



**COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
DOSSIER PUBLIC 6960**

**Délimitation des eaux souterraines saumâtres en
Montréal Est, Québec, Canada**

C. Beaudry¹, X. Malet¹, R. Lefebvre¹ et C. Rivard²

¹ Institut national de la recherche scientifique – Centre ETE

² Commission géologique du Canada – Division Québec

2011



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada



COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA DOSSIER PUBLIC 6960

Délimitation des eaux souterraines saumâtres en Montréal Est, Québec, Canada

C. Beaudry¹, X. Malet¹, R. Lefebvre¹ et C. Rivard²

¹ Institut national de la recherche scientifique – Centre ETE

² Commission géologique du Canada – Division Québec

2011

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada 2011

doi: 10.4095/289123

On peut se procurer cette publication en s'adressant à la Librairie de la Commission géologique du Canada (http://cgc.rncan.gc.ca/bookstore_f.php).

On peut aussi la télécharger gratuitement à partir du site Web de GéoPub (<http://geopub.rncan.gc.ca/>).

Notation bibliographique conseillée :

Beaudry, C., Malet, X., Lefebvre, R. et Rivard, C., 2011. Délimitation des eaux souterraines saumâtres en Montréal Est, Québec, Canada; Commission géologique du Canada, Dossier public 6960, 26 p. 10.4095/289123.

Les publications de cette série ne sont pas révisées; elles sont publiées telles que soumises par les auteurs.

Sommaire

En Montérégie Est, entre les collines Montérégiennes, au sud et la ville de Sorel-Tracy, au nord, l'eau souterraine présente dans les aquifères rocheux est saumâtre et impropre à la consommation humaine. Bien que des travaux plus détaillés soient requis pour tirer des conclusions définitives, il est présumé que la présence de cette eau saumâtre est reliée à l'invasion des aquifères par l'eau de l'ancienne mer de Champlain, tel qu'observé dans d'autres régions des Basses-terres du Saint-Laurent. La Mer de Champlain a en effet occupé la vallée du Saint-Laurent pendant approximativement 1500 ans à partir de la fin de la dernière glaciation, soit il y a environ 11 000 ans.

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet « Caractérisation régionale du système aquifère Richelieu-Yamaska » de la CGC, en collaboration avec l'INRS-ETE. Ce projet fait également partie du Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) visant à dresser le portrait des ressources en eau souterraine au Québec, notamment en Montérégie Est. Cette région s'étend sur plus de 9 000 km², englobant les bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska, ainsi que celui de la Baie Missisquoi. Le but premier de ce travail est de délimiter la zone où les aquifères rocheux contiennent de l'eau saumâtre. Cette zone est d'abord d'intérêt pour l'évaluation de la qualité de l'eau souterraine, mais présente également un intérêt pour l'exploration ainsi que l'éventuelle exploitation des gaz de shale dans les Basses-terres du St-Laurent. Dans un contexte où l'eau est impropre à la consommation et ne constitue pas une source d'approvisionnement en eau potable, celle-ci pourrait servir en partie aux besoins de l'industrie des gaz de shale, sans créer de conflit avec d'autres usages.

Le présent rapport s'appuie sur des données existantes issues des bases de données du MDDEP, de rapports de consultants ainsi que du projet de caractérisation régionale (PACES). Les paramètres géochimiques de l'eau souterraine utilisés pour délimiter la zone saumâtre sont les concentrations en chlorures (Cl⁻), bromures (Br⁻) et en matières dissoutes totales (MDT), ainsi que la conductivité électrique. La corrélation entre ces paramètres a permis d'établir des plages de valeurs distinguant les eaux « douces », « saumâtres » et « salées ». La répartition spatiale et la densité des puits résidentiels ont également servi d'indicateur pour établir la limite de l'eau impropre à la consommation. Les résultats obtenus ont démontré que l'eau avec les plus fortes concentrations en sels est dans la majorité des cas « saumâtre » et non « salée », avec des concentrations en MDT entre 1000 et 5000 mg/L et des concentrations en chlorures dépassant 250 mg/L, ce qui excède le critère esthétique de Santé Canada (2010) pour l'eau potable. La zone d'eau saumâtre a pu être délimitée très nettement : elle s'étend sur environ 2 200 km², soit environ 40 km d'ouest en est et 65 km du nord au sud. La zone transitoire entre l'eau douce et l'eau saumâtre s'est avérée être d'étendue très limitée. Des zones secondaires avec de l'eau douce, mais ayant une salinité significative, ont aussi été délimitées à quelques endroits dans la région d'étude. Des cartes ont été produites pour mettre en relation la zone d'eau saumâtre et les zones secondaires avec l'épaisseur d'argile, les unités géologiques, les contextes hydrogéologiques, la piézométrie et l'occupation du territoire. Ces cartes fournissent certaines indications sur les processus ayant pu contribuer à la présence de l'eau saumâtre. Cependant, des travaux plus détaillés doivent être poursuivis pour identifier l'origine et les causes de la présence de cette eau saumâtre en Montérégie Est, ainsi que pour comprendre les implications de la présence d'eau douce avec une salinité significative sur les conditions de recharge et d'écoulement de l'eau souterraine dans cette région.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Contexte géologique régional.....	3
3	Méthodologie.....	4
3.1	Données sources	5
3.2	Tri et sélection des données	6
3.3	Données quantitatives (résultats analytiques)	6
3.4	Critères qualitatifs (répartition spatiale des puits).....	7
4	Traitement des résultats analytiques.....	7
4.1	Rapport Cl^-/Br^-	8
4.2	MDT et chlorures	9
4.3	MDT et conductivité électrique.....	10
4.4	Définition des critères de salinité.....	10
5	Analyse spatiale de l'utilisation de l'eau souterraine	13
5.1	Répartition spatiale des puits du SIH	13
5.2	Sources d'approvisionnement des municipalités	14
6	Cartes d'interprétation	15
7	Conclusions	17
	Références	18
	Annexe – Cartes d'interprétation	20

Liste des tableaux

Tableau 1 : Sources des données analytiques utilisées pour délimiter la zone d'eau saumâtre...	6
Tableau 2 : Définition des critères de salinité pour fins d'interprétation des résultats analytiques.....	11

Liste des figures

Figure 1: Région à l'étude pour le projet Richelieu-Yamaska (Montérégie Est, QC).....	2
Figure 2: Les régions physiographiques	3
Figure 3: Répartition des 27 228 puits répertoriés dans le SIH	7
Figure 4: Concentrations des ions bromures (meq/L) en fonction des concentrations en ions chlorures (meq/L), sur échelle logarithmique	8
Figure 5: Concentrations en chlorures en fonction des concentrations en MDT, sur échelle logarithmique	9
Figure 6: Conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) en fonction des concentrations en MDT (en mg/L), sur une échelle logarithmique	10
Figure 7: Représentation spatiale des données géochimiques pour les ions chlorures et bromures (en mg/L), à gauche, ainsi que pour les matières dissoutes totales (MDT, en mg/L) et la conductivité électrique spécifique (en mS/cm), à droite.....	17
Figure 8: Interpolation de la densité des puits répertoriés sur le territoire de la Montérégie Est	13
Figure 9: Type d'approvisionnement des réseaux d'aqueduc de la région.....	14
Figure 10: Délimitation de la zone d'eau saumâtre ainsi que des zones d'eau douce à salinité significative en fonction des résultats analytiques et de la répartition spatiale des puits répertoriés	15
Figure A-1 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en violet) avec comme fond la carte de l'épaisseur de la couche d'argile.....	21
Figure A-2a : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en violet) avec comme fond la carte géologique des unités rocheuses	22
Figure A-2b : Légende de la carte géologique des unités rocheuses présentée à la figure A-2a.	23
Figure A-3 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en blanc et noir) avec comme fond la carte topographique 3D illustrant également les contextes hydrogéologiques.....	24
Figure A-4 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en noir) avec comme fond la carte piézométrique réalisée à partir de l'interpolation de 26 670 mesures piézométriques.....	25
Figure A-5 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en noir) avec comme fond la carte routière et topographique	26

1 Introduction

Au Québec, l'eau souterraine est une source importante d'approvisionnement en eau potable, principalement pour les secteurs ruraux. La dégradation de cette ressource, qu'elle soit due à une contamination anthropique ou encore à une caractéristique naturelle indésirable de l'aquifère, peut freiner le développement des régions aux prises avec une telle problématique.

La partie nord-ouest de la Montérégie Est a dû faire face à un problème d'approvisionnement en eau à cause des concentrations naturellement élevées en sels dissous dans l'eau souterraine présente dans les aquifères rocheux. Cette salinité élevée rend l'eau impropre à la consommation. Les municipalités touchées se sont regroupées, au cours des années '70, afin de mettre en place des systèmes collectifs et alternatifs d'alimentation en eau potable et ainsi permettre le développement agricole et industriel de la région.

Selon une autre perspective, la piètre qualité naturelle de l'eau souterraine de ce secteur rend cette ressource moins à risque par rapport aux effets potentiels des activités anthropiques. Cette situation ouvre la porte à d'autres types d'exploitations des ressources en eau souterraine, sans craindre la dégradation de la ressource ou des conflits d'usages.

Les aquifères et l'eau souterraine en Montérégie Est sont étudiés depuis 2009 dans le cadre d'une vaste étude de caractérisation hydrogéologique régionale réalisée par l'Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) et la Commission géologique du Canada (CGC), en collaboration avec plusieurs partenaires régionaux et scientifiques. La zone d'étude comprend les bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska ainsi que de la Baie Missisquoi, couvrant approximativement le territoire de la CRÉ Montérégie Est. Celle-ci s'étend sur environ 9000 km² (figure 1). Ce projet fait partie du Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES) mis sur pied par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) en 2009. Les informations et données recueillies dans le cadre de cette vaste étude ont permis de documenter la problématique de l'eau souterraine saumâtre de la région et d'en mettre à jour les connaissances.

La présence d'eau souterraine à haute concentration en chlorures dans la vallée du Saint-Laurent est documentée depuis la fin des années '60. Les travaux de Prévôt (MRNF, 1969 et 1972) avaient même permis la délimitation assez précise d'une zone d'eau saumâtre dans la région physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent comprise entre les collines Montérégiennes (Monts St-Bruno, St-Hilaire, Rougemont et Yamaska) et le fleuve Saint-Laurent.

Le présent rapport permettra de préciser et d'actualiser l'étendue de la zone d'eau saumâtre sur la base des données existantes, plus abondantes qu'à l'époque des études de Prévôt (MRNF, 1969 et 1972). Ces données sont issues des bases de données du MDDEP, de rapports de consultants ainsi que du projet de caractérisation régionale (PACES). Les données les plus récentes sont issues d'une campagne de terrain réalisée à l'été et l'automne 2010 dans le cadre du PACES.

