritées ou des bras de mer postglaciaire, généralement à proximité de grands complexes deltaïques   |
| Sédiment glaciomarin deltaïque et prodeltaïque (MGd) | MGd                             | 153         | 153 | 255 |  | Sable, sable graveleux et gravier stratifiés et bien triés. Sédiment mis en place à l'embouchure de cours d'eau se déversant dans les mers postglaciaires. Comprend localement des sédiments silto-sableux prodeltaïques   |
| Sédiment glaciomarin littoral et pré littoral (MGb)  | MGb                             | 178         | 230 | 255 |  | Sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés. Sédiment mis en place en eaux peu profondes dont la surface est généralement marquée par des cordons littoraux ou pré littoraux et remaniée par endroits par l'action éolienne  |
| Sédiment glaciomarin fin d'eau profonde (MGa)        | MGa                             | 102         | 230 | 255 |  | Silt argileux et argile silteuse gris moyen à gris foncé, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites. Sédiment mis en place principalement par décantation dans les dépressions plus profondes des bassins glaciomarins   |
| Sédiment glaciomarin non différencié (MG)            | MG                              | 153         | 204 | 230 |  | Sédiment mis en place dans une mer postglaciaire (mers de Champlain, Tyrell, Goldwaith, Iberville et Laflamme), mais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée  |



| ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES                           |                                 |             |     |     |   |   |
|---|---------------------------------|-------------|-----|-----|---|---|
| Nom et code du dépôt<br>(CODE_DEPOT_MORP_SEDM)          | Code du symbole<br>(CODE_SYMBL) | Couleur RVB |     |     | Symbole   | Description   |
|   |                                 | R           | V   | B   |   |   |
| <b>Sédiments glaciolacustres</b>                        |                                 |             |     |     |   |   |
| Sédiment glaciolacustre deltaïque et prodeltaïque (LGd) | LGd                             | 153         | 76  | 230 |    | Sable, sable grossier et sable graveleux mis en place à l'embouchure des cours d'eau qui se déversaient dans les lacs glaciaires. Montre une surface plane généralement marquée par des chenaux abandonnés et remaniés par endroits par l'action éolienne   |
| Sédiment glaciolacustre littoral et pré littoral (LGb)  | LGb                             | 204         | 178 | 255 |    | Sable, sable silteux, gravier sableux et blocs mis en place le long des rives et à l'intérieur du lac glaciaire. Montre une surface généralement marquée par des cordons littoraux et pré littoraux et remaniée par endroits par l'action éolienne  |
| Sédiment glaciolacustre fin d'eau profonde (LGa)        | LGa                             | 204         | 153 | 255 |    | Silt et argile généralement laminés formant par endroits des rythmites ou des varves. Sédiment mis en place dans les dépressions plus profondes des bassins glaciolacustres   |
| Sédiment glaciolacustre non différencié (LG)            | LG                              | 178         | 153 | 204 |    | Sédiment mis en place dans un plan d'eau glaciolacustre, mais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée  |
| <b>Sédiments fluvioglaciaires</b>                       |                                 |             |     |     |   |   |
| Sédiment d'épandage proglaciaire subaérien (Go)         | Go                              | 255         | 204 | 38  |    | Sable, gravier et blocs montrant une décroissance granulométrique générale vers l'aval. Forme des replats et des plaines d'épandage dont la surface est généralement marquée par d'anciens chenaux sinueux et peu profonds  |
| Sédiment d'épandage proglaciaire subaquatique (Gs)      | Gs                              | 255         | 204 | 128 |    | Sable, sable silteux et gravier formant des accumulations mises en place en eau relativement peu profonde, au bout de tunnels sous-glaciaires ou intraglaciers débouchant dans un bassin glaciolacustre ou marin. Sédiment exposé localement sous les séquences marines ou glaciolacustres dans les sablières, les gravières ou les coupes naturelles |
| Sédiment d'épandage proglaciaire non différencié (Ge)   | Ge                              | 255         | 190 | 80  |   | Sable et gravier généralement stratifiés. Sédiment transporté par les eaux de fonte et mis en place au front du glacier dans un environnement non différencié   |
| Sédiment juxtaglacière (Gx)                             | Gx                              | 255         | 128 | 38  |  | Sable et gravier, blocs et sédiment diamictique formant des eskers, des kames, des deltas-kames et des crêtes morainiques. Forme des zones dont la surface est généralement bosselée  |
| Sédiment juxtaglacière interlobaire (Gxi)               | Gxi                             | 230         | 153 | 38  |  | Gravier, sable, blocs et sédiment diamictique mis en place au sein d'une moraine interlobaire (p. ex. Moraine d'Harcana). Surface généralement recouverte en grande partie d'une mince couverture de sédiments littoraux, pré littoraux ou éoliens  |
| Sédiment de moraine frontale (GxT)                      | GxT                             | 255         | 102 | 0   |  | Till, diamicton, blocs, sable et gravier mis en place au front du glacier et constitués d'une ou de plusieurs crêtes dont la surface est généralement bosselée et la continuité latérale est variable   |
| Sédiment proglaciaire non différencié (G)               | G                               | 255         | 178 | 38  |  | Sédiment d'origine fluvioglaciaire dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |

| ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES                  |                                 |             |     |     |   |   |
|--|---------------------------------|-------------|-----|-----|---|---|
| Nom et code du dépôt<br>(CODE_DEPOT_MORP_SEDM) | Code du symbole<br>(CODE_SYMBL) | Couleur RVB |     |     | Symbole   | Description   |
|  |                                 | R           | V   | B   |   |   |
| <b>Sédiments glaciaires</b>                    |                                 |             |     |     |   |   |
| Till remanié en couverture continue (Tr)       | Tr                              | 153         | 230 | 76  |    | Diamicton dont la partie superficielle a été remaniée par l'action des vagues et des courants associés à un lac ou une mer postglaciaire. Sédiment dont l'épaisseur est de plus d'un mètre, parfois fossilifère et comprenant des niveaux sablo-graveleux stratifiés ou substratifiés   |
| Till remanié en couverture discontinue (Trm)   | Trm                             | 178         | 255 | 102 |    | Diamicton dont la partie superficielle a été remaniée par l'action des vagues et des courants associés à un lac ou une mer postglaciaire. Sédiment dont l'épaisseur est généralement de moins de 1 m. La surface est généralement ponctuée d'affleurements rocheux et la structure du roc sous-jacent transparaît sur les photographies aériennes   |
| Till délavé (Td)                               | Td                              | 180         | 220 | 40  |    | Diamicton sablo-graveleux avec blocs en surface dont les particules fines ont été délavées par les eaux de fonte. Généralement localisé en bordure des corridors fluvioglaciaires ou dans des dépressions topographiques  |
| Till de fusion ou d'ablation (Tf)              | Tf                              | 38          | 178 | 102 |    | Diamicton à matrice lâche et généralement délavée, associé à l'ablation lente de la glace, et dont l'épaisseur dépasse généralement 1 m. Surface généralement ponctuée de nombreux cailloux et blocs  |
| Till bosselé (Tb)                              | Tb                              | 163         | 202 | 153 |    | Diamicton à matrice de sable et de gravier pauvre en particules fines avec des blocs apparaissant communément en surface. Présente généralement une topographie en bosses et en creux, sans orientation particulière. Sédiment mis en place lors de l'ablation du glacier par une glace stagnante ou peu active   |
| Till côtelé (To)                               | To                              | 10          | 204 | 102 |    | Diamicton à matrice généralement grossière présentant diverses structures sédimentaires (convolutes, failles, lentilles, sables et graviers stratifiés). Forme des crêtes ondulées espacées régulièrement et orientées transversalement à l'écoulement glaciaire (moraines de Rogon ou côtelées). Sédiment mis en place par une glace en régime compressif où l'écoulement glaciaire est relativement lent. Couramment trouvé en association avec des drumlins ou d'autres types de formes fuselées |
| Till fuselé (Ts)                               | Ts                              | 80          | 180 | 50  |  | Diamicton comprenant des faciès de fond et d'ablation, et formant des regroupements de formes fuselées (drumlins, trainées morainiques, <i>crag-and-tail</i> , etc.) alignées dans le sens de l'écoulement glaciaire. Sédiment mis en place par un glacier en régime extensif où l'écoulement glaciaire est généralement rapide   |
| Till en couverture généralement continue (Tc)  | Tc                              | 76          | 204 | 0   |  | Diamicton en couverture généralement continue comprenant principalement des faciès de fond et d'ablation, et dont l'épaisseur est supérieure à 1 m  |
| Till en couverture mince et discontinue (Tm)   | Tm                              | 204         | 255 | 153 |  | Diamicton de moins de 1 m d'épaisseur comprenant principalement des faciès de fond et d'ablation. La surface est généralement ponctuée d'affleurements rocheux et la structure du roc sous-jacent transparaît sur les photographies aériennes. Unité trouvée généralement dans les régions dominées par le socle rocheux  |
| Till non différencié (T)                       | T                               | 38          | 255 | 38  |  | Diamiction glaciaire dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |

