



Étude de vulnérabilité des
sources d'eau potable au
fleuve des villes de Québec
et de Lévis en regard
de la salinité

Rapport révisé de l'étape 1.1
portant sur l'identification des
pointes de salinité et des causes

RÉFÉRENCE À CITER

Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) et Ouranos, 2019. Étude de vulnérabilité des sources d'eau potable au fleuve des villes de Québec et de Lévis en regard de la salinité – Rapport révisé de l'étape 1.1 portant sur l'identification des points de salinité et des causes, 44 pages.

RÉSUMÉ

Depuis 1999, plusieurs études ont soulevé l'hypothèse que les effets des changements climatiques se traduiront par une hausse du niveau marin et par une baisse du débit du Saint-Laurent. Cette situation pourrait provoquer une remontée de la zone de transition saline (ZTS) vers l'amont, ce qui compromettrait l'alimentation en eau potable de plus de 200 000 personnes sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ).

Depuis les dernières années, des pointes de conductivité élevées ont été observées à l'usine de production d'eau potable (UPE) de Sainte-Foy et les villes de Québec et de Lévis sont préoccupées par cette situation. Des sources terrestres sont évoquées afin d'expliquer la concentration de sels observée. Afin de répondre aux différentes préoccupations des acteurs du milieu, la CMQ, Ouranos, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) ainsi que les villes de Québec et de Lévis ont élaboré un projet visant à mieux comprendre les sources actuelles et futures de salinité dans la ZTS.

Le présent rapport porte sur la variabilité temporelle et spatiale actuelle de la salinité de l'eau observée à proximité et à l'entrée des prises d'eau potable des villes de Québec et de Lévis, et l'identification des causes. Des données portant sur la conductivité et les chlorures ont été étudiées pour les UPE de Sainte-Foy, Saint-Romuald et Lévis (Desjardins). Les analyses ont révélé que les valeurs de conductivité observées ne dépassent pas le seuil de potabilité de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De plus, les analyses semblent indiquer que les pointes de salinité les plus importantes sont d'origine terrestre et non fluviale, et que celles-ci surviennent lorsque des précipitations ont lieu à des températures près de 0°C. Les pointes ne sont pas toujours associées à des changements de débit dans les cours d'eau, ce qui laisse supposer que des sels pourraient être transportés vers les cours d'eau par les réseaux d'égouts pluviaux ou les surverses des réseaux unitaires.

Il est également possible d'affirmer que les pointes observées aux UPE de Sainte-Foy, Desjardins et de Lévis, ne proviennent pas d'un déplacement de la ZTS pour le moment. À cet égard, l'étude a confirmé un manque d'information sur la position exacte du front salin, puisque la plupart des données relatives au fleuve ne s'appliquent qu'aux courants de surface.

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction.....	1
2.	Mise en contexte	4
2.1	Notions de salinité	4
2.2	Facteurs qui influencent la salinité	6
2.3	Enjeux municipaux de la salinité de l'eau, une problématique qui s'accroît	8
3.	Méthodologie.....	10
3.1	Revue de littérature sur les problématiques de remontée de fronts salins	10
3.2	Données disponibles sur la salinité du fleuve dans la région.....	10
3.3	Acquisition des données disponibles.....	12
3.4	Données récentes sur la salinité aux UPE	15
3.5	Méthode d'analyse statistique	16
4.	Résultats	18
4.1	UPE de Sainte-Foy	18
4.2	Prises d'eau de Saint-Romuald et de Lévis (Desjardins)	20
4.3	Stations dans le Fleuve Saint-Laurent.....	23
4.4	Rivières du territoire de la CMQ et prise d'eau de Québec (Château-d'Eau)	24
5.	Causes associées à la salinité sur le territoire de la CMQ.....	31
5.1	Préoccupations associées aux résultats des données des UPE.....	31
5.2	Préoccupations associées aux résultats des données des stations de suivi de la BQMA	31
5.3	Causes associées à la variabilité observée.....	32
5.4	Urbanisation et activités humaines.....	33
6.	CONCLUSION	38
7.	Références	39
	 ANNEXE 1 - Équipe de réalisation et comité de pilotage	 43
	 ANNEXE 2 - Problématiques documentées à l'international, au Canada et au Québec	 45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Zone d'étude.....	3
Figure 2 - Mesures de la conductivité maximale quotidienne ($\mu\text{S}/\text{cm}$) aux usines de production d'eau potable de Québec et de Sainte-Foy entre 2011 et 2017	9
Figure 3 - Salinité des eaux de surface du fleuve (compilation).....	11
Figure 4 - Stations de mesure de la conductivité et du chlorure, hydrométrique ou marégraphique, sur divers cours d'eau.....	14
Figure 5 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable de Sainte-Foy de 2007 à 2017.....	18
Figure 6 - Conditions typiques amenant une pointe de salinité (exemple avec la pointe du 8 janvier 2014 à l'UPE de Sainte-Foy)	19
Figure 7 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable Saint-Romuald de 2018 à 2019	20
Figure 8 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable Desjardins de 2018 à 2019	21
Figure 9 - Date, conductivité maximale, durée et cause probable des pointes des données de conductivité aux usines de production d'eau potable Desjardins et Saint-Romuald de 2018 à 2019.....	21
Figure 10 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable Desjardins – Influence de la marée sur la conductivité.....	22
Figure 11 - Conditions typiques amenant une pointe de salinité (exemple avec la pointe du 25 décembre à l'usine Desjardins).....	23
Figure 12 - Évolution de la teneur moyenne annuelle en chlorures dans l'eau brute de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles entre 1977 et 2016.....	25
Figure 13 - Dispersion des mesures de conductivité sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles, selon la base de données de l'APEL	27
Figure 14 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable de Château-d'Eau de 2011 à 2017	28
Figure 15 - Relation entre le débit et la conductivité à l'usine de Château-d'Eau pour 2017	28
Figure 16 - Conductivité mesurée à (haut) la rivière des Hurons et (bas) au ruisseau des Eaux-Fraîches ..29	
Figure 17 - Comparaison entre la conductivité de la rivière Saint-Charles (noir) et les débits de la rivière (bleu) pour la période 2002-2016	33
Figure 18 - Comparaison de la conductivité hivernale (décembre-mars, bleu) et estivale (juin-novembre, rouge) de douze rivières de la BQMA	34
Figure 19 - Concentration estivale en chlorures de la rivière du Cap Rouge et de ses tributaires	35
Figure 20 - Comparaison entre les débits du fleuve Saint-Laurent à LaSalle pour la période 2007-2016 (haut) et pour la période historique de 1955 à aujourd'hui (bas)	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Comparaison des matières dissoutes entre l'eau salée des océans et l'eau douce des rivières	4
Tableau 2 - Catégorie de salinité de l'eau selon la quantité de sels dissous dans un volume donné	5
Tableau 3 – Seuils identifiés sur l'impact de la salinité de l'eau.....	5
Tableau 4 – Résumé de la qualité des eaux dans le bassin versant du lac Saint-Augustin.....	8
Tableau 5 – Source de données	13
Tableau 6 – Caractéristiques des données de conductivité aux usines	15
Tableau 7 - Caractéristiques des données de conductivité et de chlorures	15
Tableau 8 - Conductivité médiane et maximale aux stations de la BQMA dans le fleuve Saint-Laurent	24
Tableau 9 - Conductivité médiane et maximale des rivières de la région de Québec (BQMA)	25
Tableau 10 – Rivières avec un seuil supérieur à 1000 µS/cm	31

LISTE DES ACRONYMES

APEL	Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord
BQMA	Banque de données sur la qualité du milieu aquatique
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
CBRCR	Conseil de bassin de la rivière du Cap Rouge
COBAMIL	Conseil des bassins versants des Mille-Îles
ECCC	Environnement et Changements climatiques Canada
DEH	Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCC (anciennement Centre d'expertise hydrique du Québec - CEHQ)
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (le MDDELCC en 2013)
OBVRLY	Organisme de bassins versants des rivières du Loup et de Yamachiche
OBV	Organismes de bassin versant
UTE	Usine de traitement de l'eau potable
UPE	Usine de production d'eau potable
ZTS	Zone de transition saline

LISTE DES SYMBOLES

cm	Centimètre
g/L	Gramme par litre
g	Gramme
km	Kilomètre
km ²	Kilomètre carré
m	Mètre
mg/L	Milligramme par litre
mS/cm	Milli siemens
m ³ /s	Mètre cube par seconde
mm	Millimètre
ppm	Partie par million
Psu	Practical salinity unit
S/cm	Siemens
µS/cm	Micro siemens/cm

1. INTRODUCTION

Le fleuve Saint-Laurent joue un rôle majeur dans l'organisation territoriale du Québec bâti où plus des 340 municipalités, dont les plus grosses villes, sont directement établies sur ses rives. Au cœur de nos activités économiques, le fleuve constitue la source d'approvisionnement en eau potable de près de la moitié des Québécois. Sur le territoire de la CMQ, l'Agglomération de Québec et la Ville de Lévis puisent une partie de leur eau en surface directement dans le fleuve, alimentant ainsi plus de 200 000 personnes (CMQ, 2016). Le fleuve Saint-Laurent représente également un habitat essentiel pour un grand nombre d'espèces animales et végétales.

À moins de 28 km en aval de la prise d'eau de Lévis, l'eau du fleuve devient progressivement saumâtre et se mélange, à proximité de L'Isle-aux-Coudres, avec les eaux salées. Elle acquiert ses caractéristiques marines à la tête du chenal Laurentien (à la hauteur de Tadoussac) où se produisent d'importantes remontées d'eaux profondes provenant de l'océan Atlantique. La zone de transition saline (ZTS), appelée communément le front salin, s'étend donc actuellement entre la pointe Est de l'île d'Orléans et L'Isle-aux-Coudres. La circulation de la zone de transition estuarienne est le résultat de fortes marées de plus de 3,5 m de marnage (à l'est de l'île d'Orléans), d'un débit fluvial élevé et de gradients de salinité bien définis (Simons et al.; 2010).