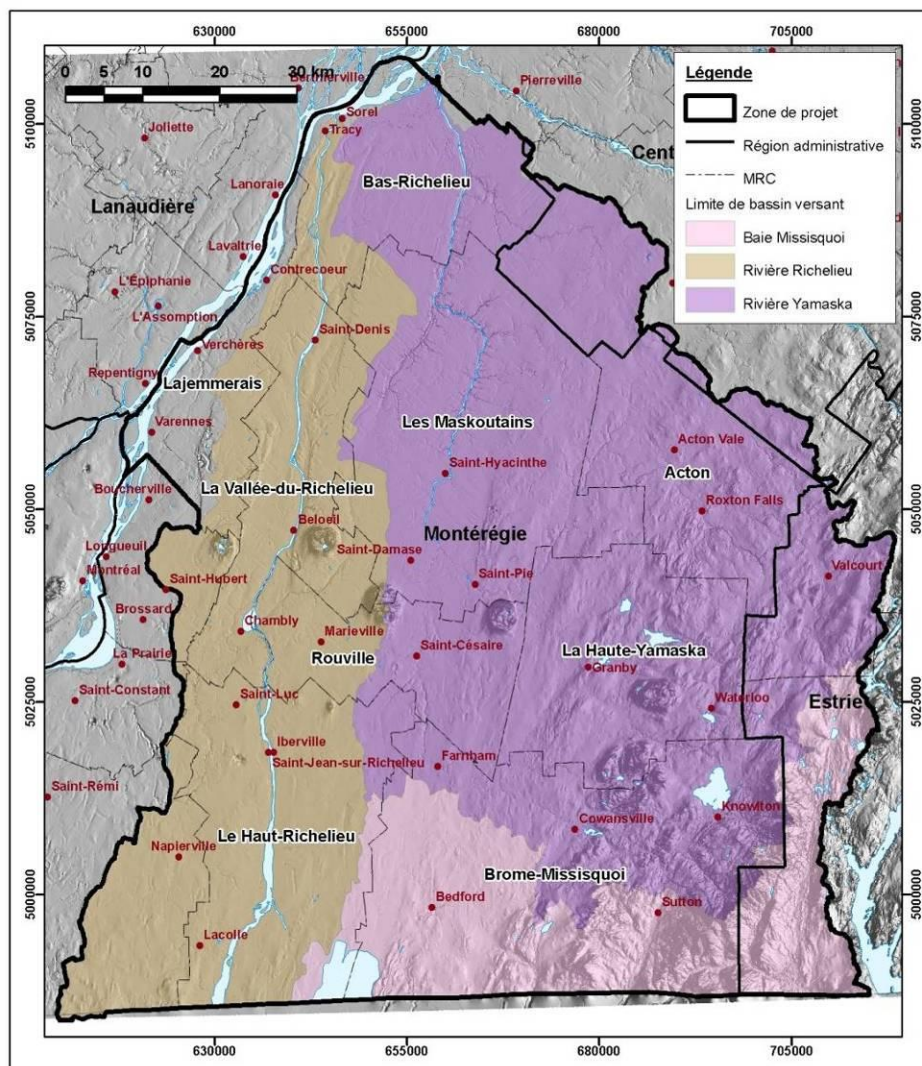


Figure 1: Région à l'étude pour le projet Richelieu-Yamaska (Montérégie Est, QC)

L'objectif est de mettre à jour les connaissances liées à l'eau souterraine saumâtre qui occupe l'aquifère rocheux fracturé dans la partie aval des bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska. L'interprétation des données permettra la délimitation géographique de cette zone ainsi que de zones secondaires d'eau douce à salinité significative. L'étude fournira des bases d'interprétation concernant l'origine de cette salinité ainsi que des causes de la conservation de cette salinité avec le temps. Ce travail contribue au portrait global de la qualité de la ressource en eau souterraine qui est en voie d'être dressé pour cette région dans le cadre du projet de caractérisation régionale. Les gestionnaires des ressources en eau souterraine pourront ainsi tenir compte des secteurs où l'eau n'est pas naturellement potable au niveau des mesures de protection ou des restrictions dans l'usage de l'eau souterraine, notamment en relation avec les activités d'exploration et d'exploitation des gaz de shale.

2 Contexte géologique régional

La région à l'étude correspond au territoire de la CRÉ Montérégie Est et couvre les bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska ainsi que de la Baie Missisquoi. Elle est délimitée au nord-ouest par le fleuve St-Laurent et au sud par la frontière américaine (figure 1). La zone où l'eau souterraine de l'aquifère rocheux présente une forte salinité se situe dans la portion nord-ouest, soit en aval des bassins versants des rivières Richelieu et Yamaska et au sud-est du fleuve St-Laurent. Plus précisément, elle se situe entre les villes de St-Hyacinthe et de Sorel-Tracy, en se basant sur la carte du Prévôt (MRNF, 1972) ainsi que sur nos travaux de terrain.

La Montérégie Est peut être divisée en quatre régions physiographiques (figure 2):

Les Basses-terres du Saint-Laurent : caractérisées par de vastes plaines argileuses déposées sur des roches sédimentaires très peu déformées datant principalement du Cambrien et de l'Ordovicien. Elles longent les rives du fleuve St-Laurent et couvrent la moitié nord-ouest de la région d'étude.

Les Appalaches : chaîne de montagnes d'âge paléozoïque composée de roches fortement déformées, les Appalaches occupent les secteurs sud et est de la zone d'étude et sont caractérisées par des montagnes aux sommets arrondis qui culminent entre 210 et 540 m d'altitude, ainsi que d'anciennes vallées glaciaires.

Le Piémont appalachien : transition entre la plaine argileuse et la chaîne appalachienne, il correspond plus particulièrement à la phase parautochtone des Appalaches.

Les collines Montérégiennes : six de ces collines rocheuses d'âge Crétacé transpercent d'ouest en est la région d'étude. Ces massifs intrusifs composés de roches ignées ont été mis à nu par érosion différentielle.

La zone d'intérêt à salinité élevée se trouve dans les Basses-terres du-St Laurent, sous un dépôt argileux marin d'épaisseur variable, allant d'environ 5 m à plus de 25 m d'épaisseur. L'hypothèse retenue jusqu'à présent pour expliquer l'origine de l'eau souterraine saumâtre provient de travaux similaires réalisés dans d'autres régions des Basses-terres du Saint-Laurent (Cloutier et al., 2010; Blanchette et al., 2010, Benoit et al., 2011). À la fin de la dernière

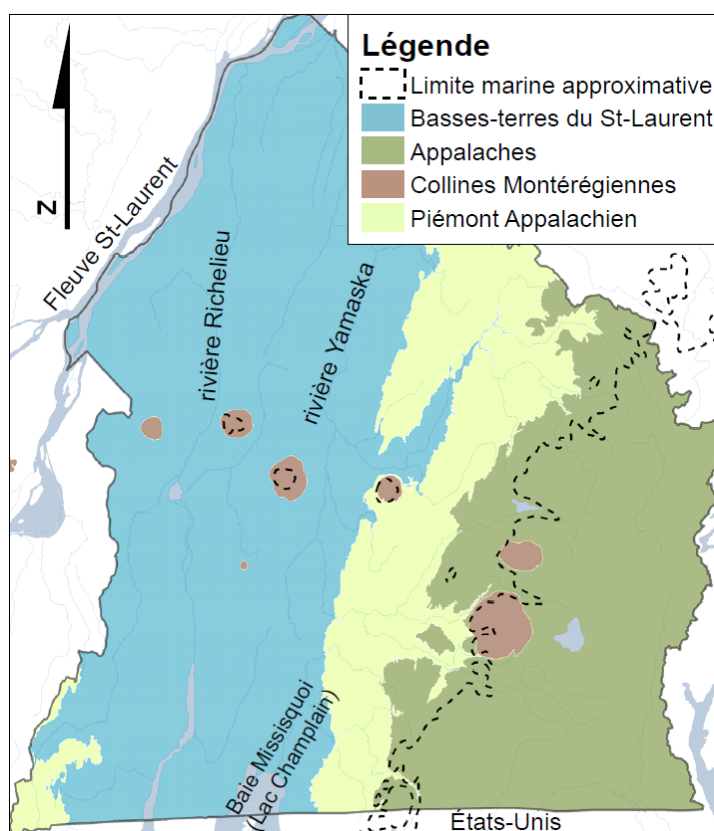


Figure 2: Les régions physiographiques

glaciation, il y a 11 000 ans (Occhietti et al., 2003), le front glaciaire s'est retiré vers le nord et une mer est venue combler le creux isostatique causé par le poids des glaces. Cette mer, la Mer de Champlain, présentait une eau dont les concentrations en sels, soit en matières dissoutes totales (MDT), étaient de l'ordre de 11,3 g/L, correspondant à une eau de mer (34%) diluée par l'eau douce de fonte des glaciers et les précipitations (66%) (Cloutier et al., 2010). Cette mer, qui s'est retirée il y a approximativement 9 500 ans, a laissé d'importants dépôts d'argiles ainsi que des vestiges d'eau saline dans les aquifères sous-jacents. Il est présumé que l'eau à l'origine salée est devenue progressivement saumâtre par le lessivage graduel causé par l'écoulement de l'eau douce souterraine. Cette origine semble a priori plausible, mais ce sont les processus qui ont permis de préserver l'eau saumâtre en limitant son lessivage qui doivent être identifiés.

Les processus suivants auraient pu jouer un rôle dans la conservation de l'eau souterraine saumâtre en contribuant à limiter la recharge et l'écoulement de l'eau souterraine :

- la présence de formations aquifères rocheuses peu perméables;
- la position antérieure des chenaux du fleuve Saint-Laurent qui étaient plus à l'est;
- l'émergence de l'eau souterraine plus à l'est dans la rivière Yamaska;
- la couverture d'argile;
- la faible topographie.

Des travaux plus détaillés doivent être réalisés pour mieux définir les conditions et les mécanismes qui ont pu contribuer à préserver cette salinité. Ces travaux utiliseront des données géochimiques, notamment la datation de l'eau souterraine, ainsi que de la modélisation numérique.

3 Méthodologie

Les informations utilisées dans la présente étude proviennent entièrement de la base de données du projet de caractérisation régionale. Les puits résidentiels d'alimentation en eau de type tubulaire, tirant leur eau souterraine des aquifères rocheux, sont la source de données primaire. Les informations extraites des puits sont les suivantes:

- localisation géographique (coordonnées x, y);
- description sommaire du puits : année de construction, profondeur, niveau d'eau statique;
- stratigraphie (types de matériaux meubles ou rocheux rencontrés lors du forage);
- résultats analytiques d'intérêt sur l'eau souterraine: chlorures (Cl^-), bromures (Br^-), matières dissoutes totales (MDT) et conductivité électrique spécifique.

L'ensemble des données extraites a permis d'effectuer dans un premier temps une analyse quantitative de la salinité à l'aide des résultats analytiques disponibles. Cette première évaluation a ensuite été appuyée par une analyse plus qualitative basée sur l'utilisation régionale des eaux souterraines, particulièrement la répartition et la densité des puits résidentiels qui donnent une bonne indication de la potabilité de l'eau souterraine dans un secteur donné.

3.1 Données sources

La base de données du projet de caractérisation régionale de la Montérégie Est regroupe des informations hydrogéologiques provenant de sources diversifiées :

- **Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).** Le MDDEP possède une vaste base de données, soit le Système d'information hydrogéologique (SIH), contenant de l'information sur des puits résidentiels ou autres réalisés sur le territoire du Québec depuis 1967. Le MDDEP possède également la Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ, qui n'est plus active aujourd'hui) ainsi que des rapports ministériels d'intérêt tel que l'Étude hydrogéologique du bassin versant de la Richelieu (McCormack, 1981).
- **Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF).** Plusieurs rapports et cartes hydrogéologiques ministériels ont été produits entre 1969 et 1979 par la direction des eaux souterraines (Prévôt, 1969 et 1972; Paré, 1976 et 1978; Simard et Des Rosiers, 1979).
- **Municipalités.** Certaines municipalités ont accepté de collaborer au projet en fournissant des rapports d'expertises en hydrogéologie généralement réalisés par des firmes de consultants en hydrogéologie pour les municipalités. Les informations issues de ces rapports ont été compilées dans la base de données du projet de caractérisation régionale.
- **Union des Producteurs Agricoles du Québec (UPA).** Tout comme les municipalités, l'UPA possède quelques études pertinentes réalisées par des firmes de consultants en hydrogéologie dans le contexte d'une problématique agricole d'alimentation en eau (TechnoRem, 2008). Les informations issues de ces rapports ont aussi été compilées dans la base de données du projet de caractérisation régionale.
- **INRS-ETE et Commission géologique du Canada.** Les résultats analytiques issus des travaux de terrain du projet de caractérisation régionale réalisés à l'été et l'automne 2010 constituent les données utilisées les plus récentes. Pour l'ensemble de la zone à l'étude, près de 200 puits d'alimentation privés (généralement à usage résidentiel ou agricole) ont été échantillonnés ainsi qu'environ 30 puits d'observation aménagés dans le cadre du projet. Diverses expertises issues de thèses et travaux de recherche antérieurs ont également servi de source d'information (Cloutier et al., 2010; Blanchette et al., 2010).

Cette base de données sera remise au MDDEP en mars 2013, soit dès la fin du projet PACES de caractérisation régionale en Montérégie Est. Elle sera par la suite rendue publique par le MDDEP.