| ZONES MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES   |                                 |             |     |     |   |  |
|---|---------------------------------|-------------|-----|-----|---|--|
| Nom et code du dépôt<br>(CODE_DEPOT_MORP_SEDM)                        | Code du symbole<br>(CODE_SYMBL) | Couleur RVB |     |     | Symbole   | Description  |
|   |                                 | R           | V   | B   |   |  |
| <b>Quaternaire ancien</b>   |                                 |             |     |     |   |  |
| Formation quaternaire ancienne non différenciée (Q)                   | Q                               | 178         | 102 | 38  |  | Formation sédimentaire glaciaire ou interglaciaire mise en place avant le Wisconsinien tardif, mais dont la genèse exacte n'a pu être déterminée   |
| Formation quaternaire ancienne altérée (Qa)                           | Qa                              | 178         | 128 | 102 |  | Formation sédimentaire altérée de nature diverse, préservée de l'érosion glaciaire ou n'ayant pas été recouverte par les glaciers du Wisconsinien tardif   |
| Felsenmeer (Qf)   | Qf                              | 178         | 76  | 0   |  | Champ de blocs principalement géofractés formé sur les hauts plateaux et recouvrant une mosaïque d'affleurements rocheux et de tills oxydés. Présence généralisée de cercles de pierres, d'ostioles, de sols striés et occasionnellement de blocs erratiques au sein de blocs d'origine locale |
| <b>Substrat rocheux</b>   |                                 |             |     |     |   |  |
| Roche en place non différenciée (R)                                   | R                               | 255         | 0   | 0   |  | Affleurements rocheux présentant parfois une mince couverture de sédiment meuble (moins de 30 cm) et dont la nature exacte n'a pu être différenciée  |
| Roche ignée intrusive (Ri)  | Ri                              | 204         | 0   | 76  |  | Affleurement formé de roches d'origine ignée intrusive   |
| Roche sédimentaire et/ou volcanique, généralement subhorizontale (Rs) | Rs                              | 255         | 38  | 76  |  | Affleurement formé de roches sédimentaires et/ou volcaniques non déformées et généralement subhorizontales   |
| Roche métasédimentaire et/ou métavolcanique déformée (Rd)             | Rd                              | 255         | 102 | 128 |  | Affleurement formé de roches métasédimentaires et/ou métavolcaniques déformées   |
| Roche métamorphique de haut grade (Rm)                                | Rm                              | 230         | 0   | 0   |  | Affleurement formé de roches d'origine métamorphique de haut grade   |

## ANNEXE 2.1

### NOMBRE DE DETECTION, LIMITES DE DETECTION, CONCENTRATIONS MINIMALES, MEDIANES ET MAXIMALES POUR LES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES ANALYSES A SAINT-ZENON