Ces dernières années, des pointes de conductivité¹ élevées ont été observées à l'usine de production d'eau potable (UPE) de Sainte-Foy. Bien que les pointes se situent en deçà du seuil de potabilité, les villes de Québec et de Lévis sont préoccupées par cette situation. À Sainte-Foy, la fonte des dépôts à neige, composée de sels de déglacage empruntant divers effluents (urbains et cours d'eau) à proximité de la prise d'eau, pourrait expliquer en partie la salinité observée. La hausse de débit des rivières en hiver et l'augmentation des températures hivernales et des cycles de gel-dégel associées aux effets des changements climatiques pourraient amplifier la situation.

Dès 1999, des études ont soulevé l'hypothèse que les effets des changements climatiques pourraient occasionner une hausse du niveau marin dans la portion maritime du fleuve. Elle serait accompagnée d'une baisse du débit du Saint-Laurent notamment associé à une plus grande évaporation des eaux des Grands Lacs (Bourgault et al., 1999; Moulton et Cuthbert, 2000 et Villeneuve et al., 2001). Cette conjonction des phénomènes hydroclimatiques favoriserait une remontée progressive du front salin vers l'amont, ce qui pourrait compromettre à terme l'alimentation en eau potable de certaines municipalités de la CMQ. De plus, le déplacement du front salin pourrait avoir des impacts environnementaux, notamment sur certaines espèces végétales et animales, par la modification graduelle des écosystèmes. Enfin, la salinisation de l'eau pourrait engendrer de nombreuses répercussions financières sur la corrosion et la durabilité des infrastructures et des équipements municipaux et industriels, comme les conduites d'égout et d'aqueduc ou les pompes. À cela s'ajoutent les impacts potentiels d'une dérivation d'une partie de l'eau des Grands Lacs, dont les débits sortants constituent un apport en eau douce indispensable au Saint-Laurent².

¹ Mesure qui permet d'estimer la quantité de sels dissous dans l'eau

² La Commission mixte internationale du Saint-Laurent et des Grands Lacs affirme qu'il n'y a pour l'instant aucun projet sérieux de dérivation majeure, ni de prélèvement d'eau important par camion ou par navire-citerne (Commission mixte internationale, 2017). Toutefois, il est impossible d'ignorer la pression des secteurs agroalimentaires et industriels pour l'obtention d'un accès à ces sources d'eau.

But du mandat

Afin de répondre aux préoccupations des acteurs du milieu, la CMQ, Ouranos, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) ainsi que les villes de Québec et de Lévis ont élaboré un projet visant à mieux comprendre les sources actuelles et futures de salinité dans la ZTS. La coordination de ce projet est assurée par un comité de pilotage composé d'un représentant des différentes parties impliquées (annexe 1). Le projet dans son ensemble vise à répondre à trois principaux objectifs, soit :

1. Analyser la variabilité temporelle et spatiale actuelle de la salinité de l'eau observée à proximité et à l'entrée des prises d'eau potable dans le fleuve et les rivières, et d'en identifier les causes.
2. Modéliser le déplacement du front salin selon des scénarios de hausses du niveau marin et des changements du débit fluvial d'ici 25 et 50 ans afin d'évaluer la possibilité qu'un tel phénomène puisse survenir.
3. Valoriser, diffuser et vulgariser les nouvelles connaissances aux utilisateurs et aux bénéficiaires potentiels.

Le présent rapport porte sur le premier des trois objectifs poursuivis.

Objectif de la première phase

L'objectif principal de la phase 1 du projet consiste à analyser la variabilité temporelle et spatiale actuelle de la salinité de l'eau observée à proximité et à l'entrée des prises d'eau potable des villes de Québec et de Lévis, et d'en identifier les causes. L'analyse s'étendra également aux apports terrigènes provenant principalement des sels de voirie largement utilisés sur le réseau routier régional³.

Structure du rapport

La section 1, la mise en contexte, fera état des connaissances sur les problématiques et les enjeux associés à la salinité enregistrée aux UPE sur le territoire. La section 2 présente l'approche méthodologique utilisée et les données. La section 3 établira un premier diagnostic territorial en lien avec les résultats obtenus, alors que la section 4 présentera certains constats de ce premier volet.

Territoire à l'étude

Le territoire à l'étude est situé à l'intérieur des limites administratives de la CMQ (figure 1). Il s'étend à partir du secteur Sainte-Foy–Sillery–Cap-Rouge à l'ouest jusqu'à la pointe est de l'île d'Orléans à l'est. Pour sa part, la ZTS couvre approximativement la région entre l'île d'Orléans et L'Isle-aux-Coudres. Elle est composée de la partie inférieure de l'estuaire fluvial, caractérisée par des eaux douces, et par la partie supérieure de l'estuaire moyen où les eaux douces du fleuve se mélangent avec les eaux salées. Elle est aussi caractérisée par une dynamique hydrologique complexe, régie par 5 facteurs importants : la bathymétrie, les apports d'eau douce, la marée, le climat et la force de Coriolis⁴.

³ Deux prises d'eau s'approvisionnement dans les rivières Saint-Charles et Chaudière et, la troisième, dans le fleuve en amont de la rivière Cap-Rouge

⁴ Du fait de la rotation de la Terre, la force de Coriolis dévie tout mouvement vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Elle a donc des implications énormes sur le déplacement des masses d'eau et des masses d'air (Daniel, 2018).

Figure 1 - Zone d'étude



2. MISE EN CONTEXTE

2.1 Notions de salinité

La salinité se définit comme la concentration d'une eau en sels minéraux dissous. En milieux côtiers et estuariens, la salinité est le traceur idéal des mélanges entre l'eau douce et l'eau de mer (Aminot et Kérouel, 2004). Afin de bien comprendre les notions qui se rattachent à la salinité, la présente section traite des éléments qui l'influencent ou la caractérisent.

2.1.1 Composition de l'eau douce et de l'eau salée

L'eau salée et l'eau douce contiennent, sous forme dissoute, plusieurs substances minérales (tableau 1). La concentration moyenne en sels contenus dans 1 litre d'eau de mer est de 35 g. Le chlorure et le sodium représentent à eux seuls 85 % du poids de sels dissous et ils proviennent principalement de la dissolution des roches volcaniques dans les océans. L'eau douce des rivières contient également du sel, mais à une plus faible concentration d'environ 0,1 g de sel dans un litre d'eau. Le chlorure de sodium ne représente environ que 15 % du poids de matières dissoutes dans l'eau douce. Il provient essentiellement du lessivage des sols par le ruissellement.

Tableau 1 – Comparaison des matières dissoutes entre l'eau salée des océans et l'eau douce des rivières

Substances minérales	Eau salée			Eau douce	
	mg/L	ppm*	%	mg/L ou ppm*	%
Chlorure	19 000	19	55,16	7,8	8,64
Sodium	10 500	11	30,53	6,2	6,96
Sulfate	2 700	3	7,67	11,2	12,41
Magnésium	1 350	1,5	3,72	4,1	4,54
Calcium	400	0,04	1,19	15,0	16,62
Potassium	380	0,04	1,11	2,3	2,55
Bicarbonate	142		0,42	58,0	31,90
Bromure			0,20		
Silicates	6,4			13,1	14,51
Fer					0,74
Nitrate					1,11
Total	35 000	35	100	100	100
Total (g/L)	35			0,1	

* Dans les concentrations liquides 1 g/L = 1 ppm. Le psu est également utilisé comme unité pour décrire la propriété salée de l'eau
Source : Swenson, 2017

2.1.2 Conductivité

La conductivité est proportionnelle à la quantité de sels minéraux dissous dans l'eau. Elle est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Ainsi, plus la concentration en solides dissous est importante, plus la conductivité est élevée⁵. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S), exprimé en micro ou milli Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$ et mS/cm respectivement). Normalement, le $\mu\text{S}/\text{cm}$ est utilisé pour indiquer les valeurs faibles de conductivité, comme celles de l'eau douce (tableau 2).

Tableau 2 - Catégorie de salinité de l'eau selon la quantité de sels dissous dans un volume donné

Catégorie	Quantité (g/L) PSU	Conductivité ⁶		Type
		mS/cm	$\mu\text{S}/\text{cm}$	
Eau pure	-	0,0002	2	-
Eau douce	< 1	0,05	50	Lacs et rivières
Eau potable	0 à 0,25	1	< 1000	Sources d'eau
Eau saumâtre	1 à 10	Entre 0,05 et 2	50 - 2000	Estuaires
Eau salée	> 10	2	2000	Océans et mers
Eau salée moyenne des océans	35	20-60	60 000	

Au Québec, les valeurs typiques de conductivité des rivières varient entre 100 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur la rive sud du fleuve, alors qu'elles sont de < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur la rive nord (Painchaud, 1997). Il faut préciser que malgré l'absence de normes pour la conductivité, une eau est généralement considérée impropre à la consommation au-delà de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Santé Canada, 1987).

2.1.3 Seuil de la potabilité

Au Canada, une limite de 250 mg/L de sels dissous constitue la norme pour la potabilité de l'eau douce, même si une eau est considérée « douce » lorsqu'elle contient moins d'un gramme par litre (Santé Canada, 1987). Or, il est difficile de mesurer la salinité dans la ZTS, car la proportion des différents composants de matière dissoute n'est pas constante. Dans ce contexte, l'analyse de deux paramètres est à privilégier, soit les chlorures et la conductivité (tableau 3).

Tableau 3 – Seuils identifiés sur l'impact de la salinité de l'eau

	Seuils		Description de l'impact
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Chlorures (mg/L)	
Eau potable	< 1 000	< 250	Goût ou odeur désagréable
Corrosion	Non disponible	Non disponible	Corrosion prématurée des conduites
Milieu aquatique		< 120	Toxicité à long terme pour la vie aquatique
		< 640	Toxicité à court terme pour la vie aquatique
Eau d'irrigation		100	Nuisance pour les plantes vulnérables
		< 700	Nuisance pour les plantes tolérantes

Source : Santé Canada, 2001 et 2009 - normalisé à 25°C

⁵ Un grand avantage de la conductivité est la facilité à mesurer ce paramètre directement dans le cours d'eau à l'aide d'un appareil spécialisé, alors que les chlorures requièrent des tests en laboratoire. C'est ce qui explique que la conductivité est plus communément utilisée pour qualifier l'eau des rivières et l'eau brute aux usines de production d'eau potable.