3.2 Tri et sélection des données

Une fois l'extraction des données d'intérêt complétée, une révision a dû être effectuée afin de supprimer les résultats indésirables :

- Suppression des résultats provenant de puits de surface (non au roc);
- Élimination des doublons (données présentes plus d'une fois pour un même puits);
- Pour les puits présentant plus d'un résultat analytique sur l'eau souterraine, seul le résultat le plus récent a été conservé;
- Les unités des différentes mesures analytiques ont été uniformisées, soit en mg/L et meq/L pour les unités de concentration et mS/cm pour les unités de conductivité électrique;
- Les résultats nuls (zéro) ont été supprimés, car ils peuvent désigner soit l'absence de résultat ou encore un résultat inférieur à la limite de détection. Cette ambiguïté peut créer une mauvaise interprétation des résultats.
- Les résultats inférieurs aux limites de détection analytiques ont été considérés comme étant égaux à la limite de détection de l'analyse.

3.3 Données quantitatives (résultats analytiques)

L'étendue de la zone d'eau saumâtre a pu être quantifiée grâce aux résultats analytiques sur l'eau souterraine, en termes de chlorures, bromures, matières dissoutes totales (MDT) et conductivité électrique. Le tableau 1 montre le nombre de données d'intérêt disponibles dans la base de données du projet (pour l'ensemble de la Montérégie Est) et ayant servi à réaliser la présente étude.

Tableau 1
Sources des données analytiques utilisées pour délimiter la zone d'eau saumâtre

Source des données :	Résultats analytiques disponibles			
	Cl ⁻	Br ⁻	MDT	Conductivité électrique
<i>SIH (MDDEP)</i>	959	5	217	0
<i>Rapports d'expertise¹</i>	237	54	0	209
<i>Projet de caractérisation régionale (travaux 2010)</i>	202	202	203	201
Nombre total de données :	1398	261	420	410

¹ Les rapports d'expertise englobent tous les rapports provenant du MDDEP, MRNF, des municipalités et de l'UPA, mais excluent les données du SIH.

3.4 Critères qualitatifs (répartition spatiale des puits)

En plus des résultats analytiques, la caractéristique la plus éloquente par rapport à la qualité de la ressource en eau souterraine est vraisemblablement son utilisation, telle que représentée par la répartition et la densité des puits présents sur le territoire.

La mise en carte des 27 228 puits répertoriés dans la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) pour le territoire de la Montérégie Est (figure 3) illustre assez bien l'étendue de la zone d'eau saumâtre par la faible densité des puits au nord-ouest de la zone d'étude. Les puits présents dans cette région datent tous des années '60 et '70.

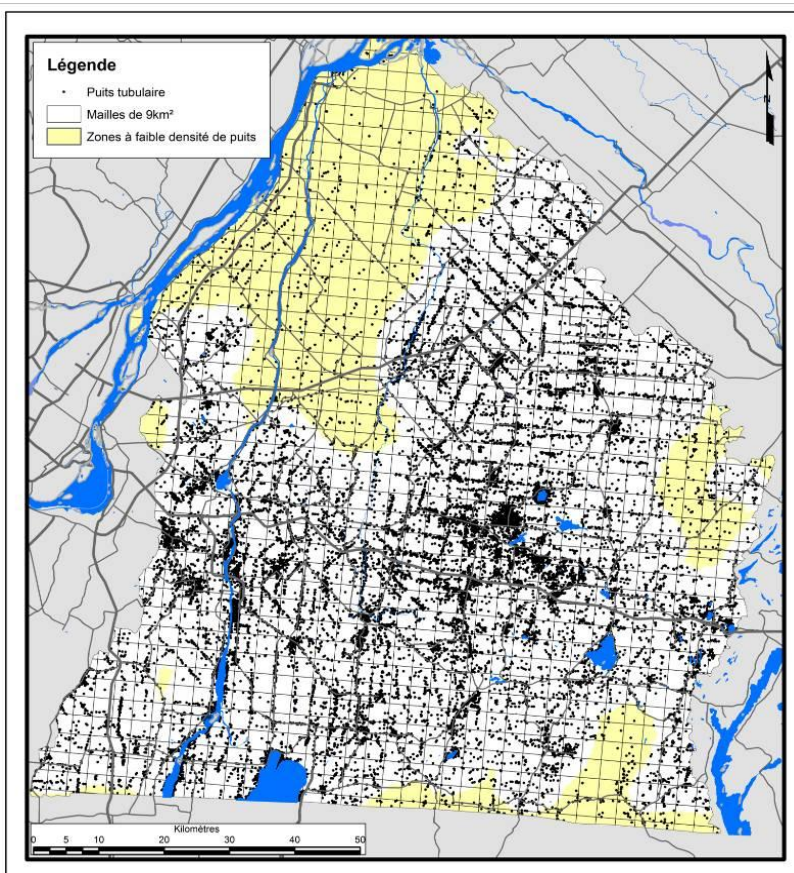


Figure 3: Répartition des 27 228 puits répertoriés dans le SIH

4 Traitement des résultats analytiques

Afin de mieux intégrer les résultats analytiques compilés et de vérifier l'équivalence entre les paramètres, trois différents graphiques ont été produits :

- Concentrations en ions bromures (meq/L) en fonction des concentrations en ions chlorures (meq/L) sur échelle logarithmique (figure 4) ;
- Concentrations en ions chlorures (mg/L) en fonction des matières dissoutes totales (MDT) (mg/L) sur échelle logarithmique (figure 5) ;
- Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en fonction des matières dissoutes totales (MDT) calculée (mg/L) sur échelle logarithmique (figure 6).

L'interprétation de ces graphiques a mené à la définition des critères d'eau « douce », « saumâtre » et « salée » ainsi que d'eau « douce à salinité significative ». Bien que ces critères soient représentés sur les figures 4 à 6, ils seront définis plus en détail ultérieurement au tableau 2.

4.1 Rapport Cl^-/Br^-

Tel que mentionné précédemment à la section 2.0, l'eau de la Mer de Champlain était composée à 34% d'une d'eau de mer provenant du golfe du Saint-Laurent diluée à 66% par de l'eau douce continentale provenant de la fonte des glaciers ainsi que des précipitations. Cette hypothèse, reprise par Cloutier et al. (2010), est basée sur les travaux de Hem (1985) qui documente la composition de l'eau de mer pure : 535,92 mmol/L d'ions chlorures pour 0,8385 mmol/L d'ions bromures. Ce rapport, appelé « ligne de dilution », est représenté par une droite sur le graphique logarithmique de la figure 4.

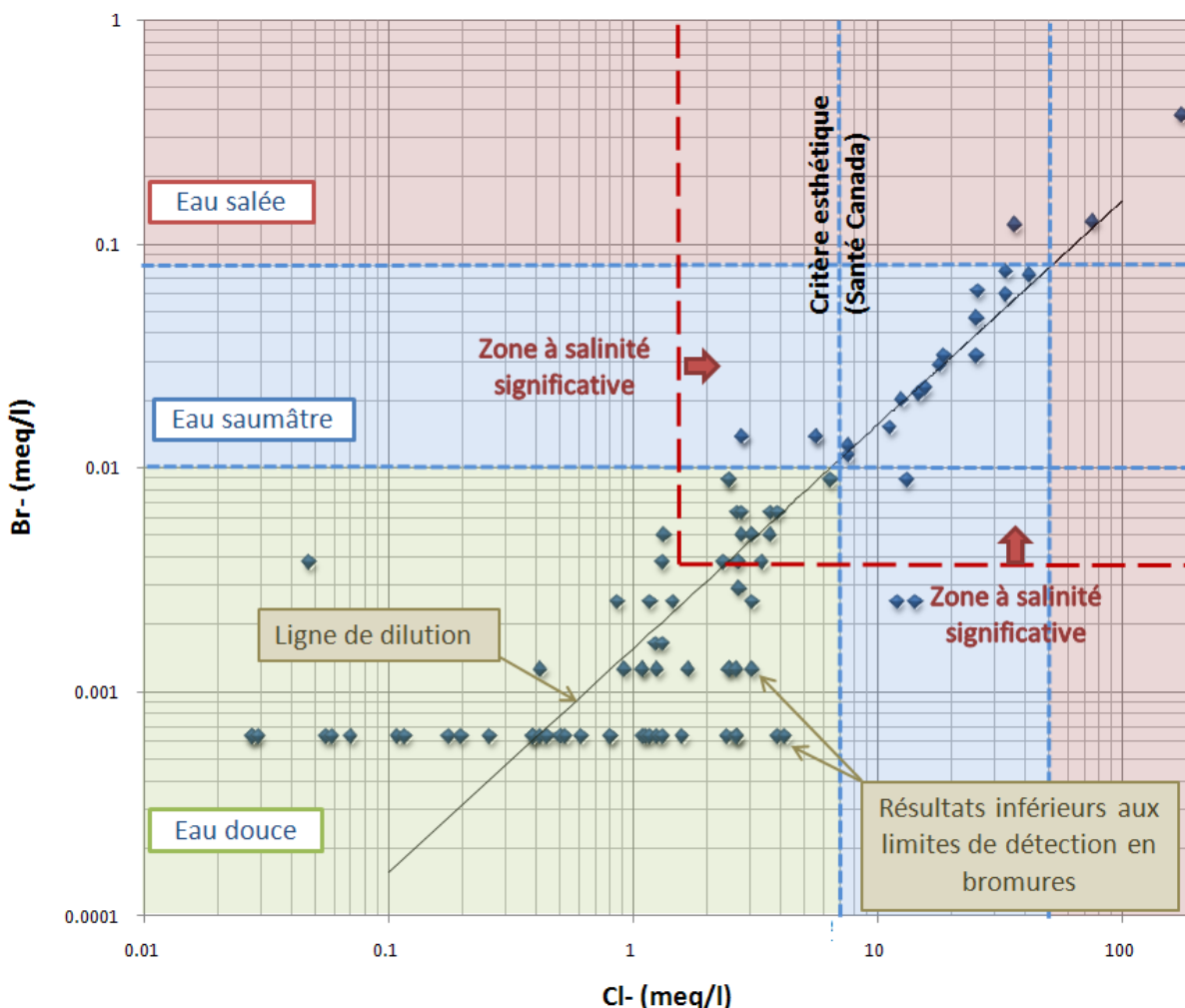


Figure 4: Concentrations des ions bromures (meq/L) en fonction des concentrations en ions chlorures (meq/L), sur échelle logarithmique

Il semble que la tendance générale des concentrations soit proche de la ligne de dilution. Ceci permet donc de supposer que les échantillons analysés sont majoritairement constitués d'eau de mer diluée, suivant ainsi la tendance générale du rapport Cl^-/Br^- documenté par Hem (1985). Il est à noter que l'alignement des points selon deux tendances horizontales distinctes au bas du graphique représente en fait des résultats sous les limites de détection en bromures. Tel que mentionné précédemment, la valeur de la limite de détection applicable a été attribuée à ces résultats lors du tri des données.

4.2 MDT et chlorures

Selon Freeze et Cherry (1979), l'eau douce est caractérisée par une concentration en MDT inférieure à 1000 mg/L. Toujours selon le même auteur, une eau est saumâtre entre 1000 et 10 000 mg/L et elle est salée lorsqu'elle en contient plus de 10 000 mg/L. Dans le cadre de la présente étude, le seuil entre l'eau saumâtre et l'eau salée est abaissé à 5 000 mg/L compte tenu qu'à une plus grande concentration en sels, il est peu envisageable d'utiliser cette eau pour fins de consommation. Ces seuils sont représentés sur le graphique de la figure 5 et ont été extrapolés pour les ions chlorures, selon la tendance générale des résultats.

