Hydrogéochimie du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec

Nicolas Benoit
Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Québec
Miroslav Nastev
Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Québec
Daniel Blanchette
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec
Nadine Roy
Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs Québec, Québec

ABSTRACT
A hydrogeochemical study has been conducted over the central and downstream part of the Chaudière River watershed. In summer 2007, 155 water samples were taken from bedrocks wells, surface wells and springs. The principal objective was to study the natural groundwater quality. The samples were analyzed for major and minor ions, and trace elements. Despite some analytical results exceeding potable water standards and recommendations, groundwater is generally of good quality with respect to the parameters analyzed. The regional distribution of groundwater types and natural quality seem to be linked to the relative location of the sampled well as a function of the groundwater flow direction and to the hydrogeological setting.

RÉSUMÉ
Une étude hydrogéochimique a été menée sur la portion centrale et avale du bassin versant de la rivière Chaudière. À l'été 2007, 155 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés à partir de puits localisés dans le roc, dans les formations meubles, et de sources d'eau souterraine. L'objectif principal de cette étude était de caractériser la géochimie naturelle de l'eau souterraine. Les échantillons ont été analysés pour les éléments majeurs, mineurs et traces. Malgré quelques résultats d'analyses excédants les normes et recommandations en vigueur, l'eau souterraine est généralement de bonne qualité pour les paramètres analysés. La distribution régionale des types d'eau et la qualité naturelle semblent être reliées à la position relative du puits échantillonné par rapport à la direction d'écoulement de l'eau souterraine et aux contextes hydrogéologiques.

1 INTRODUCTION

Cette étude hydrogéochimique fait partie de la caractérisation hydrogéologique du bassin versant de la rivière Chaudière par la Commission géologique du Canada et en collaboration avec le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP). La caractérisation chimique des eaux souterraine fait suite à la cartographie hydrogéologique du bassin de la rivière Chaudière (COBARIC et UPA, 2008 ; Benoit et al., 2008).

Le bassin de la rivière Chaudière est situé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, au sud de la ville de Québec (Figure 1). Sa topographie varie de 3 à 1185 m au-dessus du niveau moyen des mers (nmm). Son réservoir principal, le lac Mégantic, est situé au sud à 391 nmm et son exutoire est le fleuve Saint-Laurent (3 nmm) au nord. La présente étude couvre la Basse-Chaudière (partie aval) et la Moyenne-Chaudière (partie centrale), soit environ 54% (3615 km^2) de la superficie totale du bassin versant. Ces parties du bassin sont principalement à vocation agricole.

Les données utilisées proviennent du Projet eaux souterraines de la Chaudière (COBARIC et UPA, 2008), réalisé grâce à une contribution financière du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ), via le Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ), une initiative fédérale-provinciale d'Agriculture Agroalimentaire Canada (AAC) et du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ).

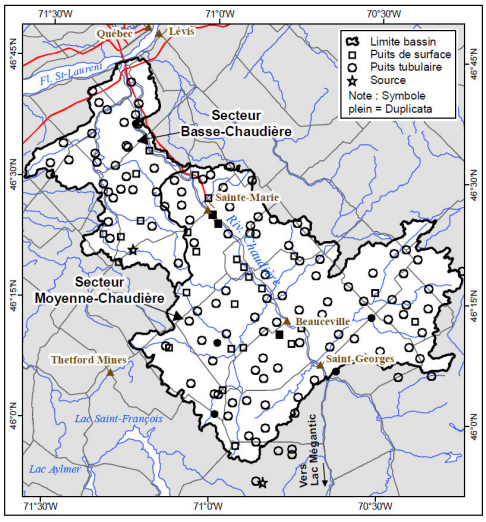

Figure 1. Secteur à l'étude et puits échantillonnés

L'objectif global de cette étude consiste à caractériser l'eau souterraine du bassin de la rivière Chaudière, soit à évaluer sa qualité naturelle sur l'ensemble du territoire étudié. Les objectifs spécifiques consistent à définir les types d'eau, la qualité relative de l'eau par rapport aux normes d'eau potable en vigueur et à l'hydrostratigraphie.

2 MÉTHODOLOGIE

Cette étude s'inspire des travaux de Blanchette *et al*. (2005) réalisés dans le bassin de la rivière Châteauguay. Au cours de l'été 2007, 155 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans 123 puits tubulaires (résidentielles et municipaux), 30 puits de surface et 2 sources (COBARIC, 2007), ce qui représente un échantillon par 36 km^2 (Figure 1). Huit (8) échantillons ont été prélevés en duplicatas pour le contrôle de la qualité des analyses de laboratoire. Prendre note que les résultats d'analyse des échantillons prélevés à l'été 2007 sont valides pour le moment de l'échantillonnage et qu'ils peuvent varier dans le temps.

Une attention particulière a été portée à la sélection des puits de façon à obtenir une bonne répartition des puits profonds et des puits de surface. Les échantillons étaient recueillis, en amont de tout système de traitement, et certains paramètres étaient mesurés sur le site au moment de l'échantillonnage (température, pH, conductivité électrique spécifique, oxygène dissous et potentiel d'oxydoréduction). Les échantillons recueillis étaient par la suite envoyés au laboratoire du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) du MDDEP afin de déterminer les concentrations de 50 paramètres pouvant se retrouver dans l'eau souterraine. Les échantillons ont été analysés pour les éléments majeurs, mineurs et traces.

La qualité des analyses chimiques a été vérifiée par le calcul de l'électroneutralité dont la limite a été fixée à ± 10%. Les concentrations des éléments majeurs (cations : Ca, Mg, Na, K; anions : HCO_3+CO_3, Cl, SO_4) ont servi à déterminer les types d'eau et à produire des diagrammes de Piper. La définition des types d'eau est basée sur l'approche de Cloutier (2004). Les concentrations des ions HCO_3 et CO_3 ont été déterminées selon la méthode présentée par Kenneth (2004) qui nécessite les mesures de pH prises au moment de l'échantillonnage.