| Paramètres                          | N  | Nombre de détection | Limite de détection | Min       | 25%        | Médiane  | 75%      | Max      |
|-------------------------------------|----|---------------------|---------------------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| Ag (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,0001              | -         | -          | -        | -        | -        |
| Al (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,01                | -         | -          | -        | -        | -        |
| Alcalinité Totale (en CaCO3) pH 4_5 | 15 | 15                  | 1,000               | 156       | 159        | 162      | 165      | 213      |
| As (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,0003              | -         | -          | -        | -        | -        |
| B (mg/L)                            | 15 | 7                   | 0,02                | 0,05      | 0,05       | 0,05     | 0,1165   | 0,135    |
| Ba (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,002               | 0,0945    | 0,0983     | 0,1000   | 0,1020   | 0,1040   |
| Be (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,0004              | -         | -          | -        | -        | -        |
| Bi (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,00025             | -         | -          | -        | -        | -        |
| Ca (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,3                 | 123       | 129        | 131      | 137      | 146      |
| Cd (mg/L)                           | 15 | 5                   | 0,00005             | 0,0000074 | 0,00002255 | 0,000025 | 0,000025 | 0,000144 |
| Co (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,0005              | -         | -          | -        | -        | -        |
| Cr (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,0005              | -         | -          | -        | -        | -        |
| Cu (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,0005              | 0,00973   | 0,01070    | 0,01220  | 0,01475  | 0,02400  |
| Fe (mg/L)                           | 15 | 4                   | 0,06                | 0,0290    | 0,0455     | 0,0500   | 0,0500   | 0,0500   |
| K (mg/L)                            | 15 | 15                  | 0,1                 | 3,8700    | 3,9950     | 4,1400   | 4,2400   | 4,4200   |
| Li (mg/L)                           | 15 | 4                   | 0,003               | -         | -          | -        | -        | -        |
|                                     |    |                     | 0,001               | 0,0050    | 0,0050     | 0,0050   | 0,0055   | 0,0064   |
| Mg (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,1                 | 8,25      | 8,57       | 8,96     | 9,86     | 10,8     |
| Mn (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,0004              | 0,020200  | 0,03180    | 0,03740  | 0,03905  | 0,04450  |
| Mo (mg/L)                           | 15 | 4                   | 0,0005              | 0,00025   | 0,00025    | 0,00025  | 0,00026  | 0,00028  |
| Na (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,1                 | 249,00    | 290,5      | 299      | 305,5    | 316      |
| NH4 (mg N/l)                        | 15 | 5                   | 0,002               | -         | -          | -        | -        | -        |
|                                     |    |                     |                     | 0,00250   | 0,00250    | 0,00250  | 0,00645  | 0,01770  |
| Ni (mg/L)                           | 15 | 4                   | 0,001               | 0,00139   | 0,00201    | 0,00250  | 0,00250  | 0,00250  |
| Pb (mg/L)                           | 15 | 5                   | 0,0001              | 0,00021   | 0,00025    | 0,00025  | 0,00025  | 0,00052  |
| Sb (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,001               | -         | -          | -        | -        | -        |
| Se (mg/L)                           | 15 | 2                   | 0,00005             | 0,00003   | 0,00016    | 0,00025  | 0,00025  | 0,00025  |
| Si_d(mg/L)                          | 15 | 15                  | 0,1                 | 5,78      | 6,1050     | 6,210    | 6,795    | 7,35     |
| Sn (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,001               | -         | -          | -        | -        | -        |
| Sr (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,002               | 0,959     | 1,0030     | 1,050    | 1,160    | 1,29     |
| Sulfures (mg S/l)                   | 15 | 15                  | 0,02                | 12,4      | 13,2       | 13,7     | 14,8     | 15,8     |
| Ti (mg/L)                           | 15 | 0                   | 0,01                | -         | -          | -        | -        | -        |
| U (mg/L)                            | 15 | 15                  | 0,001               | 0,00298   | 0,00322    | 0,00348  | 0,00378  | 0,00390  |
| V (mg/L)                            | 15 | 0                   | 0,002               | -         | -          | -        | -        | -        |
| Zn (mg/L)                           | 15 | 15                  | 0,005               | 0,0109    | 0,0171     | 0,0190   | 0,0250   | 0,0290   |