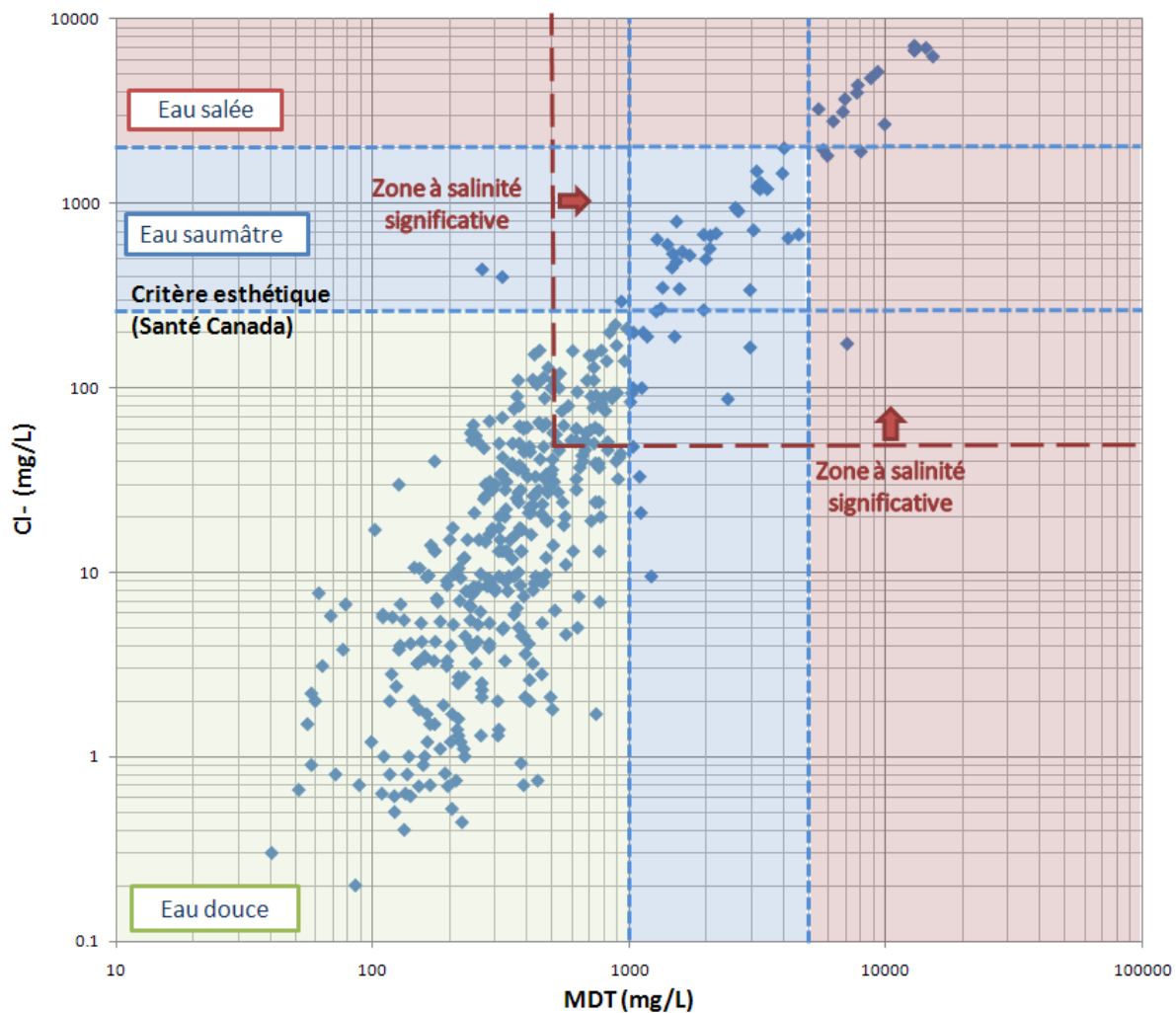


Figure 5: Concentrations en chlorures en fonction des concentrations en MDT, sur échelle logarithmique

Santé Canada (2010) recommande, comme objectif d'ordre esthétique, un maximum de 250 mg/L en chlorures pour l'eau potable. Cette valeur, illustrée à la figure 5, servira également de repère (voir tableau 2) pour la délimitation de la zone d'eau saumâtre.

4.3 MDT et conductivité électrique

La figure 6 présente le logarithme de la conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) en fonction du logarithme des valeurs de MDT (en mg/L).

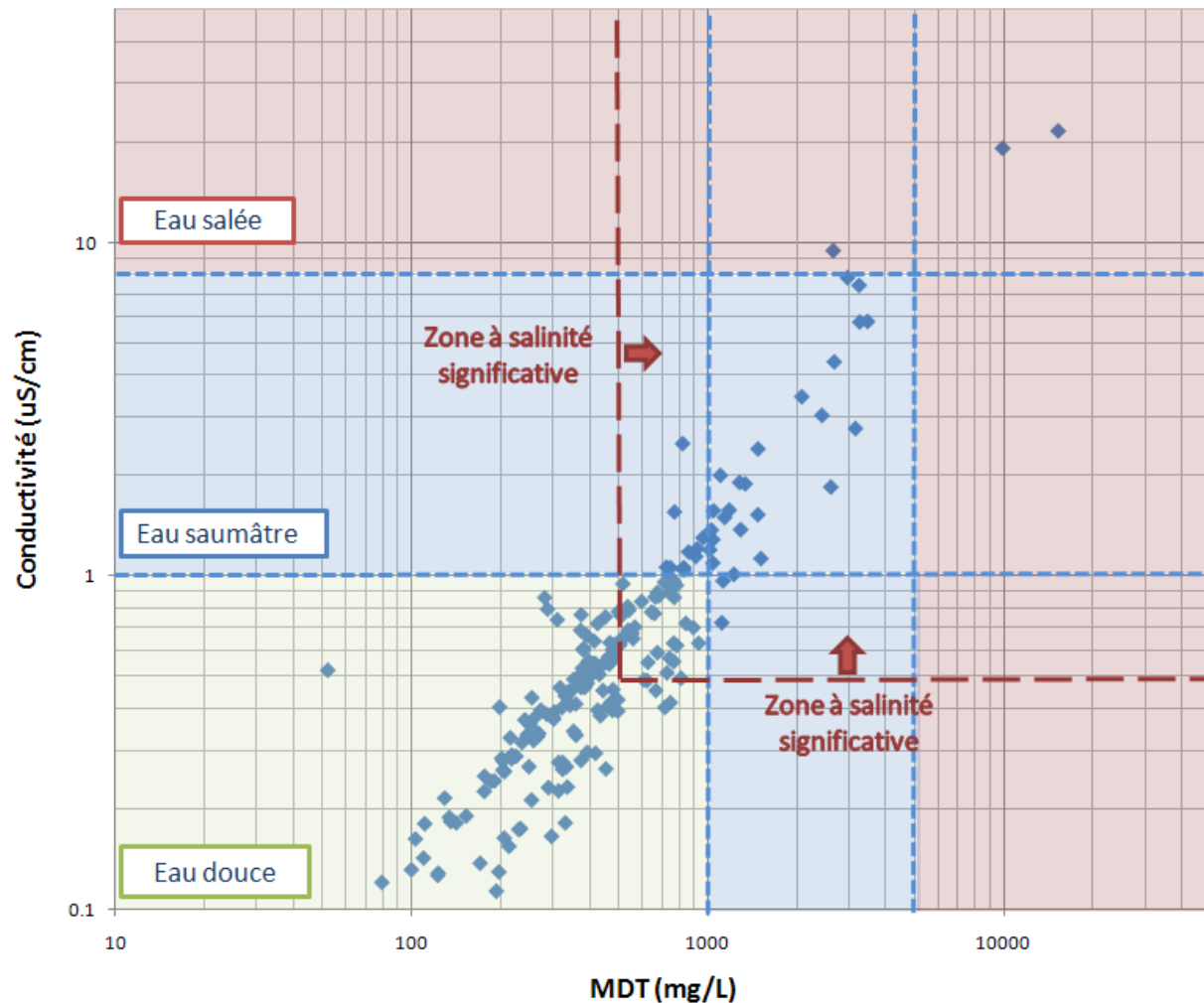


Figure 6: Conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) en fonction des concentrations en MDT (en mg/L), sur une échelle logarithmique

À l'aide de ce graphique, les valeurs de conductivité définissant les différentes classes de salinité d'eau ont été établies par rapport aux seuils de MTD définis précédemment.

4.4 Définition des critères de salinité

En vue de délimiter spatialement l'étendue des eaux saumâtres et salines, des critères de salinité ont été fixés, définissant quatre classes introduites précédemment (de l'eau la moins salée à la plus salée) :

1. Eau douce
2. Eau douce à salinité significative
3. Eau saumâtre
4. Eau salée

Ces critères, illustrés sur chacune des figures 4 à 6, sont inspirés de ceux proposés par Freeze et Cherry (1979) pour les MDT ainsi que par le critère esthétique de Santé Canada (2010) pour les chlorures. Les autres critères pour les bromures et la conductivité ont été extrapolés sur les figures 4 à 6 par symétrie, selon la tendance générale des résultats analytiques. Le tableau 2 résume les critères fixés.

Tableau 2

Définition des critères de salinité pour fins d'interprétation des résultats analytiques

Classes :	Paramètres analytiques			
	Cl ⁻ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)	MTD calculées (mg/L)	Conductivité (µS/cm)
1 <i>Eau douce</i>	< 250 ¹	< 1,0 ⁵	< 1000 ²	< 1,0 ⁶
2 <i>Eau douce à salinité significative</i>	50 ⁴ à 250 ¹	0,3 à 1,0 ⁵	500 ³ à 1000 ²	0,5 à 1,0 ⁶
3 <i>Eau saumâtre</i>	250 ¹ à 2000 ⁴	1,0 ⁵ à 7,0 ⁵	1000 ² à 5000 ³	1,0 à 8,0 ⁶
4 <i>Eau salée</i>	> 2000 ⁴	> 7,0 ⁵	> 5000 ³	> 8,0 ⁶

¹ Critère esthétique de Santé Canada pour l'eau potable, 2010.

² Seuil proposé par Freeze et Cherry (1979).

³ Valeurs définies arbitrairement pour le projet.

⁴ Valeurs extrapolées de la figure 5 à partir des critères de MDT.

⁵ Valeurs définies à partir de la figure 4 selon le rapport Cl⁻ / Br⁻ proposé par Hem (1985).

⁶ Valeurs extrapolées de la figure 6 à partir des critères de MDT.

Les résultats analytiques ont été cartographiés à partir des critères définis au tableau 2. Il a été déterminé que les eaux de classes 3 et 4 serviraient à définir la zone d'eau saumâtre à saline, puisque cette eau ne peut plus être considérée comme une source potentielle d'approvisionnement en eau potable. L'eau de classe 2 permettra de définir les zones de salinité secondaire, soit des zones d'eau douce à salinité significative, associées possiblement à d'anciennes zones salines ayant été partiellement lessivées avec le temps. En guise d'interprétation préliminaire, la figure 7 présente les concentrations des différents paramètres ainsi que leur distribution spatiale en fonction des classes définies au tableau 2.