⁶ Température normalisée à 25°C

2.2 Facteurs qui influencent la salinité

Les facteurs à l'origine de la salinité de l'eau sont divers et complexes. Ils dépendent du contexte géographique (proximité de l'eau salée provenant de la mer), de l'hydrologie des bassins versants (débit, type d'écoulement, effets des affluents), de la géologie (nature du sol et minéralogie des sédiments) et du climat (variations du niveau de la mer, précipitations, etc.). La salinité peut être fortement influencée, voire accentuée par des activités humaines telles que l'aménagement du territoire, l'utilisation de sels de voirie et les rejets industriels.

2.2.1 Facteurs naturels

Contexte géographique

La proximité de l'eau salée provenant de la mer peut expliquer les variations de la concentration de sels dans l'eau. En effet, comme les fleuves sont soumis à une intrusion directe de l'eau de mer, la rencontre entre l'eau douce et l'eau salée dans la ZTS entraîne des changements dans les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (Gagnon, 1993).

Contexte hydrologique

Dans les bassins versants, la concentration de sels n'est pas constante. Le type d'écoulement, l'évaporation et l'apport d'eau des affluents et des eaux souterraines jouent un rôle important dans cette variabilité. Cependant, de tous les facteurs responsables de la variation de la concentration de sels dans l'eau de surface, le débit est le plus important. Il a été démontré que le cycle annuel du débit des rivières, qui est rythmé selon les saisons (crues au printemps et étiages en été), influence la concentration de sels d'une manière inversement proportionnelle (Meybeck, 1972). Cette relation a déjà été observée au Québec dans plusieurs rivières. La salinité diminue lorsque le débit augmente (par ex. : lors de crues) en raison du phénomène de dilution des eaux, alors que la salinité augmente lorsque le débit diminue (par ex. : lors d'étiages) (Trépanier, 2011).

Contexte géologique

La géologie peut expliquer en partie les variations observées dans les concentrations de sels dans l'eau, puisque l'eau érode et dissout la roche et le sol qu'elle traverse. Leur composition chimique a donc une influence sur la salinité. Au Québec, le contexte géologique distinct entre la rive nord et la rive sud du Saint-Laurent permet d'observer des concentrations différentes de sels dans les rivières (Painchaud, 1997). Les roches ignées du Bouclier canadien contiennent peu ou pas de sels, tandis que les roches sédimentaires de la Plateforme du Saint-Laurent et des Appalaches sont plus susceptibles d'en contenir. De plus, les vestiges de la mer de Champlain qui couvrait les basses terres du Saint-Laurent, il y a environ 11 000 ans, peuvent également expliquer la présence de sels dans l'eau (Painchaud, 1997).

Contexte climatique

Les changements climatiques auront un impact considérable sur la concentration de sels dans les eaux de surface, et ce, tant en milieu maritime qu'en milieu terrestre. Dans le sud du Québec, il est prévu que la modification du régime de précipitations, ainsi que l'allongement et l'intensification de la période d'évapotranspiration, entraîneront une baisse du niveau et du débit des cours d'eau (Ouranos, 2014). Comme la conductivité est inversement proportionnelle aux débits, cela aura comme conséquence d'augmenter la salinité de l'eau en été (Meybeck, 1972). L'augmentation elle-même sera variable d'une rivière à une autre, entre autres selon la conductivité naturelle des eaux souterraines.

Dans le fleuve Saint-Laurent, la hausse appréhendée du niveau de la mer provoquerait une augmentation de la salinité dans les zones où l'eau est actuellement douce ou saumâtre (Ouranos, 2014). Près de Québec, le débit du fleuve influence la position de la ZTS (Bourgault, 2001). Or, comme pour les rivières, le débit du Saint-Laurent en été pourrait diminuer dans le futur, en raison des phénomènes énumérés au paragraphe précédent.

2.2.2 Facteurs anthropiques

L'augmentation de la salinité de l'eau n'est pas unique aux fleuves. Des concentrations de sels anormalement élevées ont également été observées en milieu terrestre dans plusieurs lacs et rivières aux États-Unis (Mullaney et al., 2009; Corsi et al., 2010). Dans ces cas précis, les activités humaines associées à l'épandage de sels de voirie et à la densification du territoire ont été évoquées pour expliquer le phénomène.

NOTE

Une vaste étude réalisée sur l'ensemble du territoire canadien (EC, SC, 2001) mentionne que diverses sources anthropiques comme les sels de voirie, les eaux d'égout et les effluents industriels peuvent accroître la salinité des eaux souterraines et des eaux de surface. L'utilisation des sels de voirie fait partie des causes les plus souvent évoquées. Elle a entraîné la contamination de plusieurs réseaux municipaux d'approvisionnement en eau, notamment en Colombie-Britannique et en Nouvelle-Écosse.

L'aménagement du territoire

Le développement territorial a des conséquences majeures sur l'environnement, notamment sur le cycle de l'eau. L'imperméabilisation du sol, causée par l'aménagement des nouvelles infrastructures urbaines, conduit à une augmentation du ruissellement en surface. Or, en milieu urbain, les eaux de ruissellement peuvent contenir des taux élevés de matières en suspension et de contaminants divers, ce qui peut avoir une incidence sur la concentration en sels et autres substances. Ces eaux de ruissellement peuvent donc contaminer les plans et les cours d'eau limitrophes aux zones urbanisées. Les principales sources de contaminants proviennent des zones commerciales, des activités industrielles, des chantiers de construction et des aires de stationnement. L'aménagement de zones résidentielles peut également influencer le cycle de l'eau sur une partie du territoire (Boucher, 2010 et MELCC, 2014).

Utilisation de sels de voirie

L'épandage hivernal de sels sur les voies de circulation constitue une pratique régulière visant à assurer la sécurité routière des automobilistes. Or, une fois sur la chaussée, le sel se dissout dans l'eau de fonte puis s'infiltre dans le sol. L'eau percole ensuite vers les eaux souterraines et fait ultimement résurgence dans les ruisseaux. Le sel peut également atteindre directement les cours d'eau limitrophes aux routes par ruissellement de surface. D'une façon générale, la conductivité et la concentration en chlorures dans les rivières sont plus élevées près des autoroutes et des grands espaces de stationnement. La conductivité en hiver est d'ailleurs beaucoup plus grande et variable qu'en été pour les rivières urbaines. Les dépôts à neige, nombreux sur le territoire, peuvent constituer une source d'apports de sel dans les cours d'eau et des aquifères, car, lors de la fonte, les eaux s'infiltrent dans les sols ou sont canalisées dans des conduites pluviales.

Au Québec, il est maintenant reconnu que les sels de voirie ont des répercussions négatives sur la flore, sur la faune aquatique et terrestre, et même sur les nappes aquifères et les eaux de surface (Robitaille, 2011). Des concentrations de sels anormalement élevées ont été documentées dans plusieurs rivières et lacs, et ce, à proximité des prises d'eau potable. Les cas répertoriés au Cap-de-la-Madeleine, au Lac-à-la-Truite à Sainte-Agathe-des-Monts ainsi qu'à Trois-Rivières sont les premiers exemples au Québec confirmant le lien entre l'épandage de sels de voirie et la

contamination de la nappe aquifère et de l'eau de surface (Delisle, 1999; Gélinas et Locat, 1998; EC et SC, 2001). Les impacts potentiels associés à ces contaminants peuvent être importants pour les milieux récepteurs (Robitaille, 2011 et MDDELCC, 2014).

Dans la région, une concentration importante de sel dans les cours d'eau a été observée dans les bassins versants de la rivière Saint-Charles (APEL, 2009), de la rivière du Cap Rouge (Trépanier, 2011) et du lac Saint-Augustin (Morteau et al., 2006, Galvez et al., 2012). Les sels de déglçage empruntant les effluents sont identifiés comme la source principale de contamination des cours d'eau.

Les problématiques des lacs Saint-Augustin et Clément dans la région de Québec sont des situations très bien documentées qui témoignent de l'influence directe des sels de voirie sur l'environnement. Par exemple, le ruissellement et le lessivage des sels de voirie utilisés pour le tronçon de l'A-40 à Saint-Augustin-de-Desmaures entraînent une forte conductivité pour le lac, au-delà des seuils de toxicité pour la vie aquatique (tableau 4) (Galvez et al., 2012). De la même façon, l'A-73N induit une conductivité spécifique à l'affluent du lac Clément de l'ordre de 3 843 uS/cm. La conductivité de ce lac varie entre 500 et 2 000 uS/cm (APEL, 2016).

Tableau 4 – Résumé de la qualité des eaux dans le bassin versant du lac Saint-Augustin

Paramètre	pH	Conductivité (µS/cm)	Phosphore total (µg/L)
Eau lac	7,5 – 7,8	700 – 1 300	60 – 120
Eaux souterraines	7,4 – 7,5	425 – 925	40 – 60
Eaux de ruissellement	7,7 – 8,3	625 – 4 380	10

Rejets industriels

Les rejets industriels peuvent contenir de nombreux polluants, matières organiques et minérales, métaux, hydrocarbures, solvants, polymères, huiles, graisses, sels, dont certains influencent la conductivité de l'eau. Généralement, le phénomène s'atténue en s'éloignant du point de rejet. À long terme, certains rejets peuvent également provoquer une salinisation des aquifères (Santé Canada, 1987).

2.3 Enjeux municipaux de la salinité de l'eau, une problématique qui s'accroît

Sur le territoire de la CMQ, les enjeux liés à la salinité sont déjà mesurables et posent de multiples défis. D'abord, l'approvisionnement en eau à des fins de consommation constitue le principal enjeu lié à la salinisation de l'eau. Bien que la salinité actuelle aux prises d'eau se situe en deçà des critères de qualité d'eau potable, les villes de Québec et de Lévis se sont montrées préoccupées par les valeurs de conductivité observées. Les deux plus grandes UPE de la Ville de Québec mesurent la conductivité de l'eau en temps réel : celle de Sainte-Foy puise l'eau du fleuve à quelques centaines de mètres en amont sur le fleuve de l'embouchure de la rivière du Cap Rouge, et celle de Château-d'Eau, sur la rivière Saint-Charles près de Loretteville, à quelque 15 km de son embouchure (figure 2).