## ANNEXE 2.2

### NOMBRE DE DETECTION, LIMITES DE DETECTION, CONCENTRATIONS MINIMALES, MEDIANES ET MAXIMALES POUR LES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES ANALYSES A MANDEVILLE

| <i>Paramètres</i>                          | <i>N</i> | <i>Nombre de détection</i> | <i>Limite de détection</i> | <i>Min</i> | <i>25%</i> | <i>Médiane</i> | <i>75%</i>   | <i>Max</i> |
|--|----------|----------------------------|----------------------------|------------|------------|----------------|--------------|------------|
| <i>Ag (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0001                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Al (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,01                       | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Alcalinité Totale (en CaCO3) pH 4_5</i> | 15       | 15                         | 1,000                      | 195        | 202,5      | 207            | 214,5        | 237        |
| <i>As (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0003                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>B (mg/L)</i>                            | 15       | 15                         | 0,02                       | 0,22       | 0,22       | 0,22           | 0,23         | 0,24       |
| <i>Ba (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,002                      | 0,0264     | 0,032      | 0,033          | 0,0343       | 0,0379     |
| <i>Be (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0004                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Bi (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,00025                    | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Ca (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,3                        | 25,9       | 29,65      | 30,5           | 31,6         | 34,4       |
| <i>Cd (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0002                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Co (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0005                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Cr (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0005                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Cu (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0005                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Fe (mg/L)</i>                           | 15       | 14                         | 0,06                       | 0,03       | 0,160      | 0,18           | 0,225        | 0,29       |
| <i>K (mg/L)</i>                            | 15       | 15                         | 0,100                      | 10,6       | 10,75      | 10,9           | 10,9         | 11,6       |
| <i>Li (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,003<br>0,001             | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Mg (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,01                       | 7,39       | 7,76       | 7,87           | 8,10         | 8,60       |
| <i>Mn (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,0004                     | 0,0527     | 0,0590     | 0,0609         | 0,0635       | 0,0668     |
| <i>Mo (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,0005                     | 0,00583    | 0,00625    | 0,00639        | 0,00664<br>5 | 0,00692    |
| <i>Na (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,1                        | 338,0      | 340,5      | 341,0          | 345,5        | 368,0      |
| <i>NH4 (mg N/l)</i>                        | 15       | 15                         | 0,02                       | 0,352      | 0,354      | 0,356          | 0,358        | 0,365      |
| <i>Ni (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,001                      | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Pb (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,0001                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Sb (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,0002                     | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Se (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,001                      | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Si_d(mg/L)</i>                          | 15       | 15                         | 0,10                       | 4,91       | 6,12       | 6,4            | 6,66         | 7,02       |
| <i>Sn (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,001                      | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Sr (mg/L)</i>                           | 15       | 15                         | 0,002                      | 0,762      | 0,820      | 0,836          | 0,858        | 0,928      |
| <i>Sulfures (mg S/l)</i>                   | 15       | 15                         | 0,02                       | 17,70      | 19,25      | 19,90          | 20,25        | 21,50      |
| <i>Ti (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,01                       | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>U (mg/L)</i>                            | 15       | 15                         | 0,0001                     | 0,0001     | 0,00034    | 0,00040        | 0,00043      | 0,00047    |
| <i>V (mg/L)</i>                            | 15       | 0                          | 0,002                      | -          | -          | -              | -            | -          |
| <i>Zn (mg/L)</i>                           | 15       | 0                          | 0,005                      | -          | -          | -              | -            | -          |

## ANNEXE 2,3

### NOMBRE DE DETECTION, LIMITES DE DETECTION, CONCENTRATIONS MINIMALES, MEDIANES ET MAXIMALES POUR LES ELEMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES ANALYSES A SAINT-ADELPHE