Les résultats d'analyses chimiques ont été comparés aux normes du Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) du MDDEP (MDDEP, 2009). Les recommandations de Santé Canada (objectifs esthétiques et concentrations maximales acceptables) pour l'eau potable (CCME, 2008) ont été utilisées lorsqu'aucune norme n'était rapportée par le MDDEP. La dureté des eaux souterraines et les concentrations des matières dissoutes totales (MDT), paramètres généralement utilisés pour évaluer la qualité de l'eau, ont été calculées respectivement à l'aide des concentrations de Ca et Mg converties en mg $CaCO_3$/L (dureté) et de la somme des concentrations des éléments majeurs plus, les concentrations du Si converties en SiO_2 (MDT; Houslow, 1995).

3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La description de la géologie du socle rocheux du bassin de la rivière Chaudière correspond à la synthèse simplifiée des travaux de Castonguay (2008), Castonguay et al. (2002 et 2000), du MRN (2002) et de St-Julien et Slivitzky (1985).

L'ensemble du bassin fait partie de la province géologique des Appalaches. Le socle rocheux, d'âge Cambrien à Dévonien inférieur, est principalement constitué de roches sédimentaires et volcaniques déformées et faiblement métamorphisées. La nature des formations rocheuses, généralement à grains fins, fait en sorte que la porosité primaire de celles-ci est négligeable; c'est la densité, l'aperture et le degré d'interconnexion des fractures (porosité secondaire) qui contrôlent la perméabilité du socle rocheux. Pour le bassin de la Chaudière, ces fractures présentent un potentiel hydrogéologique relativement faible puisqu'elles sont principalement issues de mouvements de compression.

La géologie complexe du secteur à l'étude a été simplifiée en 5 zones tectonostratigraphiques (figure 2). Du nord-ouest au sud-est, on retrouve : A) Zone de Humber externe située entre le fleuve Saint-Laurent et la faille Bennett (près de Sainte-Marie); roches d'assemblages sédimentaires composés de schistes argileux ou ardoisiers, des grès et de lits de conglomérat et de calcaire argileux; roches faiblement à modérément déformées. B) Zone de Humber interne qui s'étend jusqu'à la faille Saint-Joseph (près de la ville du même nom); roches formées de schiste et de quartzite schisteux fortement déformées et recristallisées. C) Zone de Humber externe délimitée par la ligne Baie Verte-Brompton (secteur Beauceville); grès quartzitique et shales ardoisiers peu métamorphisés, grès et schistes ardoisiers (sud-est de Saint-Joseph). D) Zone de Dunnage qui s'étend jusqu'à la faille de La Guadeloupe comprenant une zone de failles importantes, des copeaux de serpentinite, des roches intrusives et sédimentaires métamorphisées. Ces unités sont séparées des roches sédimentaires; dans les régions de Beauceville et de Saint-Éphrem-de-Beauce dont des schistes argileux, unités de brèches, grès, schistes ardoisiers et tufs. Au sud-ouest de Saint-Joseph se trouve des roches magmatiques discontinues fortement altérées constituées de serpentinite, de stéatite, de schiste à talc et d'amphibolite. E) Ceinture de Gaspé dans la région de Saint-Georges composée de grès, siltstones, schistes ardoisiers interlités et quelques lits conglomératiques.

La géologie des formations superficielles (Figure 3) est issue de Caron et al. (2007). Les formations meubles du bassin de la Chaudière sont composés majoritairement de sédiments glaciaires (till T et till remanié Tr), de sédiments marins littoraux, prélittoraux et d'exondation (Mb), de formations de couverture mince (R) et de sédiments organiques (O). On retrouve de manière moins étendue des sédiments alluviaux (A), fluvioglaciaires (G), glaciolacustres (L), marins d'eau profonde (Ma) et éoliens (E).

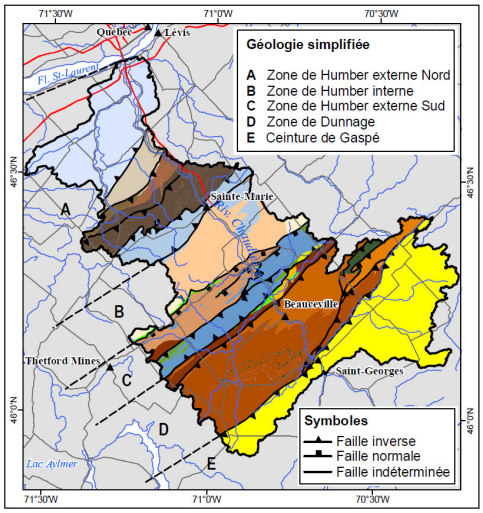

Figure 2. Carte géologique illustrant les principales lithologies (modifiée de COBARIC et UPA, 2008)

C'est donc la nature des formations sus-jacentes et leur épaisseur qui contrôlent, en majeure partie, le niveau de confinement des aquifères. Cette définition du confinement reflète également la capacité d'infiltration verticale de l'eau à partir de la surface.

Les horizons perméables des formations meubles sont considérées comme faisant partie intégrante de l'aquifère régional lorsque leur épaisseur, basée sur le modèle quaternaire 3D, est supérieure à 3 m. Une partie de ces formations est considérée en lien hydraulique avec l'aquifère du roc puisqu'elle repose sur des formations peu perméables de faible épaisseur (till < 5 m ou argile < 2 m). Soulignons que le till, omniprésent dans la région, est d'épaisseur variable et constitue une unité semi-confinante. Il limite partiellement l'interaction entre les deux unités aquifères principales. Ce till permet toutefois une certaine recharge au roc et des résurgences vers les eaux de surface situées dans l'axe des vallées. Il est à noter que l'écoulement latéral, dans le till, est très limité par rapport à celui observé dans l'aquifère régional rocheux.