2.3.1 Impacts d'une eau « agressive »

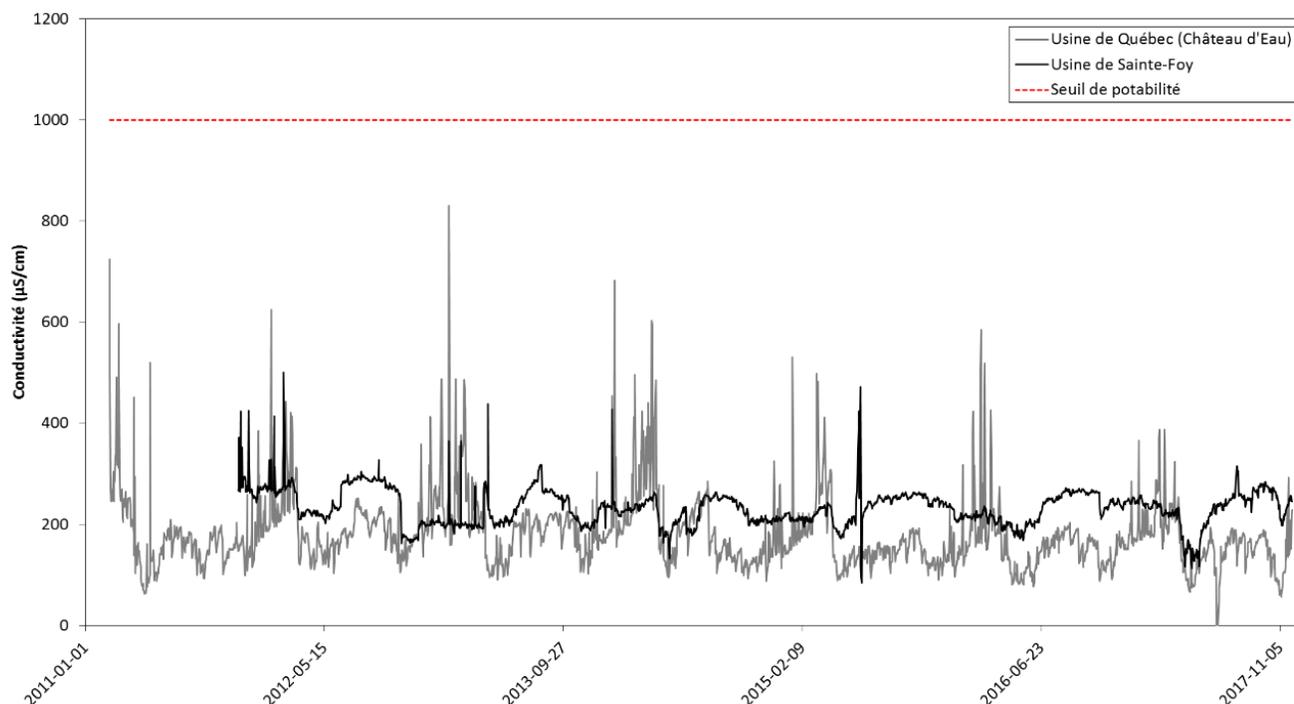
La dureté⁷ de l'eau et son acidité définissent son agressivité : une eau douce associée à un pH acide donne une eau « agressive » (Dassonville, 2013). Celle-ci a de nombreuses répercussions sur la corrosion des infrastructures, des bâtiments et des équipements en contact avec l'eau. Outre les sels de déglçage des routes, plusieurs autres variétés de sels sont disponibles dans

⁷ Une eau est dite « dure » lorsqu'elle est riche en éléments minéraux.

l'environnement. Certains sels dissous en milieux urbains peuvent provenir de l'altération, des bâtiments et des structures. La chaux et les fertilisants agricoles contribuent aussi à libérer des sels (PNAS, 2017).

La corrosion est l'un des principaux processus qui contribuent à la rupture des conduites, notamment en période de fonte (Agbenowosi, 2000). Lorsque la neige fond, l'eau et le sel s'infiltrant dans les fissures de la chaussée et corrodent l'armature des tuyaux (corrosion externe).

Figure 2 - Mesures de la conductivité maximale quotidienne ($\mu\text{S}/\text{cm}$) aux usines de production d'eau potable de Québec et de Sainte-Foy entre 2011 et 2017



Par ailleurs, la corrosion de certaines pièces des réseaux de distribution d'eau potable dans les bâtiments, tels que les tuyaux et les raccords métalliques, le revêtement intérieur en ciment des conduites et les tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC), peut avoir des effets néfastes indirects sur la santé. En effet, une eau trop conductrice peut entraîner le relargage de contaminants par corrosion des métaux, notamment le plomb, le cuivre et le fer lorsqu'ils sont présents dans le réseau d'aqueduc ou la plomberie domestique (Santé Canada, 2009).

En plus des enjeux sur la santé humaine et sur le plan économique, des conséquences environnementales associées à un changement du gradient de salinité dans la ZTS pourraient être néfastes pour certaines espèces (Gagnon, 1993). En effet, la ZTS présente des conditions qui favorisent le développement et la rétention d'organismes situés à la base de la chaîne alimentaire (zooplanctons, benthos) ainsi que l'établissement de marais à scirpe, habitats essentiels pour plusieurs espèces de poissons et d'oiseaux. Un changement dans les conditions de salinité pourrait avoir des modifications sur leur distribution (Cussons, 2011, Gauthier, 1980, Deschenes et Sérodes, 1985 et Dubé, 2013).

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Revue de littérature sur les problématiques de remontée de fronts salins

Un survol des études existantes a permis de répertorier plusieurs cas au Canada, aux États-Unis et en France aux prises avec une augmentation de la salinité à proximité des réseaux d'approvisionnement en eau (annexe 2).

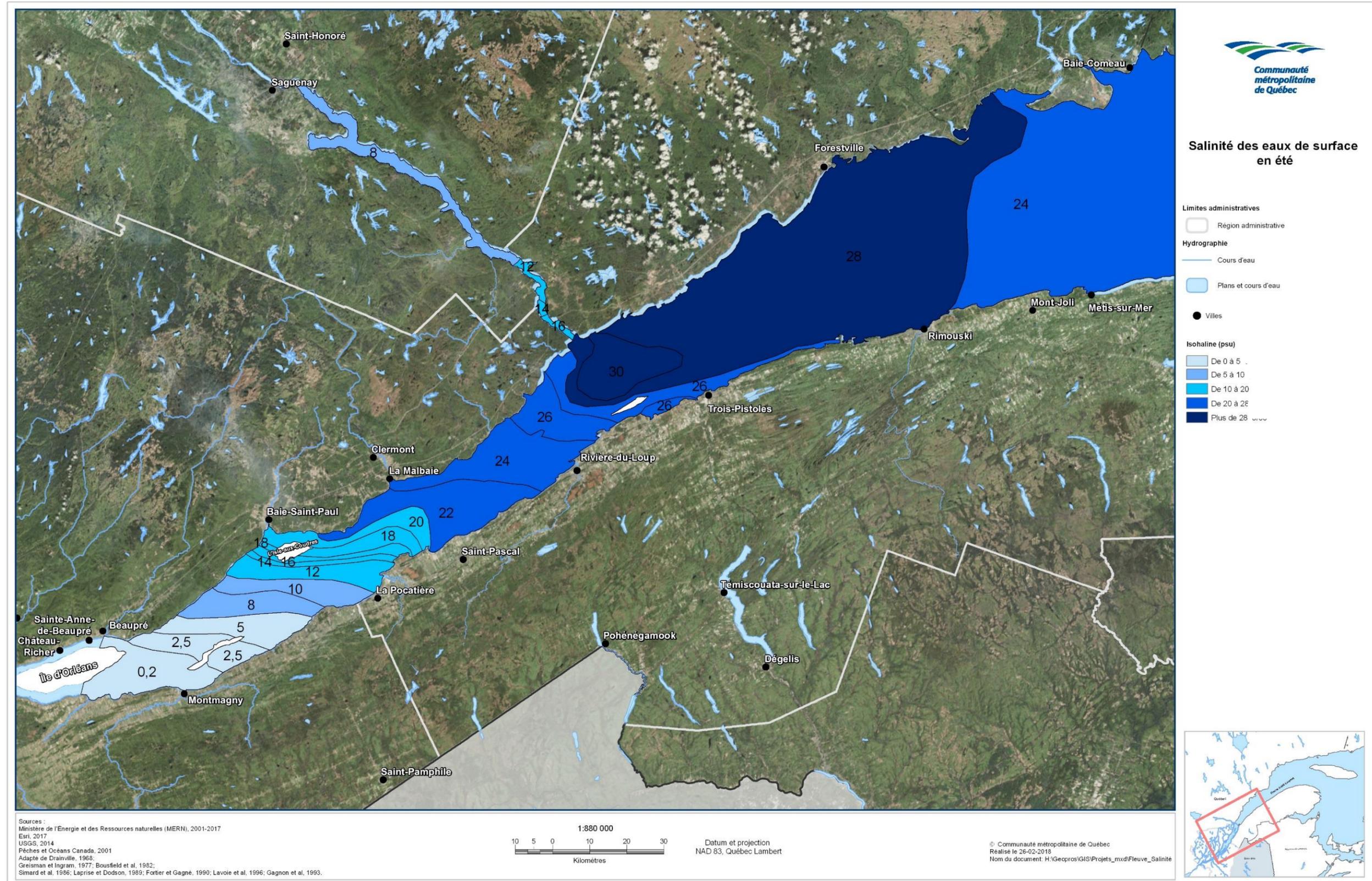
Au Canada, et plus spécifiquement dans les provinces maritimes, la hausse du niveau de la mer sous l'influence des changements climatiques a entraîné une contamination des eaux souterraines en zone côtière, par intrusion d'eau saline (SACA, 2011). Or, l'intrusion saline associée à la hausse du niveau de la mer n'est pas la seule cause évoquée dans la littérature canadienne.