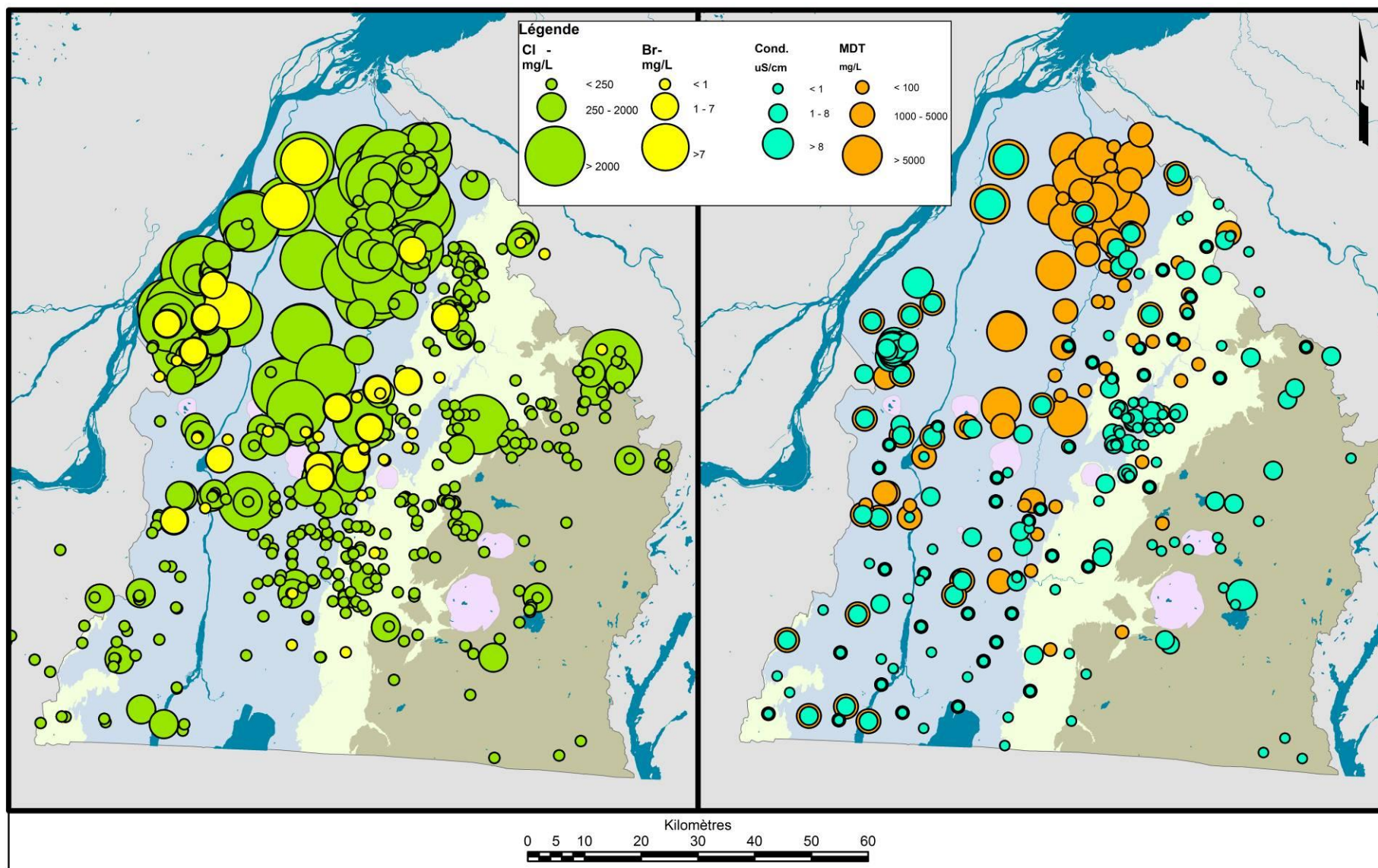


Figure 7: Représentation spatiale des données géochimiques pour les ions chlorures et bromures (en mg/L), à gauche, ainsi que pour les matières dissoutes totales (MDT, en mg/L) et la conductivité électrique spécifique (en mS/cm), à droite

5 Analyse spatiale de l'utilisation de l'eau souterraine

Afin d'appuyer l'interprétation hydrogéochimique de l'étendue des zones à plus forte concentration en sels (tableau 2), la répartition spatiale des 27 228 puits du SIH a été utilisée. La provenance de l'eau consommée par les municipalités de la région a également été considérée, à savoir si leur réseau d'aqueduc s'alimentait en eau de surface ou en eau souterraine.

5.1 Répartition spatiale des puits du SIH

Le territoire a tout d'abord été divisé en cellules carrées de 9 km² chacune (voir figure 3). Le nombre de puits présents dans chaque cellule de 3 km par 3 km a été attribué à la coordonnée géographique représentant le centre du carré. La carte de la figure 8 présente les isocontours de densité de puits sur le territoire qui ont ensuite été interpolés à l'aide du logiciel ArcGIS.

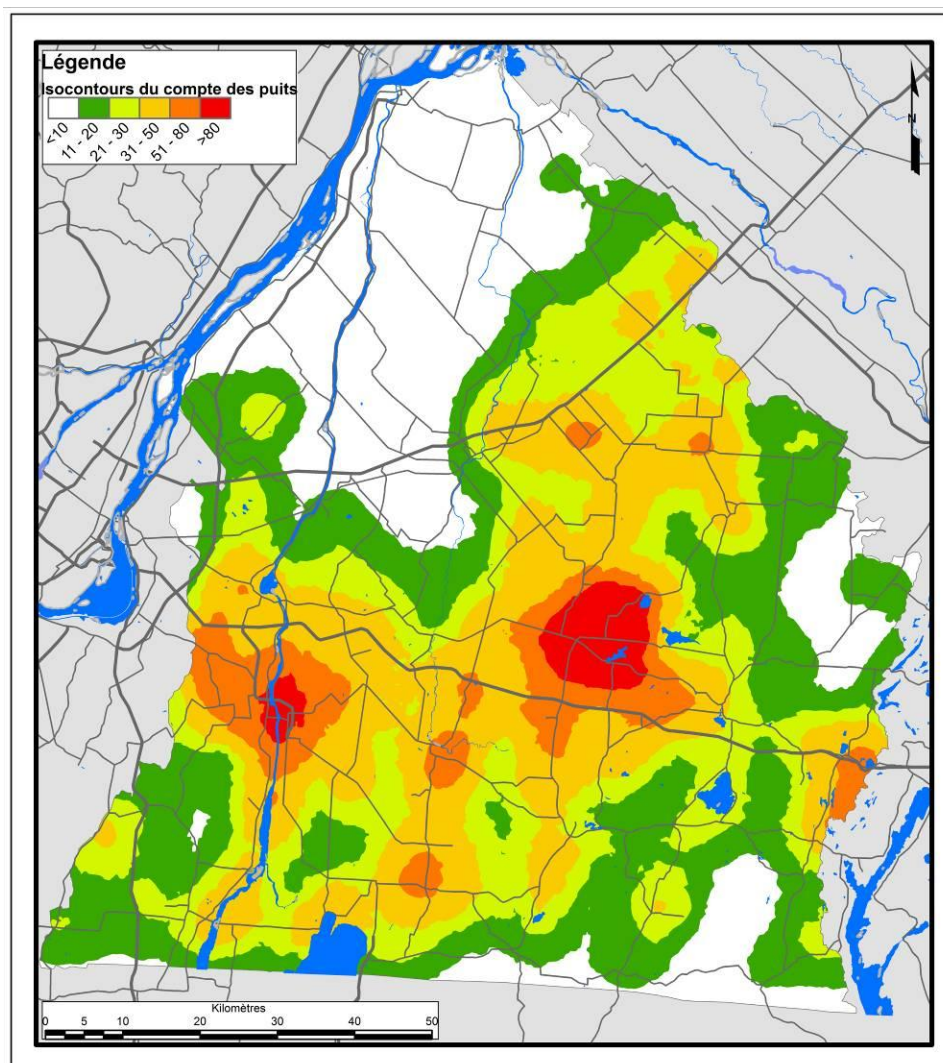


Figure 8: Interpolation de la densité des puits répertoriés sur le territoire de la Montérégie Est

Soulignons que les deux secteurs de plus forte densité de puits correspondent aux agglomérations des villes de Granby et de Saint-Jean-sur-Richelieu. À l'inverse, cette carte permet d'observer la faible densité de puits dans le secteur nord-ouest de la région, confirmant que l'eau souterraine n'y est que très peu utilisée comme source d'approvisionnement. Cette zone correspond approximativement à la zone d'eau saumâtre.

5.2 Sources d'approvisionnement des municipalités

La carte de la figure 9 est issue d'un travail conjoint entre l'INRS-ETE et l'Organisme de Bassin Versant (OBV) de la Yamaska. Il s'agit d'une compilation préliminaire réalisée suite à un sondage auprès des municipalités qui montre la provenance de l'eau consommée par les municipalités.

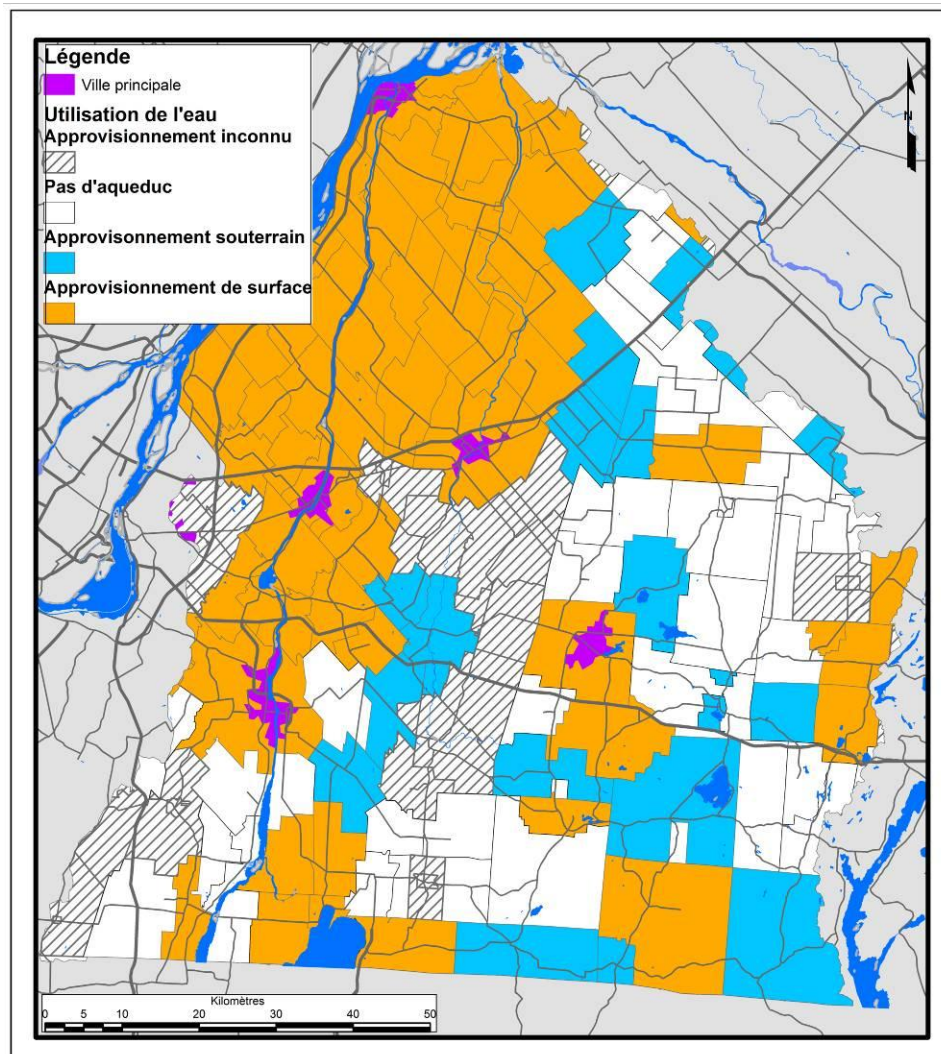


Figure 9: Type d'approvisionnement des réseaux d'aqueduc de la région

Tout comme la carte de densité des puits, on constate que le secteur compris entre les collines Montérégiennes et le fleuve Saint-Laurent n'utilise pas l'eau souterraine; il est plutôt desservi par de grands réseaux d'aqueducs alimentés par de l'eau de surface. Ces réseaux alimentent même les zones rurales et les agriculteurs.

6 Cartes d'interprétation

À partir des analyses qualitatives et quantitatives réalisées précédemment, il a été possible de proposer les limites de la zone d'eau saumâtre à saline, en fonction des critères fixés au tableau 2. Mentionnons que l'eau de la zone ainsi délimitée est généralement saumâtre (classe 3) et rarement salée (classe 4), c'est pourquoi celle-ci est désignée par l'appellation générale « zone d'eau saumâtre ». La figure 10 illustre la zone identifiée au nord de la région à l'étude à l'aide d'une ligne pointillée blanche. Cette zone s'étend sur près de 2 200 km², ce qui représente le quart de la superficie de la région d'étude (24,4%).