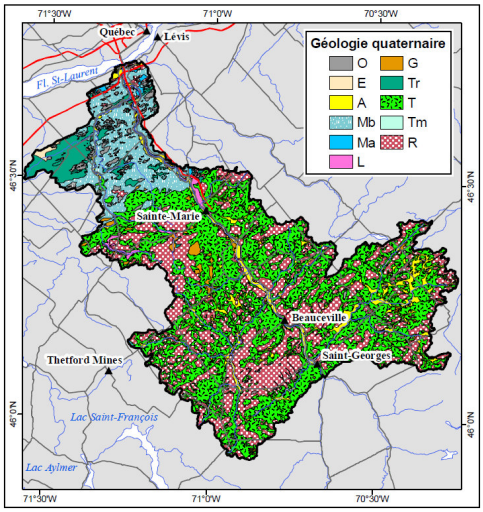

Figure 3. Formations superficielles (modifiée de Caron et al., 2007)

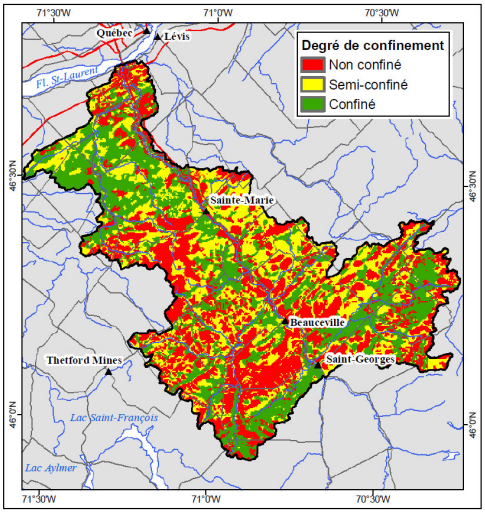

Figure 4. Degré de confinement (modifié de Tecsult, 2008)

4 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

L'aquifère régional a été caractérisé en fonction de son degré de confinement (Benoit et al., 2008) défini à partir du modèle numérique 3D des formations quaternaires (Caron et al. 2007). Les critères suivants ont été utilisés (Benoit and al., 2008) :

- condition non confinée (nappe libre) : caractérisée par des formations de couverture mince (< 1 m);
- condition confinée : caractérisée par des formations sus-jacentes épaisses et peu perméables (till > 5 m et/ou argile > 2 m);
- condition semi-confinée : condition intermédiaire, caractérisée par des formations sus-jacentes minces peu perméables (till < 5 m et/ou argile < 2 m).

La piézométrie régionale (Benoit et al., 2008) est essentiellement basée sur les mesures de niveaux d'eau (plus de 600 puits) ainsi que sur les niveaux des principales rivières. Compte tenu du lien hydraulique entre l'aquifère rocheux et les formations superficielles situées dans les vallées principales (zones de résurgence), les mesures des puits localisés dans celles-ci ont été intégrées à la piézométrie de l'aquifère régional.

La piézométrie présentée à la figure 5 montre que les directions d'écoulement diffèrent entre la Basse-Chaudière et la Moyenne-Chaudière. En effet, l'écoulement dans la Moyenne-Chaudière est davantage influencé par les réseaux hydrographiques et ce particulièrement en région à topographie accidentée; il y a donc peu de contribution d'un sous-bassin à un autre. Le peu de contrôle topographique et les faibles gradients

hydrauliques laissent supposés que le temps de résidence est plus long dans la Basse-Chaudière.

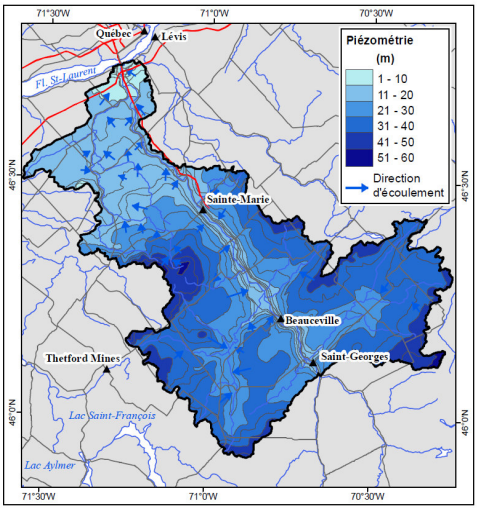

Figure 5. Piézométrie régionale (modifiée de Tecsult, 2008)

Sur la base des résultats issus de la cartographie hydrogéologique (COBARIC et UPA, 2008 et Benoit et al., 2008), un modèle conceptuel d'écoulement de l'aquifère régional a été établi (Figure 6). L'aquifère régional rocheux est généralement a surface libre près des sommets et aux endroits où les formations sont minces. Ailleurs, le roc peut être semi-confiné ou confiné, selon l'épaisseur des formations peu perméables (till et argile) qui le recouvrent.

L'écoulement dans l'aquifère se fait principalement dans sa partie supérieure, là où le degré de fracturation est le plus important. Cet écoulement est surtout local et parcourt de faibles distances à partir des zones de recharge vers les rivières les plus proches (zones de résurgence). L'écoulement régional est très limité en raison de la perméabilité relativement faible du roc. Les formations granulaires perméables de l'aquifère régional se trouvent généralement dans les vallées principales en bordure des rivières, et présentent des conditions à nappe libre. L'écoulement y est local et fait rapidement résurgence aux rivières.