Aux États-Unis et en France, la remontée du front salin est la cause la plus documentée pour expliquer l'augmentation de la salinité de l'eau dans les estuaires. Combinée à des activités humaines, la hausse du niveau de la mer sous l'influence des changements climatiques contribue à la remontée du front salin dans plusieurs estuaires des États-Unis (Furlow et al., 2002). Ce phénomène a été observé à de nombreux endroits sur la côte est Américaine (Furlow et al., 2002), notamment sur le fleuve Hudson (De Vries et Weiss, 2001), la Waccamaw River (Carolinas Integrated Sciences and Assessments and South Carolina Sea Grant Consortium, 2012; Conrad et al., 2007), le fleuve Delaware (Gibbons, 1986; Delaware Valley Regional Planning Commission, 2004; Philadelphia Water Department, 2007; Kreeger et al., 2010), ainsi qu'à Sacramento sur la côte ouest américaine (CCWD, 2010). Au fleuve Delaware, par exemple, la problématique est présente depuis fort longtemps. Une baisse du débit du fleuve survenue dans les années 60 à la suite d'un épisode historiquement chaud et sec a entraîné le déplacement du front salin (défini à 250 mg/L) sur près de 160 km. Le front salin a ainsi remonté jusqu'à 12 km de la prise d'eau potable desservant la ville de Philadelphie (Gibbons, 1986). Cet épisode de sécheresse s'est prolongé jusqu'en 1966, gardant ainsi les autorités en alerte pendant plusieurs mois. En 1965, les autorités ont procédé à l'évacuation d'eau emmagasinée dans les réservoirs, évitant ainsi des dommages importants aux utilisateurs qui s'approvisionnaient au fleuve. En novembre 2016, faisant suite à un autre épisode de sécheresse, le déplacement du front salin a atteint 143 km en amont, soit moins de 17 km de la position historique enregistrée dans les années 60. Comme en 1965, cette situation a forcé les autorités à évacuer de l'eau emmagasinée dans les réservoirs situés sur les affluents du fleuve afin de stabiliser la progression du front salin et de maintenir le front hors d'atteinte des prises d'eau potable (Delaware River Basin Commission, 2016).

3.2 Données disponibles sur la salinité du fleuve dans la région

En 2001, Pêches et Océans publiait une première cartographie de la salinité du fleuve dans l'estuaire moyen du fleuve s'appuyant sur des données d'inventaires partiels de travaux biologiques (figure 3). Toutefois, les données récentes sur la variabilité de la salinité dans la ZTS sont peu nombreuses. Parmi les études inventoriées, Saucier et al. ont réalisé, en 2009, une modélisation de la circulation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en réponse aux variations du débit d'eau douce et des vents.

Figure 3 - Salinité des eaux de surface du fleuve (compilation)



Bien que leurs travaux se soient concentrés à la limite en aval de la zone d'étude, les résultats suggèrent qu'une diminution de l'apport en eau douce du fleuve Saint-Laurent, associée au réchauffement climatique ou au développement, pourrait diminuer l'intensité de la circulation estuarienne au printemps et à l'été, et favoriser l'apport en eaux salées provenant du courant marin profond du chenal laurentien durant l'hiver. La variabilité de la salinité entre l'été et l'hiver a également été observée dans une étude réalisée à l'île d'Orléans, visant à analyser l'approvisionnement en eau au fleuve Saint-Laurent à des fins agricoles (BPR, 2008).

En 2006, près de 2 000 données de salinité ont été enregistrées dans le chenal sud de l'île. Ces mesures ont été prises par des thermosalinographes embarqués sur des navires commerciaux (MPO, D. Lefevre, communication personnelle). Les données révèlent également que la salinité du fleuve présente aussi des gradients verticaux et horizontaux qui peuvent être influencés par plusieurs facteurs, dont le jeu des marées et des courants. L'étude soulève également la préoccupation de l'effet potentiel des changements climatiques sur les régimes hydrologiques du fleuve et sur le déplacement potentiel du front salin vers l'amont.

Le groupe de recherche Québec Océan de l'Université Laval a aussi fait un premier inventaire sur le Saint-Laurent dans la région de Québec au cours de l'été 2017. Les résultats de cet inventaire seront bientôt disponibles et serviront à alimenter l'analyse dans le cadre des prochaines étapes.

3.3 Acquisition des données disponibles

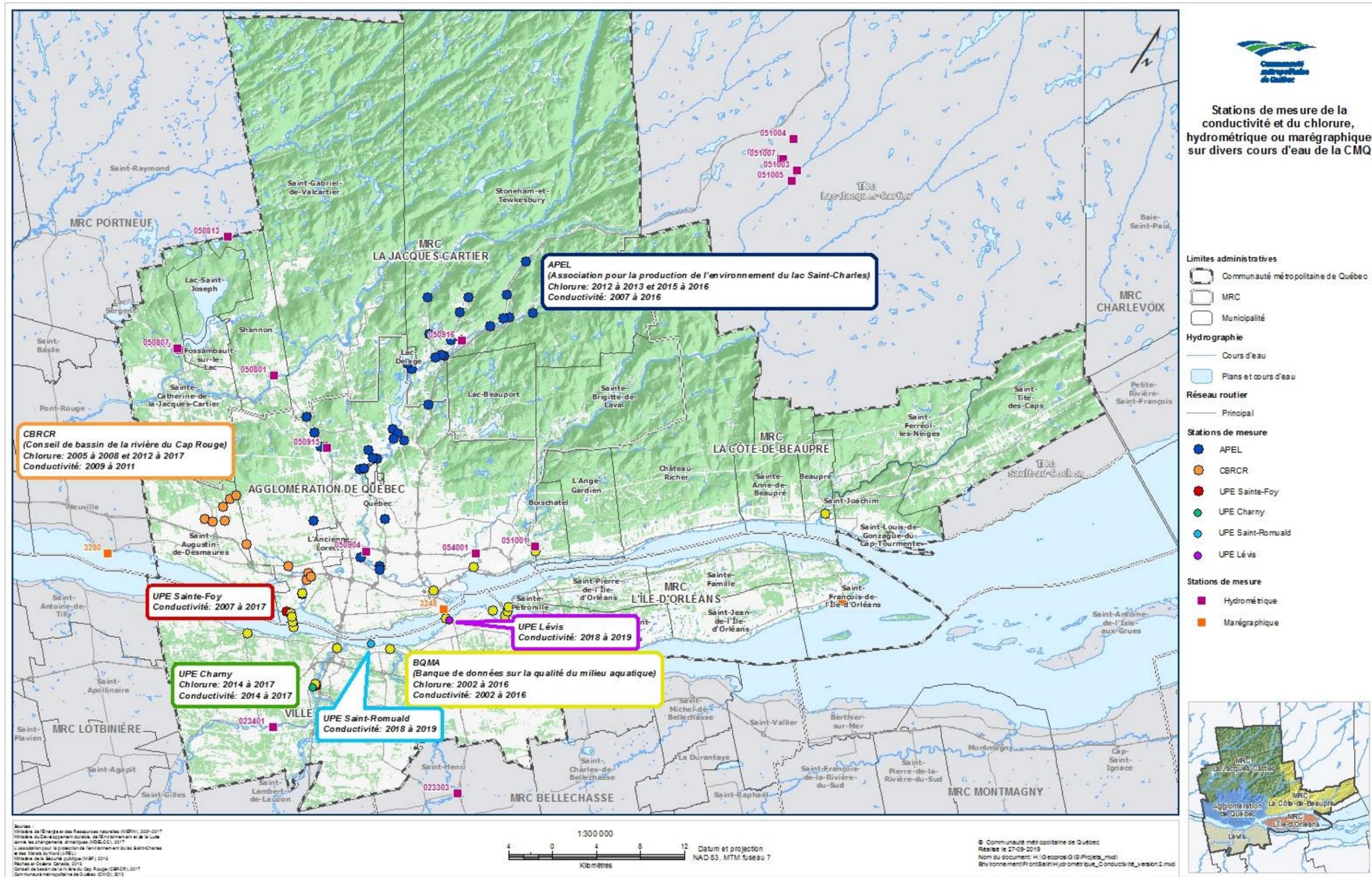
La plupart des données utilisées dans cette étude ont été acquises auprès des gouvernements, des villes, des organismes de bassins versants (OBV) et des conseils de bassin. La liste complète des données et de leurs caractéristiques se trouve au tableau 5.

Tableau 5 – Source de données

Paramètre	Territoire couvert	Provenance des données
Conductivité	Fleuve Saint-Laurent et ses affluents	Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA), MDDELCC
	UPE de Sainte-Foy	Ville de Québec
	UPE Château-d'Eau	Ville de Québec
	UPE Charny (secteur Charny)	Ville de Lévis
	UPE Desjardins (secteur Lévis)	Ville de Lévis
	UPE Saint-Romuald (secteur Saint-Romuald)	Ville de Lévis
	Bassin versant de la rivière Saint-Charles	Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL)
	Bassin versant de la rivière du Cap Rouge	Conseil de bassin de la rivière du Cap Rouge (CBRCR)
Chlorure	Fleuve Saint-Laurent et ses affluents	Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA), MDDELCC
	UPE Charny	Ville de Lévis
	Bassin versant de la rivière Saint-Charles	Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL)
	Bassin versant de la rivière du Cap-Rouge	Conseil de bassin de la rivière du Cap Rouge (CBRCR)
Quantités de fondant	Ville de Québec	Ville de Québec
Localisation, conductivité et chlorures aux sites de dépôt de neige usée	Ville de Québec	Ville de Québec
	Lévis	Ville de Lévis
Débit du fleuve	Station à LaSalle	Environnement et Changements climatiques Canada (ECCC)
Niveau d'eau du fleuve	Station marégraphique du port de Québec, de Neuville et au large de Saint-François-de-l'Île-d'Orléans	Service hydrographique du Canada, Pêches et Océans Canada
Précipitation	Pluviomètres de la Ville de Québec	Ville de Québec
Climatique	Stations météorologiques de l'aéroport Jean-Lesage, de Beauport, l'Université Laval, de l'île d'Orléans et autres	Environnement et Changements climatiques Canada (ECCC)
Débit des rivières	Montmorency, Chaudière, Etchemin, Saint-Charles, Beauport, Nelson, des Hurons et autres	Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MDDELCC (anciennement Centre d'expertise hydrique du Québec - CEHQ)

La figure 4 présente la localisation géographique de certaines stations de mesure sur le territoire en lien avec les données portant sur la conductivité et les chlorures ainsi que les stations de mesure hydrométrique ou marégraphique.