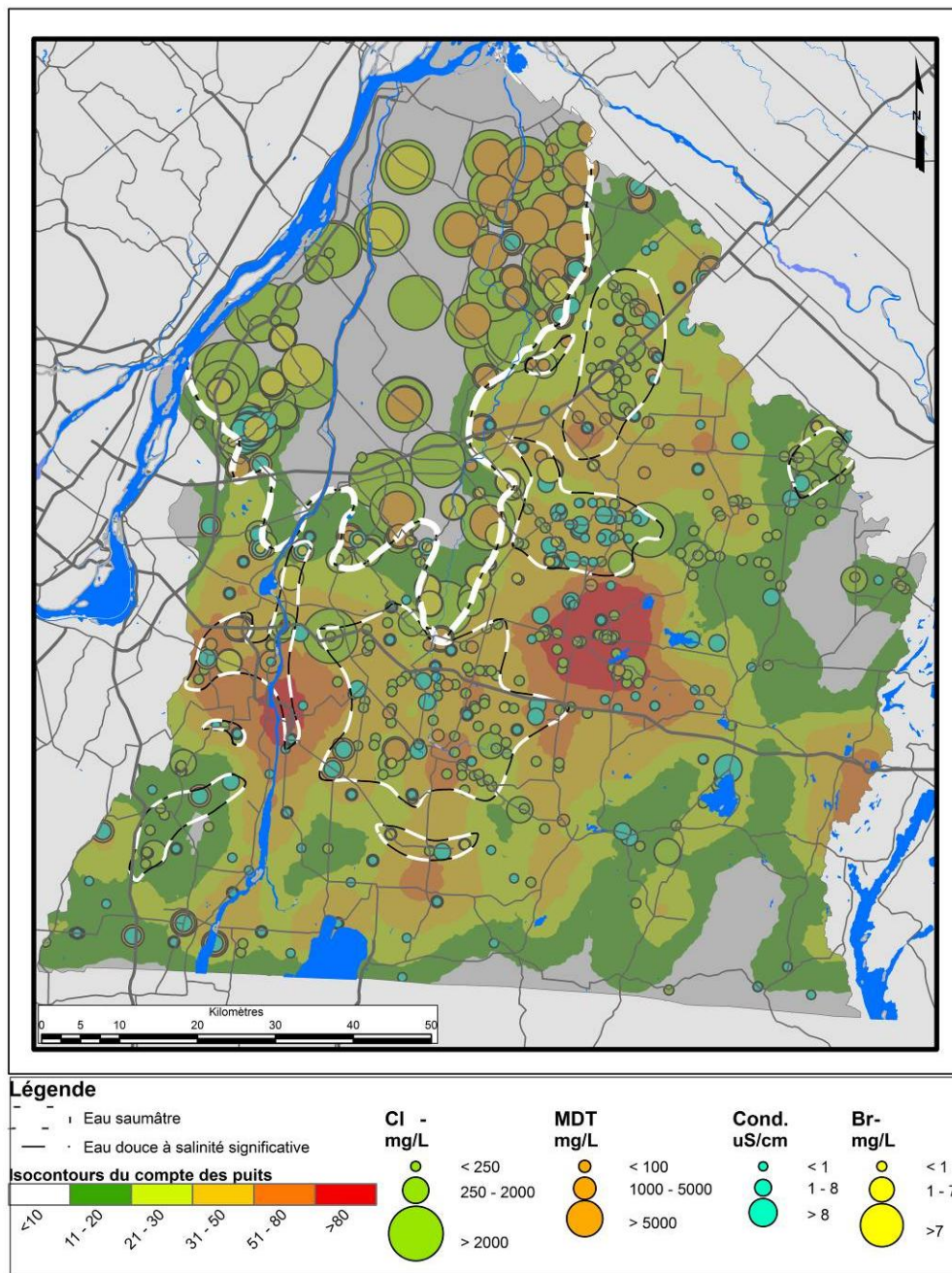


Figure 10: Délimitation de la zone d'eau saumâtre ainsi que des zones d'eau douce à salinité significative en fonction des résultats analytiques et de la répartition spatiale des puits répertoriés

La superposition des résultats analytiques et de la densité des puits, en plus de montrer clairement la zone d'eau saumâtre, a également permis d'identifier neuf zones secondaires composées d'eau douce présentant des salinités significatives, soit des valeurs analytiques situées dans la classe 2 du tableau 2. Ces valeurs se situent sous le seuil de potabilité (critère esthétique de 250 mg/L de chlorures ou 1000 mg/L de MDT). Il pourrait s'agir de vestiges d'eau salée ayant été partiellement lessivée, mais à un rythme plus important que la zone d'eau saumâtre.

Cinq cartes d'interprétation sont présentées en annexe, superposant aux différentes cartes thématiques suivantes les limites proposées de la zone d'eau saumâtre ainsi que des zones secondaires d'eau douce à salinité significative :

- **Épaisseurs d'argile** (figure A-1) : la zone d'eau souterraine saumâtre correspond assez bien aux endroits où l'épaisseur d'argile est plus importante (> 5 m), limitant ainsi la recharge des eaux souterraines dans les aquifères rocheux sous-jacents. Les zones d'eau douce avec salinité significative sont parfois reliées à des épaisseurs d'argile importantes, mais cela n'est pas toujours le cas.
- **Géologie** (figure A-2a et A-2b) : une grande partie de la zone d'eau souterraine saumâtre comprend l'unité géologique du Queenston, constituée principalement de shales rouges. Cette lithologie est présumée être relativement peu perméable. La présence de cette unité pourrait limiter l'écoulement de l'eau souterraine vers l'ouest (c'est-à-dire vers le fleuve).
- **Topographie 3D et physiographie** (figure A-3) : La zone d'eau souterraine saumâtre est située dans un secteur ayant une très faible topographie, ce qui favorise des écoulements lents. De plus, l'exutoire naturel présumé de l'écoulement de l'eau souterraine, le fleuve Saint-Laurent, se trouve à une grande distance des zones de recharge présumées du Piémont appalachien. Ces deux conditions sont favorables à un écoulement lent.
- **Piézométrie** (figure A-4) : La zone d'eau souterraine saumâtre correspond à un secteur où le gradient hydraulique est très faible. Pourtant, la bordure à l'est de la zone saline, qui se trouve dans le Piémont appalachien, a des gradients hydrauliques importants, ce qui indiquerait un écoulement rapide ainsi qu'une recharge importante. L'interception d'une partie de cet écoulement par la rivière Yamaska, où le roc affleure à plusieurs endroits, pourrait en partie expliquer la réduction du gradient hydraulique vers l'ouest. La carte piézométrique montre aussi que des hauts piézométriques sont reliés aux Montérégiennes, indiquant qu'elles sont des zones de recharge préférentielle de l'aquifère rocheux et fournissant une explication à l'absence d'eau saumâtre.
- **Topographie 2D et réseaux routiers** (figure A-5) : Cette carte est complémentaire aux autres et n'apporte pas de nouveaux éléments d'explication par rapport à la présence d'eau saumâtre en Montérégie Est.

7 Conclusions

Suite à l'analyse de l'ensemble des données disponibles, il a été possible de délimiter clairement une zone d'une superficie de 2 200 km² où l'eau souterraine est saumâtre avec une salinité d'au moins 250 mg/L en chlorures ou 1000 mg/L en matières dissoutes totales (MDT). La délimitation proposée pour cette zone a été définie à partir des données suivantes :

- Près de 1400 valeurs de concentrations dans l'eau souterraine en chlorures ainsi que quelques centaines d'autres valeurs en bromures, MDT ou conductivité électrique provenant principalement de rapports de consultants, de bases de données provinciales (BADGEQ et SIH) et d'une campagne d'échantillonnage réalisée en 2010.
- Le nombre de puits présents sur une surface donnée (cellules de 9 km² dans ce cas-ci), permettant de déduire la source d'approvisionnement en eau potable de la population (puits résidentiels ou aqueduc); ces données proviennent d'une base de données provinciale (SIH).
- Présence de réseaux d'aqueduc, déterminée à partir d'un sondage réalisé en 2010 par l'OBV Yamaska auprès des municipalités de la région.

La zone d'eau saumâtre présente donc la combinaison de caractéristiques suivantes : concentrations élevées en Cl⁻, Br⁻ et MDT et conductivité électrique élevée, très faible utilisation de l'eau souterraine par la population et présence de réseaux d'aqueducs très étendus dans ce secteur utilisant l'eau de surface. À l'aide des différentes cartes thématiques présentées en annexe, il est possible de remarquer différentes caractéristiques pour cette zone :

- épaisseurs d'argiles importantes au-dessus de l'aquifère rocheux limitant la recharge;
- topographie plane;
- faible gradient hydraulique horizontal limitant l'écoulement de l'eau souterraine;
- roc de nature présumée peu perméable.

Ces caractéristiques viennent appuyer l'hypothèse que l'eau saumâtre ait été laissée par la Mer de Champlain et que, par la suite, cette eau n'aurait été que très partiellement lessivée par les eaux douces rechargeant les aquifères et y circulant en provenance de l'est/sud-est, comparativement aux eaux à l'extérieur de cette zone. Le faible gradient hydraulique, la faible perméabilité du roc et la couverture imperméable d'argile ont vraisemblablement contribué à la conservation de l'eau saumâtre en limitant sa dilution.

Compte tenu des fortes concentrations en chlorures, soit au-delà de la concentration maximale d'ordre esthétique recommandée par Santé Canada (2010), l'eau souterraine située dans la zone principale de 2 200 km² identifiée ne représente pas une source potentielle d'alimentation en eau potable. Cette eau souterraine ne constitue donc pas une ressource dont la dégradation ou même la perte serait très préoccupante. Cette condition doit être prise en considération lors de l'évaluation de l'impact potentiel des activités anthropiques sur les eaux souterraines, notamment l'exploration et l'exploitation des gaz de shale.

Références

Benoit, N., Blanchette, D., Nastev, M., Cloutier, V., Parent, M., Marcotte, D., Brun Kone, M., Molson, J.W., 2011. Groundwater Geochemistry of the Lower Chaudière River Watershed, Québec, Canada. GeoHydro2011, Joint IAH-CNC, CANQUA and AHQ conference, Quebec City, Canada, August 28-31, 2011, Paper DOC-2209, 8 p.

Blanchette, D., 2006. Caractérisation géochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec, Canada. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès science, INRS-ETE.

Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Cloutier, V., 2010. Groundwater quality, geochemical processes and groundwater evolution in the Chateauguay River watershed, Quebec, Canada. Canadian Water Resources Journal, 35(4), 503-526, Special Issue on the Hydrogeology of the Châteauguay River Watershed.

Cloutier, V., 2004. Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires paléozoïques des Basses-terres du Saint-Laurent, Québec, Canada. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor en Sciences de la Terre, INRS-ETE.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Therrien, R., 2010. Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. Environmental Earth Sciences, 59 (5), 977-994.

Bourque, P.-A., 2004. Planète Terre. Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval. http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html.

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

Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, Third Edition.

Ministère de l'Environnement du Québec / McCormack, R., 1981. Étude hydrogéologique du bassin versant de la Richelieu (Programme de connaissances intégrées). S. d. e. s. Direction générale des inventaires et de la recherche. Québec, Gouvernement du Québec: 219 p.

Ministère des Richesses Naturelles / Prévot, J.-M., 1969. Carte hydrogéologique, Comtés de St-Hyacinthe, Rouville et Iberville. Service de l'hydrogéologie.

Ministère des Richesses Naturelles / Prévot, J.-M., 1972. Carte hydrogéologique des Basses-terres du Saint-Laurent. Service de l'hydrogéologie.

Ministère des Richesses Naturelles / Paré, D., 1976. Carte hydrogéologique du bassin de la rivière Yamaska (géochimie). Service des eaux souterraines.

Ministère des Richesses Naturelles / Paré, D., 1978. Étude hydrogéologique du bassin versant de la Yamaska. Service des eaux souterraines: 63 p.

Ministère des Richesses Naturelles / Simard, G., Des Rosiers, R., 1979. Qualité des eaux souterraines du Québec. Service des eaux souterraines: 171 p.