| Paramètres                                   | N  | Nombre de<br>détection | Limite de<br>détection | Min    | 25%    | Médiane | 75%    | Max    |
|--|----|------------------------|------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Ag (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0001                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Al (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,01                   | -      | -      | -       | -      | -      |
| Alcalinité<br>Totale (en<br>CaCO3) pH<br>4_5 | 15 | 15                     | 1,000                  | 117    | 120    | 123     | 133,5  | 150    |
| As (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0003                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| B (mg/L)                                     | 15 | 15                     | 0,02                   | 0,17   | 0,19   | 0,20    | 0,20   | 0,21   |
| Ba (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,002                  | 0,031  | 0,035  | 0,037   | 0,038  | 0,040  |
| Be (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0004                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Bi (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,00025                | -      | -      | -       | -      | -      |
| Ca (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,3                    | 183    | 199,5  | 212     | 214    | 219    |
| Cd (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0002                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Co (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0005                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Cr (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0005                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Cu (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0005                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Fe (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,06                   | -      | -      | -       | -      | -      |
| K (mg/L)                                     | 15 | 15                     | 0,100                  | 6,64   | 7,47   | 7,66    | 8,02   | 8,57   |
| Li (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,003                  | -      | 0,0210 | 0,0235  | 0,0240 | 0,0250 |
| Mg (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,01                   | 7,1600 | 8,1650 | 8,4600  | 8,7400 | 9,5200 |
| Mn (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,0004                 | 0,0621 | 0,0693 | 0,0712  | 0,0758 | 0,0781 |
| Mo (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0005                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Na (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,1                    | 244,00 | 277,5  | 288     | 300    | 312    |
| NH4 (mg<br>N/l)                              | 15 | 15                     | 0,02                   | 0,2600 | 0,2675 | 0,2700  | 0,2755 | 0,3040 |
| Ni (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,001                  | -      | -      | -       | -      | -      |
| Pb (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,0001                 | -      | -      | -       | -      | -      |
| Sb (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,002                  | -      | -      | -       | -      | -      |
| Se (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,001                  | 0,0068 | 0,0091 | 0,0103  | 0,0119 | 0,0147 |
| Si_d(mg/L)                                   | 15 | 15                     | 0,100                  | 5,06   | 5,755  | 6,08    | 6,385  | 6,64   |
| Sn (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,001                  | -      | -      | -       | -      | -      |
| Sr (mg/L)                                    | 15 | 15                     | 0,002                  | 5,08   | 5,625  | 5,86    | 5,99   | 6,12   |
| Sulfures (mg<br>S/l)                         | 15 | 15                     | 0,02                   | 6,9    | 7,65   | 8,3     | 9,15   | 9,4    |
| Ti (mg/L)                                    | 15 | 0                      | 0,010                  | -      | -      | -       | -      | -      |
| U (mg/L)                                     | 15 | 15                     | 0,0001                 | 0,0006 | 0,0007 | 0,0007  | 0,0007 | 0,0008 |
| V (mg/L)                                     | 15 | 0                      | 0,002                  | -      | -      | -       | -      | -      |
| Zn (mg/L)                                    | 15 | 12                     | 0,001                  | 0,005  | 0,014  | 0,026   | 0,031  | 0,043  |

ANNEXE 3,1

CONCENTRATIONS EN ELEMENTS TERRES RARES DE LA STATION DE SAINT-ZENON

|                               | SAINT-ZÉNON-7 | SAINT-ZÉNON-6 | SAINT-ZÉNON-5 | SAINT-ZÉNON-4 | SAINT-ZÉNON-3 | SAINT-ZÉNON-2 | SAINT-ZÉNON-1 | UNITÉ |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| LANTHANUM (LA)                | 0,000282      | 0,000319      | 0,000168      | 0,000141      | 0,000136      | 0,000144      | 0,000122      | mg/L  |
| CERIUM (CE)                   | 0,000014      | -0,00001      | -0,00001      | 0,000024      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | mg/L  |
| PRASEODYMIUM (PR)             | 0,000044      | 0,000049      | 0,000024      | 0,000019      | 0,000018      | 0,00002       | 0,000016      | mg/L  |
| NEODYMIUM (ND)                | 0,000175      | 0,000194      | 0,000103      | 0,00009       | 0,000078      | 0,000083      | 0,000075      | mg/L  |
| SAMARIUM (SM)                 | 0,000028      | 0,000031      | 0,000014      | 0,000013      | 0,000011      | 0,000014      | 0,000012      | mg/L  |
| EUROPIUM (EU)                 | 0,000016      | 0,000015      | 0,000012      | 0,000012      | 0,000011      | 0,000012      | 0,000013      | mg/L  |
| GADOLINIUM (GD)               | 0,00003       | 0,000032      | 0,000015      | 0,000017      | 0,000014      | 0,000019      | 0,000017      | mg/L  |
| TERBIUM (TB)                  | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | mg/L  |
| DYSPROSIUM (LEYBOURNE ET AL.) | 0,000023      | 0,000025      | 0,000013      | 0,000013      | 0,000012      | 0,000013      | 0,000013      | mg/L  |
| HOLMIUM (HO)                  | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | mg/L  |
| ERBIUM (ER)                   | 0,000019      | 0,00002       | 0,000016      | 0,000014      | 0,000014      | 0,000013      | 0,000014      | mg/L  |
| THULIUM (APPELO AND POSTMA)   | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | -0,00001      | mg/L  |
| YTTERBIUM (YB)                | 0,000021      | 0,000023      | 0,000019      | 0,000018      | 0,000019      | 0,000019      | 0,000016      | mg/L  |