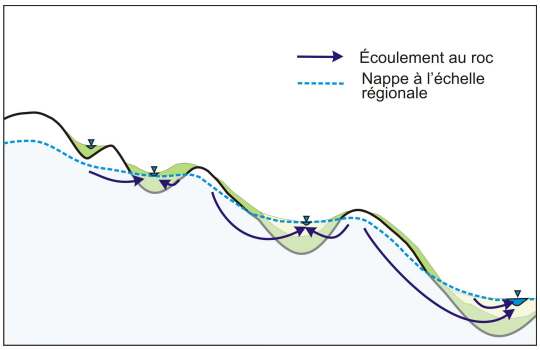

Figure 6 Modèle conceptuel de l'écoulement souterrain

5 PUITS ÉCHANTILLONNÉES

Sur l'ensemble des 155 sites d'échantillonnage, 123 correspondent à des puits tubulaire (roc), 30 à des puits de surface et 2 à des sources. Le tableau 1 présente quelques statistiques des caractéristiques des puits échantillonnées.

Tableau 1 Caractéristiques connues des puits échantillonnés

Caractéristiques	Statistiques	Puits de surface	Puits tubulaires
Profondeur (m)	n	23	99
	min	0.6	10.7
	mediane	3.1	44.2
	max	6.1	200.0
Diamètre des forages (m)	n	20	105
	min	0.10	0.15
	mediane	1.2	0.15
	max	2.5	0.20

Les caractéristiques des puits de surface diffèrent de celles des puits tubulaires. Les puits de surface ont une profondeur qui varie de 0.6 à 6.1 m avec un grand diamètre variant de 1.0 à 2.5 m (une exception à 0.1 m). Les puits tubulaires sont tous plus profond variant de 10.7 à 200 m. Leur diamètre, inférieur à ceux des puits de surface, varie peu, soit de 0.15 à 0.20 m.

6 QUALITÉ DE L'EAU

L'analyse de la qualité de l'eau souterraine permet d'identifier les paramètres physicochimiques susceptibles de causer d'éventuels problèmes de qualité. Les échantillons d'eau souterraine ont été analysés pour les éléments mineurs, majeurs et traces ainsi que pour les paramètres physico-chimiques mesurés in situ (température, pH, conductivité électrique spécifique, oxygène dissous et potentiel d'oxydoréduction). Le tableau 2 présente, pour 56 paramètres, quelques statistiques des résultats analytiques obtenus, les normes en vigueur pour chacun des paramètres ainsi que le nombre d'échantillons qui les excèdent. Les mesures du potentiel d'oxydoréduction, rapportées pour une faible proportion des échantillons (14%), ne sont pas présentées compte tenu de divers problèmes techniques rencontrés lors de la campagne d'échantillonnage apportant ainsi un doute sur la fiabilité de ces mesures.

Pour 16 des 56 paramètres analysés (Ca, Mg, Na, Alcalinité, MDT, CID, NH4, As, Ba, Fe, I, Li, Mn, Mo, Sr, U), la concentration médiane est au moins 2 fois plus élevée dans les formations rocheuses que dans les formations meubles. Ceci témoigne probablement des interactions entre l'eau et les formations rocheuses couplé à un temps de résidence plus long dans cet aquifère (conductivités hydrauliques faibles). Pour 7 autres paramètres analysés : oxygène dissous, NO2-NO3, azote totale, Cu, Cr, Pb et coliformes totaux, les concentrations médianes des formations superficielles sont au moins 3 fois plus élevées. Les paramètres oxygène dissous, NO2-NO3, azote total et coliformes

totaux suggèrent une plus grande vulnérabilité des puits de surface à la contamination par des activités anthropiques provenant de la surface. Toutefois, des valeurs observées pour certains paramètres (NO2-NO3, oxygènes dissous, coliformes totaux et de E.coli) dans certains puits tubulaires indiquent que ces derniers peuvent être également vulnérable à la contamination, particulièrement dans les secteurs semi-confinés ou non-confinés.

Les résultats obtenus ont été comparés aux normes du Règlement sur la qualité de l'eau potable du MDDEP (MDDEP, 2009), et aux recommandations de Santé Canada (CCME, 2008). Sur les 31 paramètres ayant une norme ou une recommandation, 17 d'entre eux l'ont excédé au moins une fois. Dans le cas des puits tubulaires, les paramètres les plus souvent dépassés sont (% dépassement) : Mn (56.1%), coliformes totaux (42.6%), dureté (28.7%), pH (15.4%), Fe (12.2%), MDT (12.2%). Au total, 8 paramètres ont excédés les normes à une fréquence de moins de 10%. Pour les puits de surface : Coliformes totaux (76.7%), pH (43.8%), E coli (20.0%), dureté (16.7%), Mn (15.6%). Six paramètres excèdent les normes dans moins de 10% des cas. Parmi les échantillons ayant des pH basiques excédant le critère esthétique, la grande majorité (10/11) se trouve dans la Basse-Chaudière et ils proviennent tous de puits tubulaires. Ceci témoigne d'une eau ayant évoluée chimiquement par des interactions avec la roche environnante, possiblement de composition différente, venant ainsi appuyer l'hypothèse que l'eau souterraine dans le secteur de la Basse-Chaudière a un temps de résidence plus long que dans les autres secteurs du bassin versant.

Selon les concentrations obtenues pour les composés azotés (azote ammoniacal, NO2-NO3, azote total) et phosphorés (P tot. Inorganique, P total) généralement associés aux activités agricoles, il ne semble pas y avoir de problème majeur. Toutefois, la proportion élevée d'excès en E.coli, laisse présager une problématique associée à des matières fécales. Cependant, les informations recueillies au moment de l'échantillonnage et les analyses réalisées ne permettent pas d'identifier la source des matières fécales pour chacun des cas de dépassements. L'épandage agricole, la présence d'animaux domestiques à proximité du puits et les systèmes septiques désuets ou mal entretenus sont trois sources potentielles.