Figure 4 - Stations de mesure de la conductivité et du chlorure, hydrométrique ou marégraphique, sur divers cours d'eau



3.4 Données récentes sur la salinité aux UPE

Des analyses statistiques ont été réalisées à partir des données de conductivité et de concentrations en chlorures. Ces analyses permettent de dresser un portrait préliminaire de la variabilité spatiale et temporelle de la salinité sur le territoire de la CMQ. En comparant la conductivité et les chlorures aux données hydroclimatiques (niveau du Saint-Laurent, débits des rivières, température, précipitation), il est possible d'émettre des hypothèses sur les causes des pointes de salinité. Les données de conductivité acquises aux UPE de Sainte-Foy, Saint-Romuald et Lévis (Desjardins) sont décrites plus en détail dans le tableau 6.

Tableau 6 – Caractéristiques des données de conductivité aux usines

Source	Résolution temporelle	Années couvertes
UPE de Sainte-Foy	4 heures	2007-2017
	1 heure	2011-2017
	15 minutes	2014
UPE Desjardins (Lévis, secteur Lévis)	10 minutes	2018-2019
UPE Saint-Romuald (Lévis, secteur Saint-Romuald)	10 minutes	2018-2019

La résolution temporelle des appareils de mesure à l'usine de Sainte-Foy est d'environ 15 secondes, mais, compte tenu des volumes de données que cela représente, les résolutions temporelles listées au tableau ci-haut ont été jugées suffisantes pour l'étude.

Les données de conductivité et de chlorures acquises de la BQMA, de l'APEL et du CBRCR sont décrites dans le tableau 7.

Tableau 7 - Caractéristiques des données de conductivité et de chlorures

Localisation de la station	Provenance de la donnée	Nombre de stations actives en été (hiver)	Période la plus commune	Nombre de stations actives en été (hiver), catégorisées selon le nombre d'années de données disponibles			
Rive-Nord							
Conductivité				< 3	3-5	5-10	> 10
FLEUVE	BQMA	33 (9)	Mai Octobre	2 (2)		4 (1)	27 (6)
RIVIÈRES	BQMA	105 (98)	Mai Octobre	2 (11)	22 (20)	24 (17)	57 (50)
	APEL	36 (0)	Avril Novembre	6 (0)	6 (0)	24 (0)	
	CBRCR	5 (0)	Avril Décembre	5 (0)			
Rive-Sud							
Chlorures				< 3	3-5	5-10	> 10
FLEUVE	BQMA	8 (8)	Mai Octobre	2 (2)		6 (6)	
RIVIÈRES	BQMA	54 (1)	Mai Octobre	49 (0)	1 (1)	5 (0)	
	APEL	32 (0)	Avril Novembre	27 (0)	5 (0)		
	CBRCR	12 (0)	Avril Décembre	5 (0)	3 (0)	4 (0)	

Dans la majorité des cas, les échantillons sont prélevés une à deux fois par mois. L'APEL et le CBRCR mènent leurs campagnes de mesure de mars/avril à novembre/décembre, et donc n'ont aucune donnée en hiver, lors de l'épandage de sels de voirie.

Dans les ruisseaux et les rivières de faible profondeur, les échantillons se veulent représentatifs du milieu de la colonne d'eau. Pour les rivières plus profondes, l'échantillonnage est représentatif des cinq premiers mètres de la colonne d'eau (Hébert et Légaré, 2000 et MELCC, 2016).

Dans le contexte de l'étude actuelle, il est important de spécifier que les mesures de la BQMA effectuées dans le fleuve Saint-Laurent n'intègrent que le premier mètre de la colonne d'eau et sont donc représentatives des courants de surface (Anderson, C. (MELCC), conversation personnelle, 2017). Malgré le mélange des eaux dans l'estuaire fluvial provoqué par les marées, ces données ne sont probablement pas adéquates pour localiser précisément le front salin. L'eau froide et salée de l'océan Atlantique est plus lourde que l'eau douce du fleuve et, à Québec et à l'île d'Orléans, le fleuve peut atteindre 25 à 50 mètres de profondeur par endroits. De plus, étant donné que le Saint-Laurent est influencé par les marées, l'heure à laquelle l'échantillonnage est effectué peut avoir une incidence sur les valeurs de conductivité ou de concentration en chlorures. Dans la région de Québec, l'échantillonnage est amorcé 2 heures après le début de la marée descendante. Les stations sont échantillonnées de Cap-Rouge vers la pointe ouest de l'île d'Orléans.

Les stations de la BQMA disposent généralement de plus de 10 ans de données de conductivité, mais de moins de 3 ans pour les chlorures. Souvent, pour les chlorures, il s'agit même d'un seul été d'échantillonnage. Toutefois, sur le territoire de la CMQ, trois stations de la BQMA situées à l'UPE de Sainte-Foy, à la hauteur du Vieux-Québec et dans la rivière Saint-Charles mesurent les chlorures depuis plus de 5 ans.

Les données de l'APEL sont délimitées par la confluence des rivières Nelson et Saint-Charles. En amont, les mesures de conductivité ont généralement 5 à 10 ans d'historique. En milieu plus urbain, comme la rivière du Berger, les années d'acquisition de données sont souvent situées entre 2011 et 2013⁸. Il existe également quelques données de chlorures en 2012 et 2013, mais ce paramètre n'est mesuré systématiquement que depuis 2015. Sur la rivière du Cap Rouge, le CBRCR n'a mesuré la conductivité qu'entre 2009 et 2011. Toutefois, les chlorures sont mesurés depuis 2005, à l'exception des années 2009 à 2011, ce qui constitue l'historique de chlorures le plus long sur le territoire de la Ville de Québec. Les mesures de chlorures sur les échantillons prélevés par l'APEL et le CBRCR sont réalisées par le laboratoire accrédité de la Ville de Québec.

3.5 Méthode d'analyse statistique

3.5.1 Analyse de la variabilité spatiale et temporelle

Afin de mieux comprendre les causes des variations quotidiennes, saisonnières et interannuelles de salinité, une première analyse est effectuée sur les données aux usines (moins les pointes), en rivière et dans le fleuve Saint-Laurent. La répartition des stations d'observation de la BQMA, de l'APEL et du CBRCR permet également d'effectuer une analyse de la variabilité spatiale.

Dans le cas des données aux usines de Sainte-Foy, la résolution temporelle élevée et le long historique de mesures de conductivité permettent d'utiliser l'ensemble des données pour faire des analyses élaborées. Ce n'est toutefois pas le cas pour les stations dans les cours d'eau, qui sont généralement échantillonnées une fois par mois pour la conductivité et/ou les chlorures. De la même façon, les données provenant des usines de Saint-Romuald et de Lévis (Desjardins), qui s'échelonnent sur une seule année (2018-2019), doivent être utilisées prudemment.

⁸ L'OBV de la Capitale et la Ville de Québec ont suivi la rivière du Berger au cours des dernières années. Les données n'ont pas été prises en considération dans le cadre de ce projet.

Pour cette raison, ainsi qu'à cause de la relation inversement proportionnelle entre le débit et la concentration de sels dans l'eau (Meybeck, 1972), de la variation des sources potentielles de conductivité selon les saisons et des conditions climatiques différentes entre l'été et l'hiver pour la plupart des analyses, les données de conductivité ont été séparées en deux périodes, soit juin-novembre et décembre-mars (respectivement nommées « été » et « hiver » pour simplification). Pour la période hivernale, les stations échantillonnées qu'en décembre ou en mars ont été ignorées. De manière générale, les mois d'avril et de mai ont été exclus de l'analyse des cours d'eau. Comme la fréquence d'échantillonnage dans les rivières est trop faible pour capter le premier apport d'eau suivant l'amorce de la fonte, les mois typiquement associés à la crue printanière ont des valeurs très basses de conductivité, n'apportant pas d'information intéressante à l'étude actuelle.

Cette séparation en deux périodes n'a pas été réalisée pour les chlorures, parce qu'ils n'étaient généralement pas mesurés en hiver, hormis quelques stations de la BQMA sur le fleuve Saint-Laurent. Une analyse qualitative a permis de constater que pour ces stations, il n'existe pas vraiment de différence de chlorures entre les saisons. Cela peut s'expliquer par les forts débits du fleuve, qui favorisent une dilution importante des contaminants, ou l'échantillonnage en surface tel qu'expliqué précédemment.

Les données reçues de la BQMA spécifient que dans le contexte de la qualité de l'eau, il est souvent plus pertinent d'utiliser la médiane plutôt que la moyenne, parce que cette dernière est influencée par des valeurs extrêmes non représentatives de la réalité du milieu.

De manière similaire, certaines valeurs extrêmes sont trop élevées par rapport au reste des observations. Par exemple, le maximum estival pour la rivière Saint-Charles (BQMA) est de 2 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que la valeur suivante est de 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette valeur de 2 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ne semble donc pas réaliste et a probablement été causée par une contamination ponctuelle. Par conséquent, les valeurs extrêmes analysées dans ce rapport sont plutôt les 95^{es} centiles.

Les tendances sont basées sur des régressions linéaires. Un intervalle de confiance de 95 % (p value < 0,05) a été choisi pour identifier les tendances significatives. La relation linéaire a été jugée adéquate pour effectuer une étude d'ensemble. Sur certains points, un autre type de régression pourrait être préférable pour une analyse plus poussée.