|           | SAINT-ZÉNON-15 | SAINT-ZÉNON-14 | SAINT-ZÉNON-13 | SAINT-ZÉNON-12 | SAINT-ZÉNON-11 | SAINT-ZÉNON-10 | SAINT-ZÉNON-9 | SAINT-ZÉNON-8 |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 0,000176  | 0,000245       | 0,000293       | 0,000303       | 0,000323       | 0,000275       | 0,000208       | 0,000325      |               |
| -0,000001 | 0,000026       | 0,00002        | 0,000027       | 0,000016       | 0,000024       | -0,000001      | 0,000015      |               |
| 0,000025  | 0,000042       | 0,000046       | 0,000046       | 0,00005        | 0,00004        | 0,00003        | 0,000051      |               |
| 0,000105  | 0,000164       | 0,000184       | 0,000179       | 0,000202       | 0,00016        | 0,000126       | 0,000206      |               |
| 0,000016  | 0,000026       | 0,000029       | 0,000029       | 0,000029       | 0,000025       | 0,000019       | 0,000031      |               |
| 0,000012  | 0,000013       | 0,000014       | 0,000013       | 0,000016       | 0,000012       | 0,000013       | 0,000016      |               |
| 0,000019  | 0,000024       | 0,000029       | 0,00003        | 0,000032       | 0,000029       | 0,000021       | 0,000031      |               |
| -0,000001 | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001     |               |
| 0,000015  | 0,000016       | 0,000021       | 0,000022       | 0,000024       | 0,000021       | 0,000017       | 0,000023      |               |
| -0,000001 | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001     |               |
| 0,000013  | 0,000011       | 0,000019       | 0,000021       | 0,00002        | 0,000018       | 0,000015       | 0,000017      |               |
| -0,000001 | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001      | -0,000001     |               |
| 0,000018  | 0,000014       | 0,00002        | 0,000021       | 0,000023       | 0,000023       | 0,00002        | 0,000021      |               |





| SAINT-ADELPHÉ-<br>15 | SAINT-ADELPHÉ-<br>14 | SAINT-ADELPHÉ-<br>13 | SAINT-ADELPHÉ-<br>12 | SAINT-ADELPHÉ-<br>11 | SAINT-ADELPHÉ-<br>10 | SAINT-ADELPHÉ-<br>9 | SAINT-ADELPHÉ-<br>8 |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 2,10E-05             | 3,10E-05             | 1,70E-05             | 2,50E-05             | 2,50E-05             | 2,50E-05             | 2,70E-05            | 3,50E-05            |
| 6,70E-05             | 9,50E-05             | 5,00E-05             | 7,00E-05             | 7,20E-05             | 7,70E-05             | 8,00E-05            | 1,08E-04            |
| 1,70E-05             | 2,40E-05             | 1,30E-05             | 1,80E-05             | 1,80E-05             | 1,90E-05             | 1,90E-05            | 2,70E-05            |
| 1,23E-04             | 1,71E-04             | 9,30E-05             | 1,26E-04             | 1,28E-04             | 1,35E-04             | 1,30E-04            | 1,98E-04            |
| 5,60E-05             | 7,70E-05             | 4,70E-05             | 6,50E-05             | 6,50E-05             | 6,90E-05             | 6,40E-05            | 9,60E-05            |
| 1,60E-05             | 2,10E-05             | 1,50E-05             | 1,90E-05             | 2,00E-05             | 1,80E-05             | 1,90E-05            | 2,50E-05            |
| 1,24E-04             | 1,65E-04             | 1,14E-04             | 1,45E-04             | 1,40E-04             | 1,47E-04             | 1,42E-04            | 1,92E-04            |
| 1,70E-05             | 2,10E-05             | 1,50E-05             | 1,90E-05             | 1,90E-05             | 1,80E-05             | 1,80E-05            | 2,60E-05            |
| 1,06E-04             | 1,33E-04             | 9,70E-05             | 1,34E-04             | 1,19E-04             | 1,30E-04             | 1,17E-04            | 1,64E-04            |
| 2,50E-05             | 2,90E-05             | 2,30E-05             | 3,00E-05             | 2,70E-05             | 2,90E-05             | 2,90E-05            | 3,70E-05            |
| 6,80E-05             | 8,00E-05             | 6,70E-05             | 7,70E-05             | 6,80E-05             | 7,30E-05             | 7,50E-05            | 9,10E-05            |
| -1,00E-05            | -1,00E-05            | -1,00E-05            | -1,00E-05            | -1,00E-05            | -1,00E-05            | -1,00E-05           | -1,00E-05           |
| 3,00E-05             | 3,60E-05             | 2,90E-05             | 3,50E-05             | 3,00E-05             | 3,40E-05             | 3,30E-05            | 4,30E-05            |