Compte tenu de leur distribution relativement homogène sur le territoire, les dépassements reliés au fer et au manganèse semblent plutôt d'origine naturelle associée au matériel géologique en place. Des concentrations élevées en fer peuvent aussi être associées à l'oxydation au tubage des puits.

Selon la classification de Sawyer et McCarty (1967), la dureté de l'eau souterraine puisée dans l'aquifère rocheux diffère de celle captée dans les formations meubles (Table 3).

En effet, la dureté de près de la moitié (46.9%) des échantillons provenant de l'eau captée dans les formations présente une classification douce tandis qu'un peu plus de la moitié (51.2%) de ceux captés dans les puits au roc sont classés dure à très dure. La figure 7 indique que près de la moitié des échantillons dont la dureté est >300 mg $CaCO_3$/L, sont localisés dans la zone de Humber externe nord (Figure 2; zone A) dont la roche présence de roches calcareuses est plus abondantes.

Tableau 3. Dureté de l'eau

Formation	n	Pourcentage d'échantillon par catégorie de dureté (mg/l de $CaCO_3$)			
		douce (0-75)	moyennement dure (75-150)	dure (150-300)	très dure (>300)
sediment	32	46.9	34.4	18.7	0
Roc	123	15.5	33.3	42.3	8.9

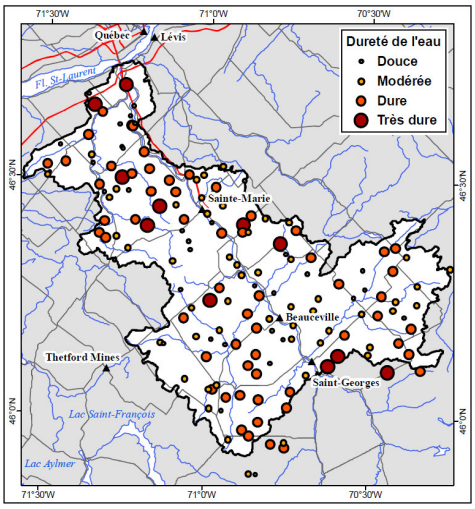

Figure 7. Dureté de l'eau souterraine

7 TYPES D'EAU

La balance ionique de tous les échantillons a été calculée de manière à assurer la qualité des résultats analytiques. De manière générale, les résultats excédant un écart de ± 10% sont rejetés. Pour l'ensemble des résultats obtenus, 79% des échantillons présentaient un écart inférieur à ± 5%, 92% inférieur à ± 10% et 97% inférieur à ± 15%. Sur les 155 échantillons, 12 avait un excédant de ± 10%. Toutefois, parmi ces 12 échantillons, 7 ont un écart inférieur à ± 12,3%. Compte tenu du fait que cette valeur est proche de la limite de ± 10%, et pour éviter le manque de données dans certains secteurs de la zone d'étude, ces derniers ont été conservés. Il y a donc 5 échantillons de rejetés et 150 disponibles pour la définition des types d'eau.

Les diagrammes de Piper de la figure 8 présentent les types d'eau définis pour les échantillons prélevés dans les puits tubulaires (Figure 8a) et les puits de surface (Figure 8b). Les formes utilisées (cercle et carré) sont respectivement associées aux cations dominants Ca et Na. Dans la même optique, les couleurs (gris et noir) sont respectivement reliées aux anions dominants Cl et HCO_3. Les concentrations des MDT on été utilisées pour établir la dimension des symboles.