3.5.2 Analyse des pointes de salinité aux usines

Nonobstant les seuils recommandés par Santé Canada, les pointes de salinité aux usines de Sainte-Foy, Saint-Romuald et Lévis (Desjardins) ont d'abord été identifiées visuellement, afin de déterminer les valeurs « anormales » pour ces usines et les dates auxquelles ces pointes surviennent. Dans un premier temps, ces pointes ont été présentées aux techniciens des usines de production d'eau potable afin de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'une opération de maintenance ou d'une erreur des appareils de mesure. Par exemple, une importante pointe de quinze jours, en juin 2015, a été jugée irréaliste par le technicien responsable des opérations de l'usine; il s'agirait d'une défectuosité de l'appareil de mesure. Pour les pointes réelles, une analyse des conditions météorologiques (températures minimales et maximales, précipitations) et des débits en rivière a été effectuée afin d'identifier les conditions ayant provoqué ces pointes.

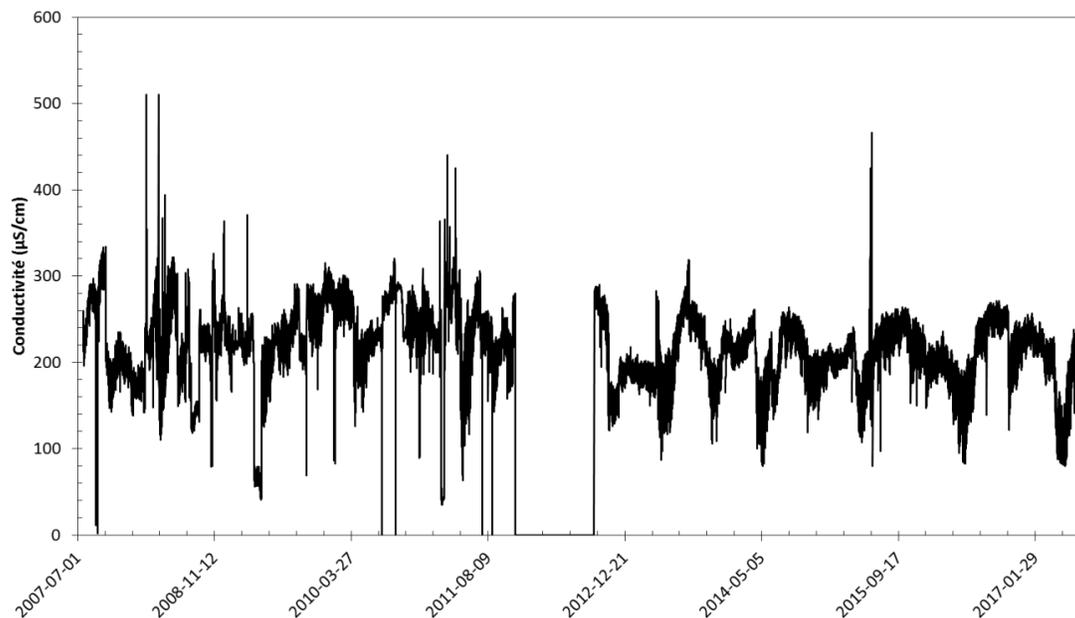
4. RÉSULTATS

La section 3.1 présente les analyses de la variabilité spatiale et temporelle des données de conductivité et de chlorures pour l'UPE Sainte-Foy. La section 3.2 présente une analyse similaire, mais pour les UPE de Saint-Romuald et de Lévis (Desjardins). La section 3.3 présente, à titre comparatif, l'analyse des pointes de conductivité observées dans d'autres rivières sur le territoire ainsi qu'à l'usine de Château d'eau.

4.1 UPE de Sainte-Foy

Les données de l'usine de Sainte-Foy illustrent que la conductivité fluctue en fonction des débits du fleuve Saint-Laurent et de la phase de la marée, mais se maintient généralement sous les 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 5). Il peut être noté que la conductivité est similaire en hiver et en été et que, certaines années, la conductivité estivale est même plus élevée. D'ailleurs, les données de l'usine de Sainte-Foy ne correspondent que de manière grossière à la relation conductivité-débit décrite par Meybeck (1972). Cela s'explique principalement par le fait que les relations décrites par Meybeck s'appliquent aux rivières, tandis que dans le fleuve près de Québec, nous notons des inversions de courant et un brassage des eaux dus aux marées. À cela s'ajoutent la présence possible de courants locaux, de points de rejet (ouvrages de surverse, égouts pluviaux et autres), ainsi que l'influence probable de la bathymétrie complexe du fleuve près de Québec sur la répartition des contaminants. Ces hypothèses pourront être testées lors des campagnes d'échantillonnage et de la modélisation du fleuve prévues dans les prochaines étapes du projet.

Figure 5 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable de Sainte-Foy de 2007 à 2017



Note : Après vérification auprès des techniciens de l'usine, les valeurs près de 0 sont causées par des opérations de calibration et de maintenance. D'une manière similaire, la pointe d'une quinzaine de jours, observée en juin 2015, ne semble correspondre à aucun événement réel. La prise d'eau a été déplacée en 2012, entre autres à cause des pointes de conductivité observées entre 2007 et 2011. Cela explique également la longue période sans données en 2012.

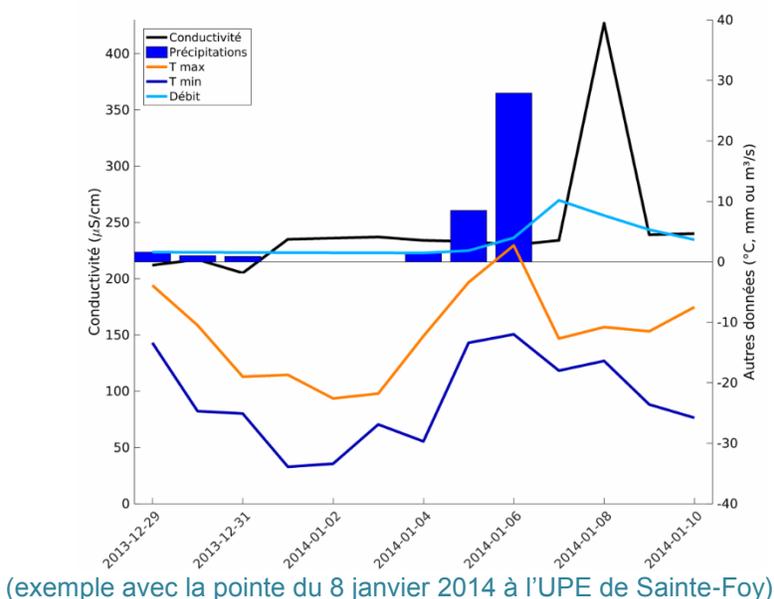
En été et en hiver, la conductivité varie de manière inversement proportionnelle aux débits. Toutefois, en hiver, plusieurs pointes de salinité sont observées à l'UPE de Sainte-Foy. Elles durent entre 30 minutes et 2 heures, montent à des valeurs 2 à 3 fois plus élevées que la conductivité

actuelle et ne surviennent qu'en hiver. Pour les fins de l'analyse, les pointes ont été identifiées comme une journée où la conductivité est au moins 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au-dessus des journées avoisinantes.

Entre 2011 et 2017, 10 pointes sont observées à l'UPE de Sainte-Foy. Dans tous les cas, les pointes surviennent à la suite de conditions météorologiques similaires, soit des précipitations alors que la température minimale est sous 0°C , mais que la température maximale est au-dessus de 0°C . Selon le moment de la journée où surviennent les précipitations, il s'agit de conditions dangereuses pour le réseau routier (grésil, pluie verglaçante, pluie pouvant glacer pendant la nuit). Il est donc possible qu'une opération d'épandage de sel ait eu lieu lors de ces journées, ce qui aurait provoqué une pointe de salinité aux usines quelques jours plus tard, voire la journée même. Pour ces conditions défavorables, l'apparition ou non d'une pointe de salinité ne semble pas dépendre d'un seuil précis de précipitation ou de température. Cela laisse supposer que l'action de la Ville quant à l'épandage ou non de sel est du cas par cas, probablement influencé par les prévisions météorologiques.

Les débits en rivières ne semblent pas être un bon indicateur pour prévoir l'apparition de pointes de salinité. Dans plusieurs cas, aucun changement n'est observé dans les journées avoisinantes. Cela confirme toutefois que ces brefs redoux hivernaux accompagnés de précipitations ne sont généralement pas suffisants pour faire fondre le couvert de neige et augmenter les débits. Par conséquent, il est possible que les sels de déglacage soient amenés vers les rivières par les réseaux d'égouts pluviaux ou les surverses de réseaux unitaires. Une autre hypothèse plausible serait que les sels sont transportés par les eaux souterraines, mais le temps de transit est probablement trop lent pour expliquer les pics. Cela pourrait être exploré lors des campagnes d'échantillonnage à venir. L'usine de Sainte-Foy s'approvisionne dans le fleuve et est donc possiblement moins sensible à l'application de sels de déglacage sur le territoire de la Ville. Les pratiques d'épandage de sel et la configuration du réseau d'égouts pluviaux et unitaires pourraient également avoir un impact. Un exemple de condition typique amenant une pointe de salinité est présenté à la figure suivante (6).

Figure 6 - Conditions typiques amenant une pointe de salinité

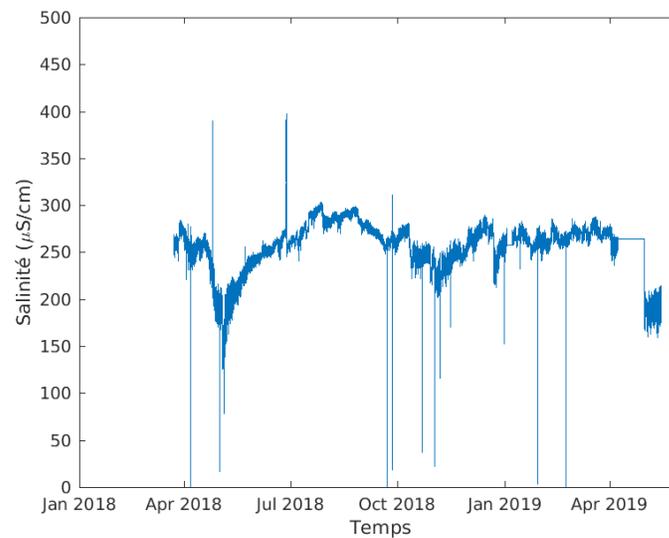


Note : Les débits sont ceux de la rivière Saint-Charles, mais fournissent tout de même une information sur la fonte possible de neige sur le territoire.