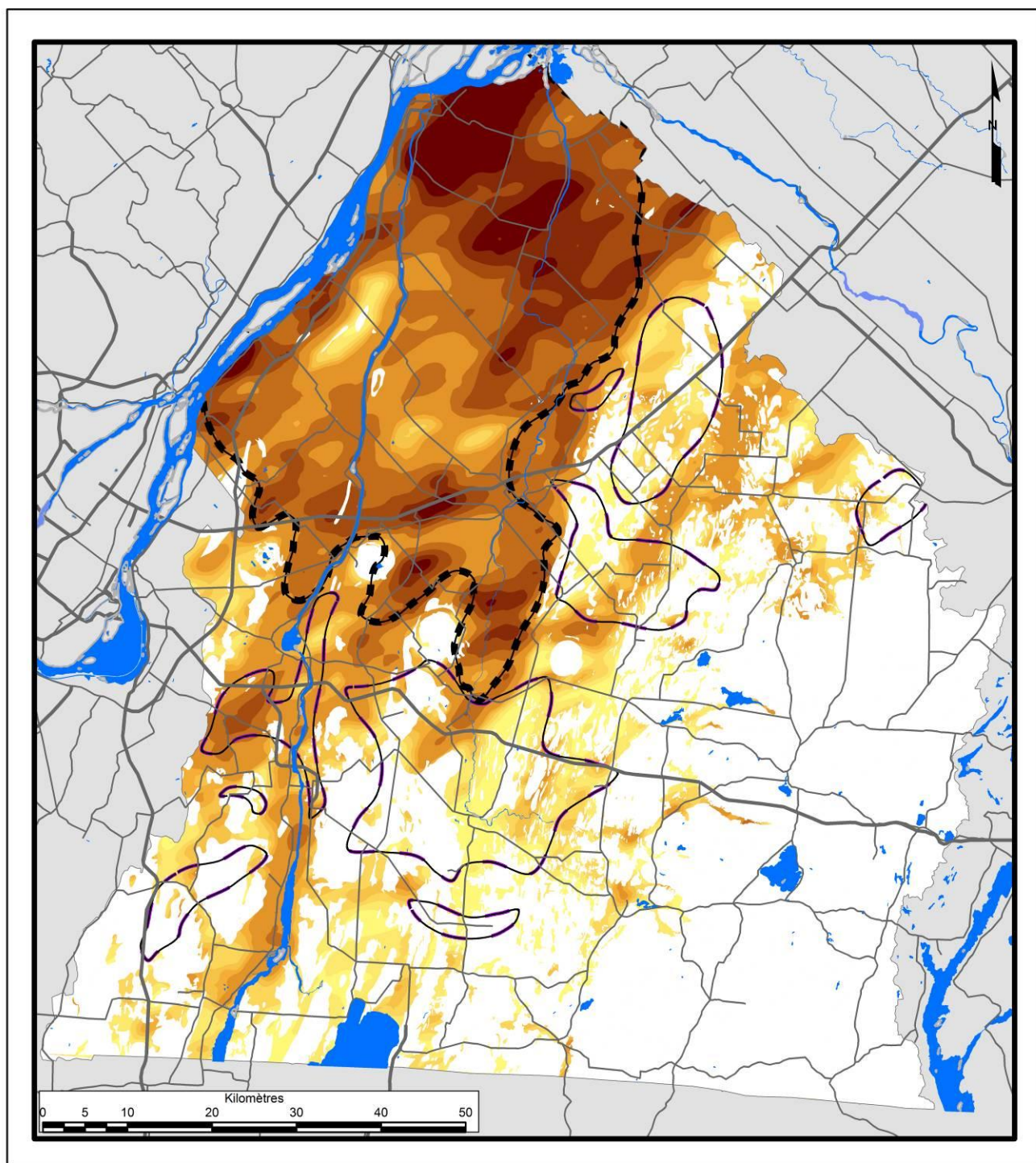
Occhietti, S., Richard, J.H., 2003. Effet réservoir sur les âges ^{14}C de la Mer de Champlain à la transition Pléistocène-Holocène: révision de la chronologie de la déglaciation au Québec méridional. Géographie physique et Quaternaire, vol. 57, n^{os} 2-3, p. 115-138.

Santé Canada, Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement, 2010. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada, http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/2010-sum_guide-res_recom/index-fra.php.

TechnoRem, 2008. Étude hydrogéologique régionale dans la zone de production maraîchère des MRC Les Maskoutains, Rouville et Brome-Missisquoi - Montérégie Est. Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ): 339 p.

Annexe

Cartes d'interprétation



Légende



Eau saumâtre



Eau douce à salinité significative

Épaisseur d'argile (m)

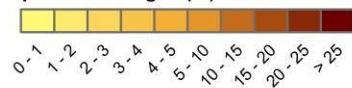
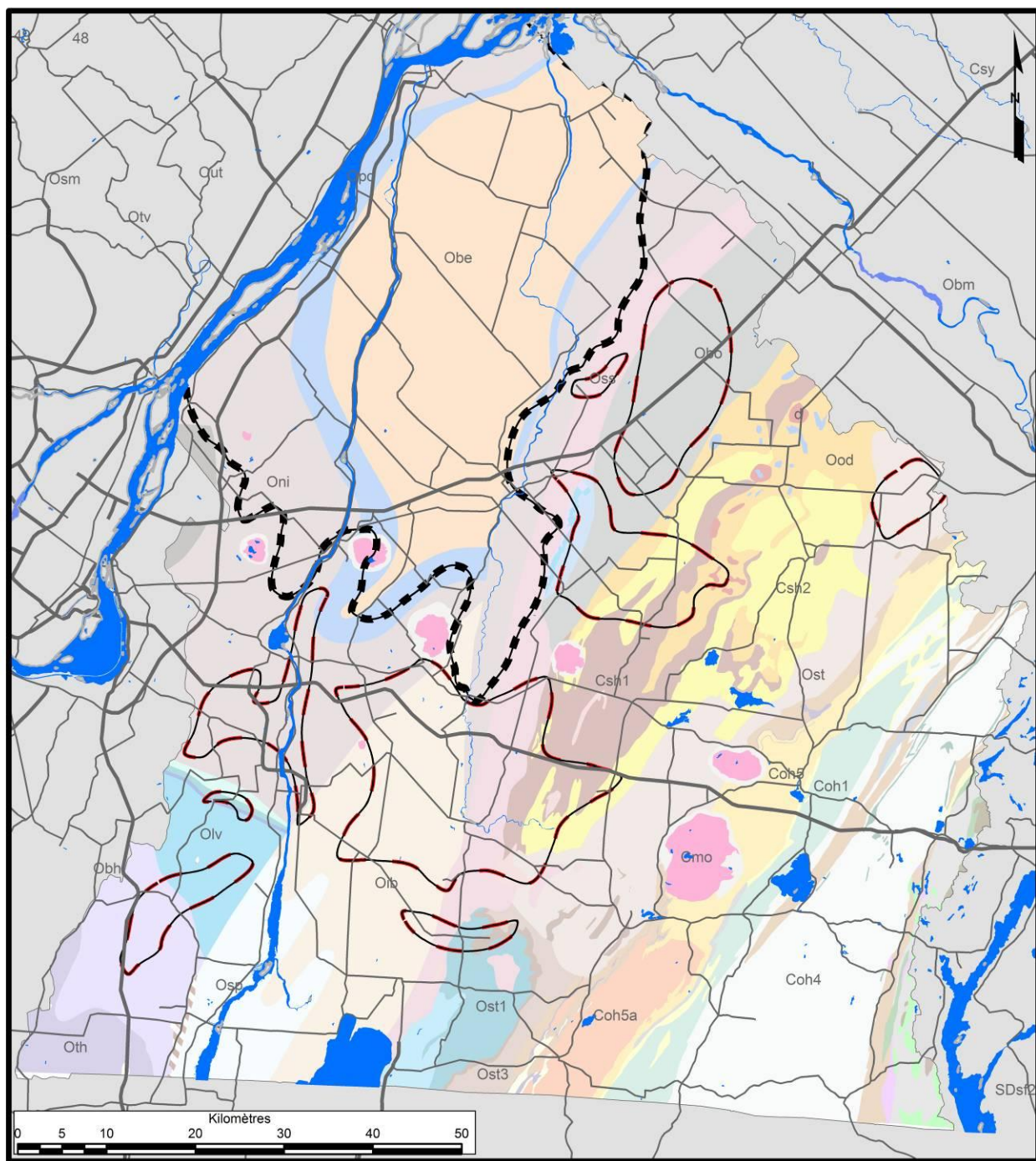


Figure A-1 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en violet) avec comme fond la carte de l'épaisseur de la couche d'argile



Légende



-  Eau saumâtre
-  Eau douce à salinité significative

Figure A-2a : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en violet) avec comme fond la carte géologique des unités rocheuses

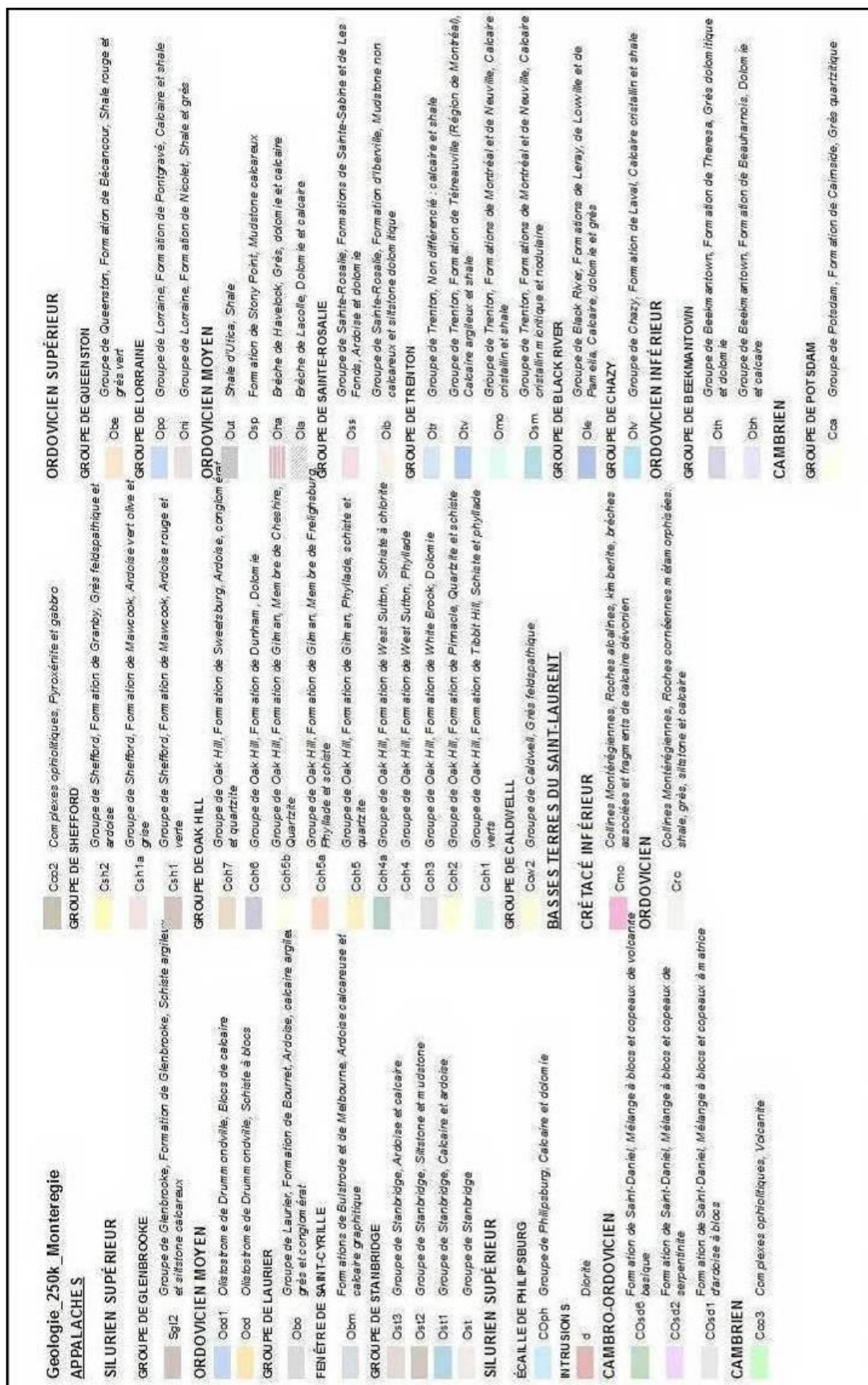
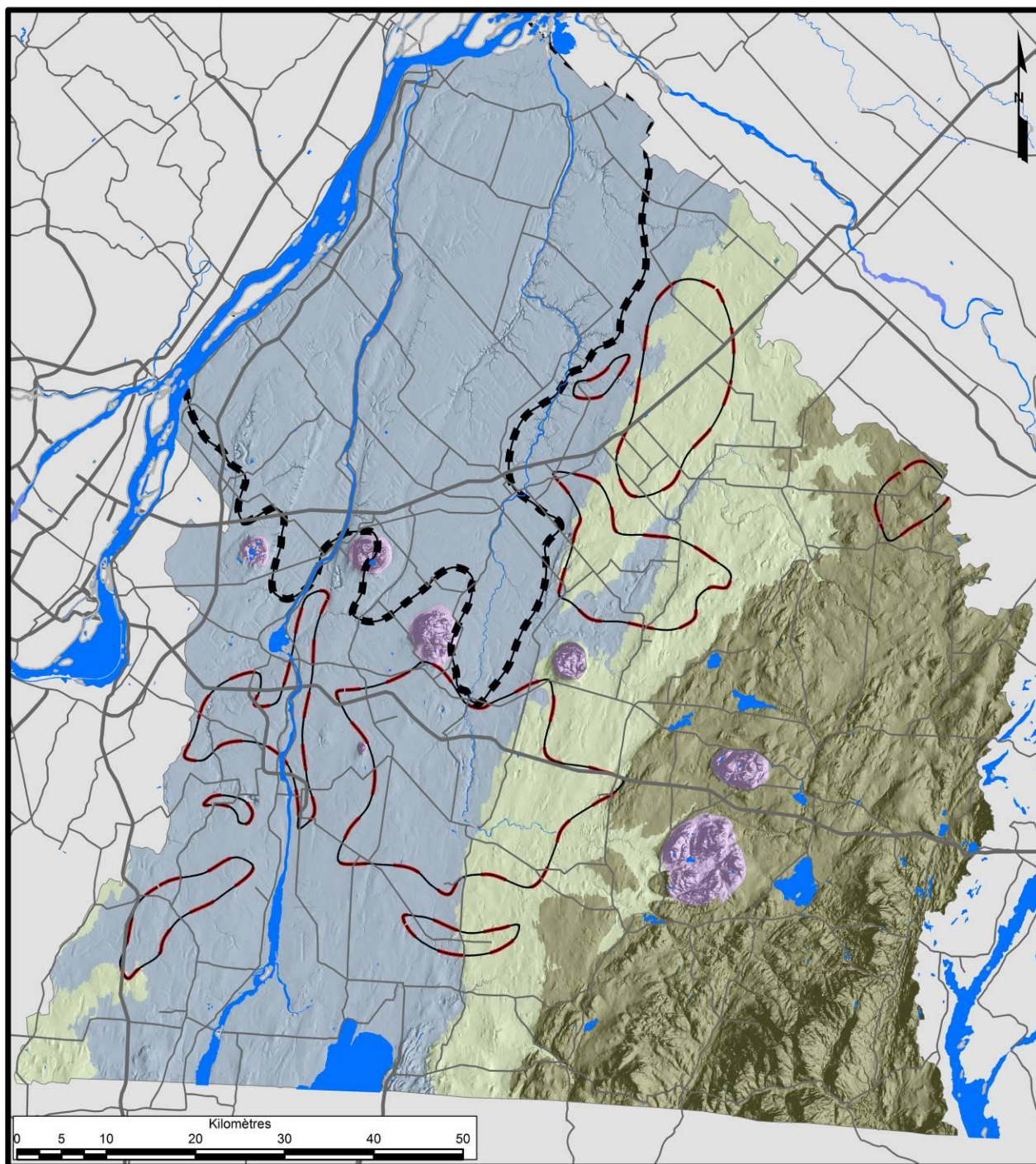