Tableau 2 : Résultats analytiques des puits échantillonnés

Paramètres	Limite de détection	Normes du RQEP ou recommandations du CCME	Puits tubulaire					Puits de surface				
			n	min	max	médiane	excès	n	min	max	médiane	excès
Température (°C)	**-**	15[1]	123	7.2	12.1	8.5	0	**32**	**7.9**	**15.5**	**10.55**	**1**
pH	**-**	**6.5-8.5**	**123**	**5.78**	**9.59**	**7.52**	**19**	**32**	**5.9**	**7.91**	**6.57**	**14**
Conductivité (mS/cm)	-	-	123	0.2	1656	244.1	0	32	31.3	515	140.2	0
Oxygène dissous (mg/l)	-	-	112	0	13.1	1.305	0	29	0.2	10.69	5.66	0
Ca (mg/l)	-	-	123	0.08	160	51	0	32	5.3	100	23.5	0
Mg (mg/l)	-	-	123	0.02	19	6.5	0	32	0.84	20	2.5	0
Na (mg/l)	**-**	**200[1]**	**123**	**1.3**	**290**	**9.8**	**1**	32	0.79	70	3.1	0
K (mg/l)	-	-	123	0.18	16	0.72	0	32	0.16	18	0.595	0
Alcalinité tot. (mg $CaCO_3$/l)	-	-	118	14	330	136.25	0	30	12	290	55.5	0
Chlorures (mg/l)	**-**	**250[1]**	**123**	**0.21**	**415**	**7.1**	**2**	32	0.335	180	4.55	0
SO_4 (mg/l)	-	500[1]	123	1.8	95	18	0	32	0.6	76	10	0
Dureté (mg $CaCO_3$/l)	**-**	**200[1,3]**	**115**	**0**	**445**	**152**	**33**	**30**	**17**	**295**	**80**	**5**
MDT - matière dissoute totale (mg/L)	**-**	**500[1]**	**115**	**43**	**1210**	**288**	**14**	**30**	**31**	**563**	**137**	**1**
Cyanures (mg/l)	< 0,004	0.2	123	0.004	0.004	0.004	0	32	0.004	0.004	0.004	0
CID (mg C/l)	-	-	123	11	89	34	0	32	6.6	70	17	0
COD (mg C/l)	< 0,2	-	123	0.2	7.1	0.74	0	32	0.2	23	0.885	0
Fluorures (mg/l)	**< 0,03**	**1.5**	**123**	**0.03**	**1.9**	**0.015**	**2**	32	0.03	0.19	0.015	0
Sulfures (mg/l)	**< 0,03 et < 0,02**	**0.05[1]**	**123**	**0.02**	**2.9**	**0.01**	**10**	**32**	**0.02**	**0.4**	**0.01**	**2**
NH_4 - Azote ammoniacal (mg N/l)	< 0,02	-	118	0.01	1.8	0.03	0	31	0.01	3.4	0.01	0
NO_2-NO_3 (mg N/l)	**< 0,02**	**10**	**118**	**0.02**	**14**	**0.055**	**1**	31	0.02	4.2	0.45	0
Azote total (mg N/l)	< 0,02	-	116	0.02	13	0.29	0	31	0.12	7.4	0.92	0
P tot. inorganique (mg/l)	< 0,03	-	123	0.03	0.4	0.015	0	32	0.03	0.03	0.015	0
P total (mg/l)	< 0,002	-	123	0,002	0,38	0,0054	0	32	0,002	0,12	0,003	0
Al (µg/l)	**-**	100[1]	123	0.2	22	3.5	0	**32**	**0.55**	**150**	**4.1**	**1**
Ag (µg/l)	< 0,001	100	123	0.001	0.006	0.001	0	32	0.001	0.03	0.001	0
As (µg/l)	**< 0,03**	**25 (10)[2]**	**123**	**0.03**	**14**	**0.48**	**3**	32	0.05	2.1	0.17	0
B (µg/l)	-	5000	123	1.7	590	9.1	0	32	1.2	200	4.85	0
Ba (µg/l)	**-**	**1000**	123	0.054	860	53	0	**32**	**1.5**	**3600**	**13.55**	**1**
Be (µg/l)	< 0,004	-	123	0.004	0.12	0.002	0	32	0.004	0.2	0.002	0
Br (µg/l)	**< 0,5**	**-**	123	3.5	300	14	0	32	0.5	130	7.6	0
Cd (µg/l)	< 0,04 et < 0,004	5	123	0.004	0.3	0.006	0	32	0.004	0.096	0.007	0
Cr (µg/l)	< 0,04	50	123	0.04	0.4	0.02	0	32	0.04	1.7	0.0795	0
Co (µg/l)	< 0,007	-	123	0.007	2.5	0.088	0	32	0.017	3.2	0.0495	0
Cu (µg/l)	< 0,05	1000	123	0.05	68	0.78	0	32	0.12	150	5.85	0
Fe (µg/l)	**< 0,5**	**300[1]**	**123**	**0.05**	**16000**	**16**	**15**	**32**	**0.05**	**32000**	**3.25**	**3**
I (µg/l)	< 0,53 et < 0,5	-	123	0.5	82	1.8	0	32	0.5	20	0.635	0
Li (µg/l)	< 0,06	-	123	0.18	130	4.4	0	32	0.06	30	1.04	0
Mn (µg/l)	**-**	**50[1]**	**123**	**0.027**	**2300**	**88**	**69**	**32**	**0.038**	**1200**	**1.28**	**5**
Hg (µg/l)	<0,01	1	123	0.01	0.18	0.005	0	32	0.01	0.12	0.005	0
Mo (µg/l)	-	-	123	0.021	16	0.62	0	32	0.014	1.1	0.0885	0
Ni (µg/l)	< 2 et < 0,2 et < 0,02	70	123	0.02	24	0.38	0	32	0.09	9.9	0.59	0
Pd (µg/l)	< 0,005	-	123	0.005	0.023	0.0025	0	32	0.005	0.0096	0.0025	0
Pt (µg/l)	< 0,006	-	123	0.006	0.003	0.003	0	32	0.006	0.003	0.003	0
Pb (µg/l)	< 0,3 et < 0,03	10	123	0.03	1.2	0.054	0	32	0.03	1.2	0.19	0
Sb (µg/l)	**< 0,004**	**6**	**123**	**0.004**	**8.6**	**0.027**	**1**	32	0.004	0.097	0.0185	0
Se (µg/l)	< 3 et < 0,3	10	123	0.3	2.6	0.15	0	32	0.3	1.5	0.15	0
Si (mg/l)	< 0,003	-	123	2.7	9	5.6	0	32	0.003	8	4.3	0
Sn (µg/l)	< 0,01	-	123	0.01	0.046	0.005	0	32	0.01	0.042	0.005	0
Sr (µg/l)	-	-	123	1.1	4300	470	0	32	32	2600	165	0
Tl (µg/l)	< 0,005	-	123	0.005	0.068	0.0025	0	32	0.005	0.035	0.0025	0
U (µg/l)	-	20	123	0.0047	8.2	0.56	0	32	0.003	1.5	0.0595	0
V (µg/l)	< 0,01	-	123	0.01	2.2	0.029	0	32	0.01	6.5	0.0395	0
Zn (µg/l)	< 0,7	5[1]	123	0.7	1300	2.7	0	32	0.7	110	3.7	0
Colonies atypiques (UFC/100ml)	-	200	122	0	200	0	0	30	0	200	1.75	0
Coliformes totaux (UFC/100ml)	**-**	**10**	**122**	**0**	**160**	**4**	**52**	**30**	**0**	**160**	**45**	**23**
E coli (UFC/100ml)	**-**	**0**	**115**	**0**	**37**	**0**	**11**	**30**	**0**	**80**	**0**	**6**

RQEP : Règlement sur la qualité de l'eau potable CCME : Conseil canadien des ministres de l'environnement

[1]Objectifs d'ordre esthétique de Santé Canada

[2]La norme de10 mg/l de santé Canada a été retenue plutôt que celle du NQEP de 25 mg/l

[3]La valeur de 200 a été retenue; une eau dont la dureté est comprise entre 200 et 500 est considéré médiocre mais tolérable.