## ANNEXE 4

### RESUME DES CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTABLES (CMA) ET DES OBJECTIFS ESTHETIQUES (OE) RECOMMANDES PAR SANTE CANADA AINSI QUE LES CONCENTRATIONS MAXIMALES (CM) PRESCRITES PAR LE RQEP

| Paramètre (publié, réaffirmé) | Recommandations canadiennes |   | Norme québécoise |
|-------------------------------|-----------------------------|---|------------------|
|                               | CMA (mg/L)                  | OE (mg/L)   | CM (mg/L)        |
| Aluminium (1998)              |                             | VOR* : < 0,1 (traitement conventionnel)<br>< 0,2 (autres types de traitement) |                  |
| Antimoine (1997)              | 0.006                       |   | 0.006            |
| Argent (1986, 2005)           | Aucune                      |   |                  |
| Arsenic (2006)                | 0,01 ALARA                  |   | 0.01             |
| Baryum (1990)                 | 1                           |   | 1                |
| Bore (1990)                   | 5                           |   | 5                |
| Cadmium (1986, 2005)          | 0.005                       |   | 0.005            |
| Calcium (1987, 2005)          | Aucune                      |   |                  |
| Chlore (2009)                 | Aucune                      |   |                  |
| Chlorure (1979, 2005)         |                             | OE : ≤ 250  |                  |
| Chrome (1986)                 | 0.05                        |   | 0.05             |
| Cuivre (2019)                 | 2                           | OE : 1  | 1                |
| Fer (1978, 2005)              |                             | OE : ≤ 0,3  |                  |
| Fluorure (2010)               | 1.5                         |   | 1.5              |

| Paramètre (publié, réaffirmé) | Recommandations canadiennes                        |             | Norme québécoise        |
|-------------------------------|--|-------------|-------------------------|
|                               | CMA (mg/L)   | OE (mg/L)   | CM (mg/L)               |
| Magnésium (1978)              | Aucune   |             |                         |
| Manganèse (2019)              | 0.12   | OE : ≤ 0,02 |                         |
| Nitrate (2013)                | 45 sous forme de nitrate;<br>10 sous forme d'azote |             | Nitrates + nitrite = 10 |
| Nitrite (2013)                | 3 sous forme de nitrite;<br>1 sous forme d'azote   |             | Nitrates + nitrite = 10 |
| Plomb (2019, 2021)            | 0,005 ALARA  |             | 0.005                   |
| Sélénium (2014)               | 0.05   |             | 0.01                    |
| Sodium (1979)                 |  | OE: ≤ 200   |                         |
| Strontium (2019)              | 7  |             |                         |
| Sulfates (1994)               |  | OE: ≤ 500   |                         |
| Sulfure (1992)                |  | OE ≤ 0.05   |                         |
| Uranium (1999)                | 0.02   |             | 0.02                    |
| Zinc (1979, 2005)             |  | OE : ≤ 5,0  |                         |

<sup>1</sup> Les données présentées dans ce tableau proviennent du [www.canada.ca/fr/sante-canada/](http://www.canada.ca/fr/sante-canada/) et du [www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable](http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable) et sont valides en date du 31 mars 2021.

\* Valeur opérationnelle recommandée afin d'optimiser le traitement de l'eau et l'exploitation des réseaux de distribution.