Figure A-2b : Légende de la carte géologique des unités rocheuses présentée à la figure A-2a



Légende







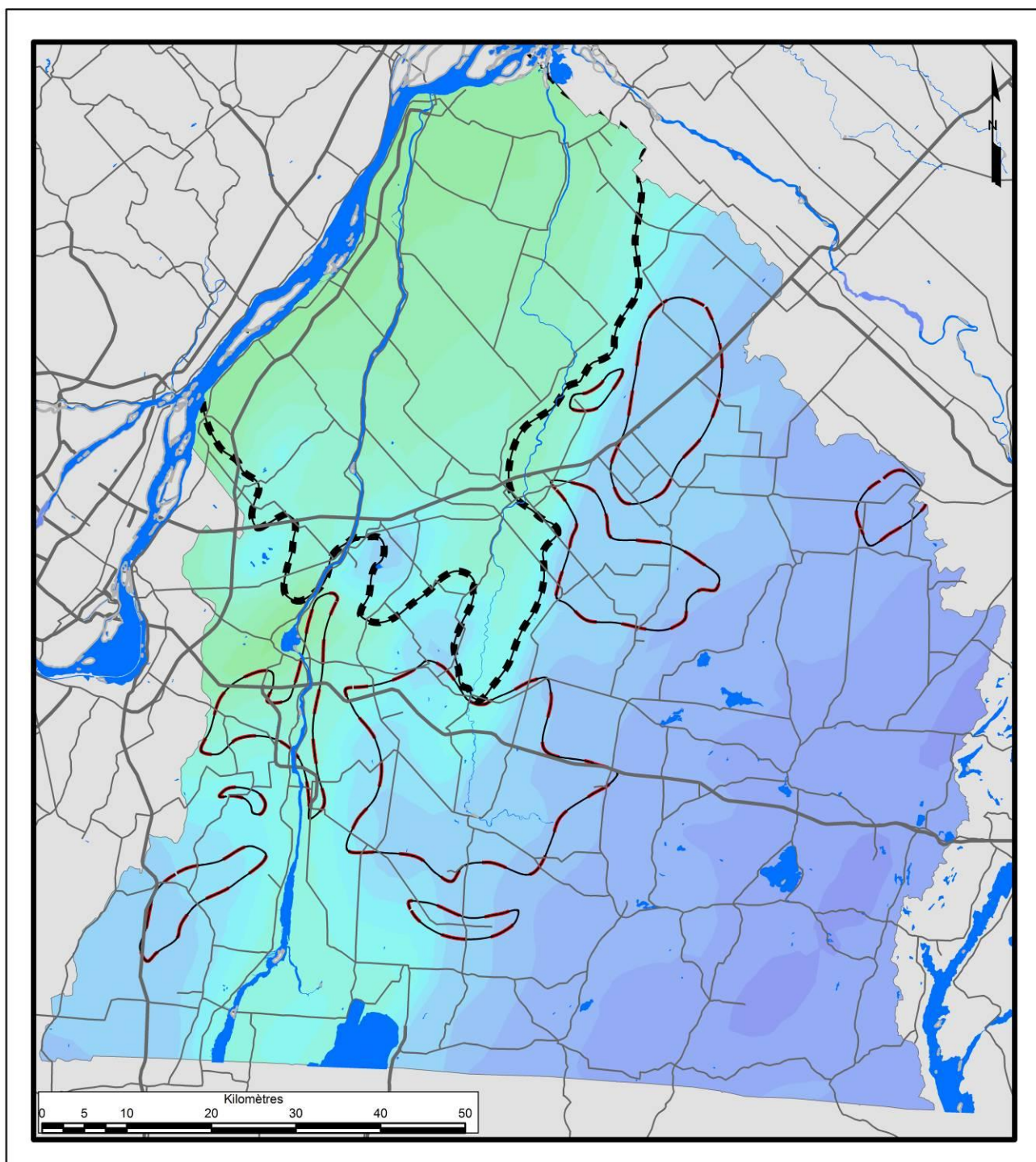
 Eau saumâtre	Région physiographique	
 Eau douce à salinité significative	 Collines Montérégiennes	 Appalaches
	 Basses-Terres du Saint-Laurent	 Piémont Appalachien

Figure A-3 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en blanc et noir) avec comme fond la carte topographique 3D illustrant également les contextes hydrogéologiques



Légende



Eau saumâtre



Eau douce à salinité significative

Élévation piézométrique (m)

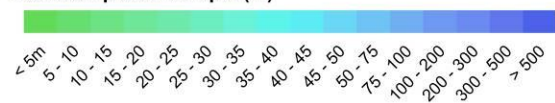
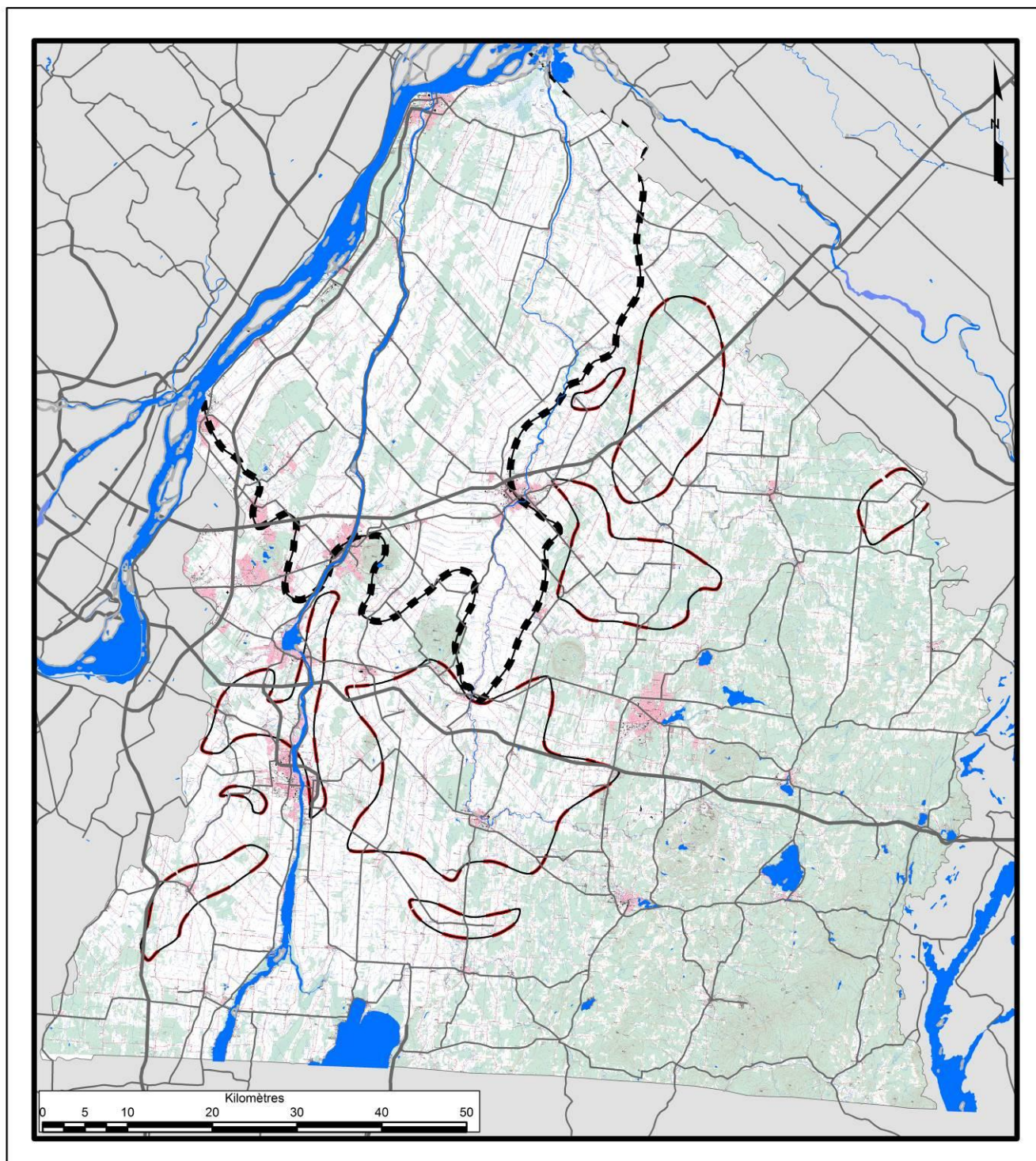


Figure A-4 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en noir) avec comme fond la carte piézométrique réalisée à partir de l'interpolation de 26 670 mesures piézométriques



Légende



-  Eau saumâtre
-  Eau douce à salinité significative

Figure A-5 : Zone d'eau saumâtre (délimitée par le pointillé rouge) et zones secondaires d'eau douce à salinité significative (délimitées en noir) avec comme fond la carte routière et topographique