MDT et Dureté : valeurs calculées

Paramètres en excès marqués par une ligne en gras

Le diagramme de Piper pour les formations rocheuses ou puits tubulaires (Figure 8a) indique que l'eau souterraine présente 8 faciès hydrochimiques (types d'eau) nettement dominés en nombre par Ca-HCO3 qui est suivi de loin par Na-HCO3, Na-Cl et Ca-Cl. Les faciès restants, très peu représentés, sont des variantes des faciès dominants. Les eaux les plus riches en matières dissoutes (>970 mg/L) sont associées à deux échantillons du faciès Na-Cl. Les échantillons les plus riches des faciès Ca-HCO3, Na-HCO3 et Ca-Cl ont quant à eux des concentrations situées dans l'intervalle 500 à 673 mg/L.

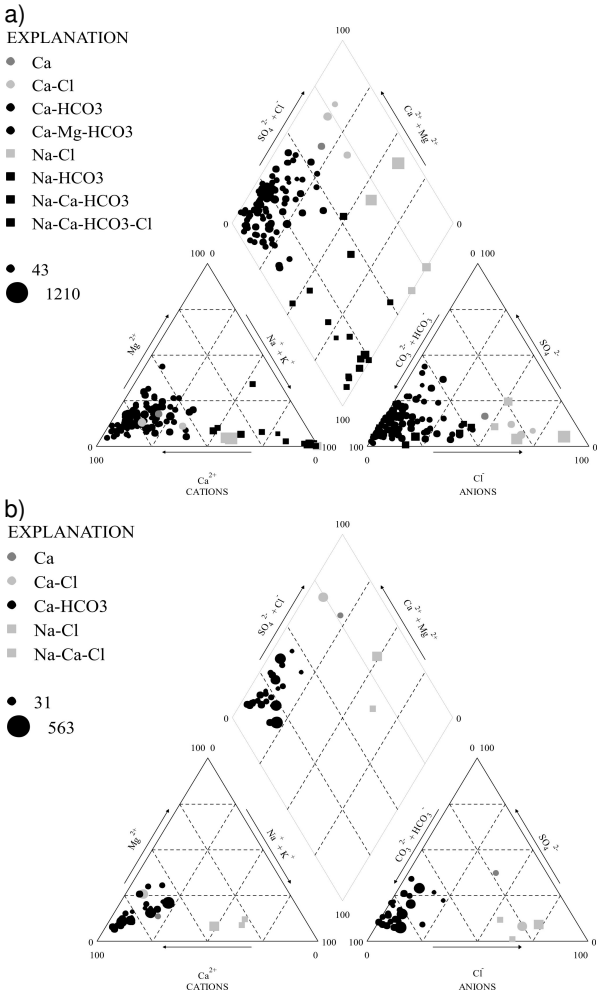

Figure 8: Diagramme de Piper illustrant la composition géochimique des échantillons d'eau et les types d'eau pour a) les formations rocheuses et b) les formations meubles. La forme du symbole est reliée au cation dominant et la couleur à l'anion dominant.

Le diagramme de Piper des formations meubles ou puits de surfaces (Figure 8b) indique que l'eau souterraine présente 5 faciès différents et, comme dans le cas des eaux provenant des formations rocheuses, sont dominés en nombre par le faciès Ca-HCO3 avec quelques échantillons aux faciès Na-Cl et Ca-Cl. Par contre, les eaux les plus riches en MDT sont surtout associées au faciès Ca-HCO3. Deux des échantillons au faciès Na-Cl présentent les plus faibles concentrations en MDT.

Les sources naturelles de NaCl sont généralement attribuées à la présence d'évaporite (halite) et la présence possible d'eau résiduelles d'anciennes mers salines. Le ratio Cl/Br est un outil géochimique très utilisé pour identifier les sources de NaCl (Richter et al., 1993). Les résultats obtenus ne suggèrent pas la présence d'eau saline résiduelle. Comme la présence d'évaporite n'est pas répertoriée dans ce secteur, la source de NaCl pourrait être de nature anthropique (sels de déglaçage).

Les eaux du faciès Na-HCO3 sont observées presqu'exclusivement dans la Basse-Chaudière (Figure 9) et seulement dans les puits localisés dans les formations rocheuses (secteur plus calcareux) et où près de 60% du territoire est confiné. Ceci peut s'expliquer en partie par la faible représentation de puits de surface dans cette partie du bassin (Figure 1). Ce faciès peut aussi être le résultat de l'évolution d'une eau souterraine de faciès Ca-HCO3 subissant un processus d'échange ionique entre Ca et Na.

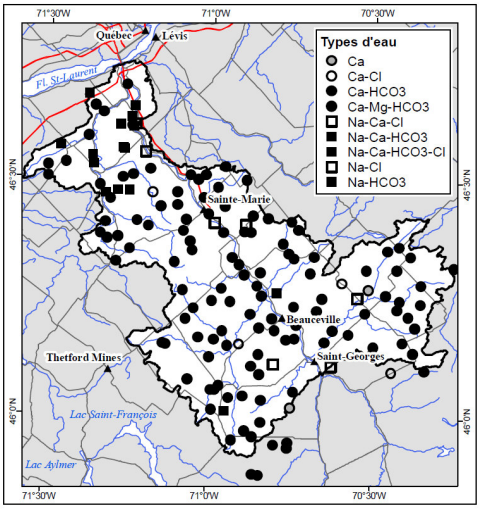

Figure 9. Distribution des types d'eau

8 CONCLUSION

L'échantillonnage de plus de 150 échantillons d'eau souterraine a permis de dresser un portrait de la composition chimique et de la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la rivière Chaudière (Québec).

Des dépassements de critères de qualité pour l'eau potable ont été déterminés pour 17 paramètres : température, pH, Na, Cl, dureté totale, MDT, F, sulfures, NO2-NO3, Al, As, Ba, Fe, Mn, Sb, coliformes totaux et bactéries E.coli. Les dépassements des paramètres Na, Cl, F, NO2-NO3, As et Sb sont survenus uniquement dans les échantillons prélevés dans les puits tubulaires (au roc). Par ailleurs, les

dépassements pour la température et le Al ne sont apparus que dans les échantillons issus des puits de surface. Les dépassements pour le Mn, les coliformes totaux et la dureté touchent plus de 20% des échantillons prélevés des puits tubulaires, tandis que ce pourcentage s'applique aux puits de surface dans le cas des coliformes totaux, du pH et de la bactérie E.coli . Les dépassements observés suggèrent que l'eau des puits de surface est vulnérable à la contamination par des activités anthropiques, de même que certains puits tubulaires.

Les résultats des paramètres analysés lors de cette caractérisation hydrogéochimique révèlent que de façon générale l'eau souterraine est naturellement potable sur l'ensemble du territoire étudié. Les dépassements de normes observés sont dispersés et non concentrés dans un secteur particulier. Les résultats obtenus montrent que cette qualité peut être reliée au contexte hydrostratigraphique, c'est-à-dire au degré de confinement et au milieu aquifère (rocheux ou de surface) ainsi qu'au temps de séjour de l'eau. En assumant des valeurs de conductivités hydrauliques similaires, la partie avale de la zone d'étude (Basse-Chaudière) se distingue du reste du bassin notamment par un faible gradient hydraulique suggérant ainsi un temps de résidence plus long. Ceci est appuyé par le regroupement des mesures de pH basique dans ce secteur.

La définition des types d'eau a identifié le type Ca-HCO3 comme étant le type d'eau dominant dans cette région, un type d'eau généralement présent dans les zones dominées par des conditions de nappe libre et semi-confinée. Le type d'eau Na-HCO3, qui n'a pas été identifié parmi les échantillons des puits de surface, est fortement concentré dans le secteur de la Basse-Chaudière, dominé par des conditions de nappe captive et plus de roches calcareuses.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier le COBARIC, les fédérations de l'UPA de la Beauce, de Lévis-Bellechasse et de Lotbinière-Mégantic, la Commission géologique du Canada, le MDDEP, le MAPAQ, ainsi que la population locale pour leur contribution à l'étude.

REFERENCES

Benoit, N., Forest, G., Roy, N. and Nastev, M. 2008. Développement d'un modèle hydrogéologique conceptuel pour le bassin de la rivière Chaudière, Québec. *9th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Edmonton*, 8 p.

Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Lamontagne, C., Croteau, A., Lavigne, M.-A., Roy, N. and Cloutier, V., 2005. Hydrochemical Assessment of Groundwater in the Châteauguay River Watershed, Québec. *5th Joint CGS/IAH Conf. Québec*, 8p.

Caron, O., Tremblay, T., Lamothe, M. 2007. Synthèse cartographique des formations superficielles du bassin versant de la rivière Chaudière. Université du Québec à Montréal et Québec : MDDEP, Fichiers informatiques, 1 : 50 000.Castonguay,

Castonguay, S. 2008. Communication personnelle. Chercheur scientifique, Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, Québec.

Castonguay, S., Tremblay, A. et Lavoie, D. 2002. Carte de compilation géologique, Québec-Chaudière, Les ponts géologiques de l'Est du Canada, Transect 2, Québec. Dossier public 4314, Commission géologique du Canada, Québec, Fichiers informatiques, 1 125 000.

Castonguay, S., Tremblay, A. et Lavoie, D. 2000. Compilation géologique, Montréal-Mégantic, Section appalachienne : Les Ponts Géologiques de l'Est du Canada, Transect 1, Québec. Dossier public 3872 (A, B), Commission géologique du Canada, Québec, Fichiers informatiques, 1 : 100 000.

CCME, 2008. Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement. http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/summary-sommaire-fra.pdf

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. Ph.D. Thesis, INRS-ETE, 382 p.

COBARIC et UPA 2008. Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière : secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière. CD-Rom

Houslow, A.W. 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation, CRC Lewis Publishers, New York.

Kenneth. S.F. 2004. How to calculate bicarbonate, carbonate and hydroxide from total alkalinity. University of Arkansas, Department of geosciences. http://comp.uark.edu/~ksteele/hc2004/alkalinity-%20calculation.htm

MRN 2002.. Ministère des Ressources naturelles, Carte géologique du Québec, Édition 2002. DV 2002-06, Fichiers informatiques, 1 : 2000 000.

MDDEP, 2009. Règlement sur la qualité de l'eau potable (Édition 1er mai 2009). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=//Q_2/Q2R18_1_1.htm

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

Sawyer, C.N. and McCarty, P.L. Chemistry for sanitary engineeres, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 518 p.

St-Julien, P. et Slivitzky, A. (1985) Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce. Carte no. 2030 du rapport MM 85-04, Commission géologique du Canada, Ottawa, Fichiers informatiques, 1 : 250 000.

Tecsult (2008) Cartographie hydrogéologique du bassin versant de la rivière Chaudière - Secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière : Confinement. Étude réalisée dans le cadre du Projet eaux souterraines de la Chaudière, Montréal, Fichiers informatiques, 250 m de résolution.