4.2 Prises d'eau de Saint-Romuald et de Lévis (Desjardins)

Les figures 7 et 8 illustrent les données de conductivité des usines de Saint-Romuald et de Lévis (Desjardins). Des pointes de salinité sont observées dans les données des usines de Lévis et de Saint-Romuald. La date, la conductivité maximale, la durée et les causes probables des pointes sont présentées à la figure 9 de la page suivante. Pour les fins de l'analyse, les pointes ont été identifiées comme une donnée plus grande que 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les pointes durent entre 10 minutes et 2 heures et montent à des valeurs environ 1.5 fois plus élevées que la conductivité actuelle. Une seule pointe est commune aux deux usines, celle du 16 septembre 2018. Les données illustrent également que la conductivité fluctue de façon inversement proportionnelle aux débits du fleuve.

Figure 7 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable Saint-Romuald de 2018 à 2019



Note : les valeurs de 0 sont jugées comme étant aberrantes.

Le technicien des UPE de Sainte-Foy et de Château-d'Eau avait alors validé cette hypothèse.

Figure 8 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable Desjardins de 2018 à 2019

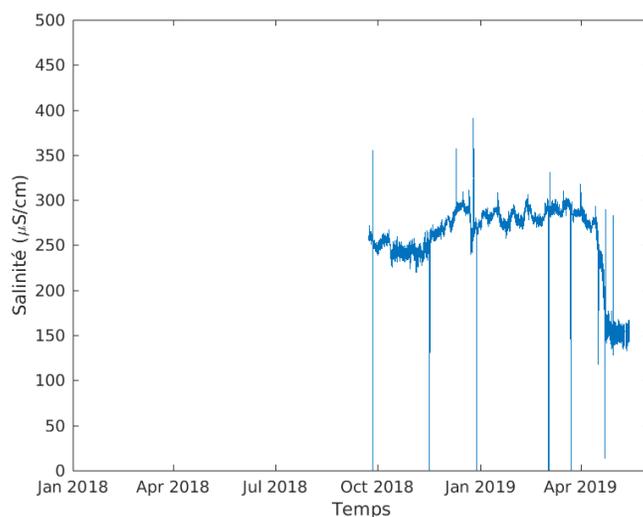
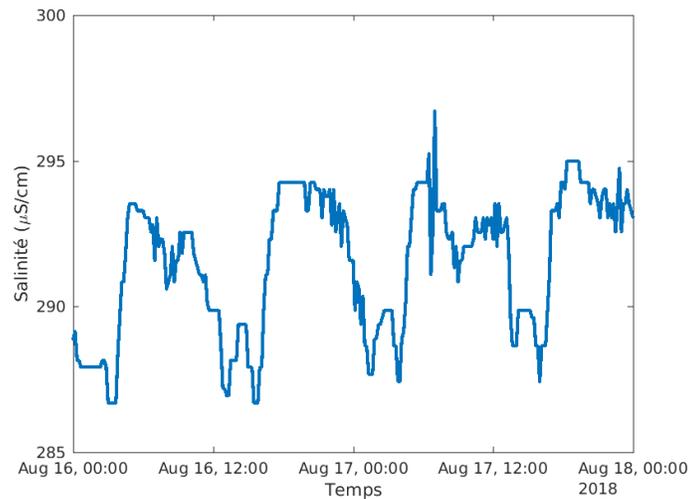


Figure 9 - Date, conductivité maximale, durée et cause probable des pointes des données de conductivité aux usines de production d'eau potable Desjardins et Saint-Romuald de 2018 à 2019

Date	Usine Saint-Romuald	Usine Desjardins	Causes probables
	Conductivité µS/cm (Durée min)		
25 avril 2018	390 (160)		Précipitations hivernales, redoux Sels de déglaçages
27 juin 2018	397 (110)		Entretien & calibration
26 septembre 2018	311 (10)	355 (90)	Entretien & calibration
10 décembre 2018		356 (30)	Entretien & calibration
21 décembre 2018		311 (20)	Précipitations hivernales, redoux Sels de déglaçages
25 décembre 2018		390 (20)	Précipitations hivernales, redoux Sels de déglaçages
4 mars 2019		330 (30)	Précipitations hivernales, redoux Sels de déglaçages
16 mars 2019		(310) (10)	Précipitations hivernales, redoux Sels de déglaçages
31 mars 2019		317 (20)	Précipitations hivernales, redoux Sels de déglaçages

À l'usine de Saint-Romuald, il est noté que la conductivité est plus petite au printemps lors de la crue et plus élevée en été lors de l'étiage. La conductivité se maintient généralement sous les 300 µS/cm. Les données varient également en fonction des phases de la marée (figure 10).

Figure 10 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable Desjardins – Influence de la marée sur la conductivité

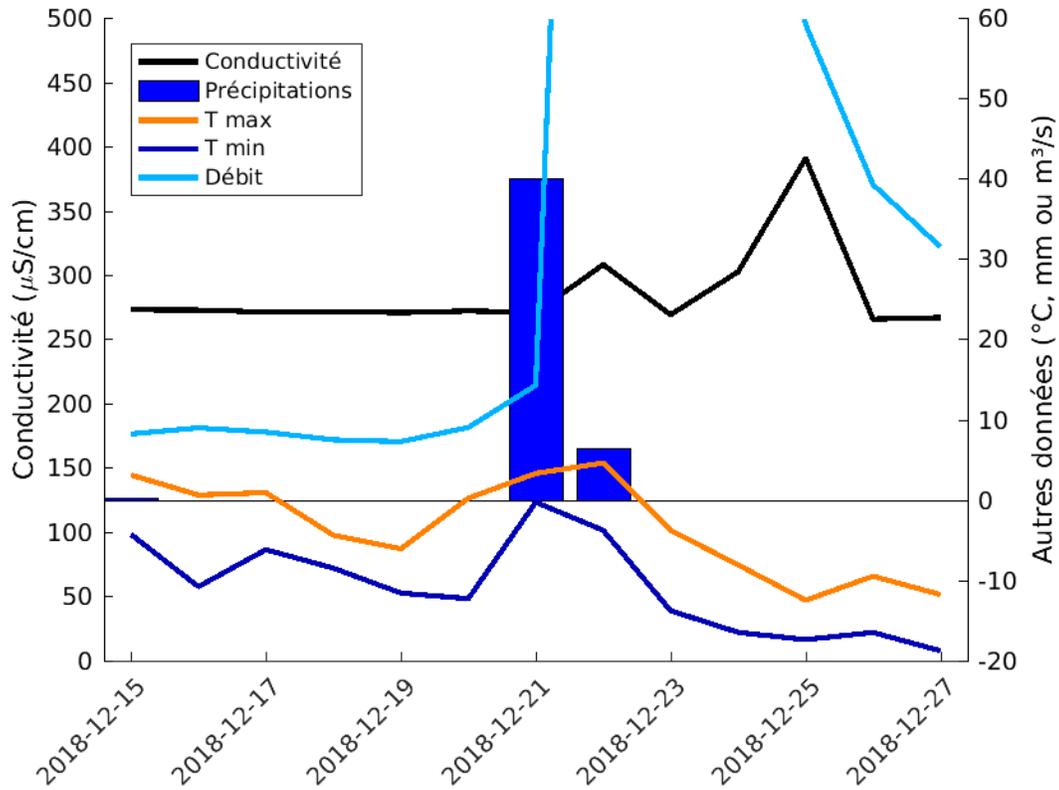


Comme à la prise d'eau de Sainte-Foy, les pointes surviennent à la suite de conditions météorologiques similaires, soit des précipitations alors que la température minimale est sous 0°C, mais que la température maximale est au-dessus de 0°C. Selon le moment de la journée où surviennent les précipitations, il s'agit de conditions dangereuses pour le réseau routier (grésil, pluie verglaçante, pluie pouvant glacer pendant la nuit). Il est donc possible qu'une opération d'épandage de sel ait eu lieu lors de ces journées, ce qui aurait provoqué une pointe de salinité aux usines quelques jours plus tard, voire la journée même. Pour ces conditions défavorables, l'apparition ou non d'une pointe de salinité ne semble pas dépendre d'un seuil précis de précipitation ou de température. Cela laisse supposer que l'action de la Ville quant à l'épandage ou non de sel est du cas par cas, probablement influencé par les prévisions météorologiques.

Trois pointes de salinités, celles du 27 juin, du 26 septembre et du 10 décembre, ne peuvent pas être reliées aux sels de déglçage par des conditions météorologiques. Pour ces pointes, le technicien de l'usine a vérifié les valeurs de turbidité et de pH. Les valeurs fluctuent au même moment que les pointes de conductivité. Ceci indique une opération de calibration ou de maintenance à cause de la disposition des appareils de mesure à l'UPE.

Un exemple de conditions typiques amenant une pointe de salinité est présenté à la figure 11. Le nombre plus élevé de pointes à Desjardins qu'à Saint-Romuald en hiver laisse croire à des directions de conditions très localisées d'écoulement pour expliquer les pointes de salinité.

Figure 11 - Conditions typiques amenant une pointe de salinité (exemple avec la pointe du 25 décembre à l'usine Desjardins)



Note : Les débits sont ceux de la rivière Etchemin, et les conditions météorologiques sont celles de la station à l'aéroport Jean-Lesage. Elles sont présentées à titre informatif pour illustrer la fonte possible de neige sur le territoire.

4.3 Stations dans le Fleuve Saint-Laurent

Le tableau 8 présente les valeurs de conductivité au fleuve Saint-Laurent dans la région de Québec pour la période de 2002-2016. Noter qu'il n'existe pas d'échantillonnage en hiver dans cette section du fleuve, sauf à la hauteur des prises d'eau potable. Les valeurs médianes et maximales permettent d'observer s'il existe une variabilité spatiale entre les stations et de déterminer la période de l'année lors de laquelle la valeur maximale a été enregistrée.

Bien qu'il y ait une mise en garde des données de conductivité provenant des stations au fleuve en raison de l'échantillonnage en surface (voir section méthodologie), les résultats indiquent une légère variabilité spatiale : la conductivité des eaux de surface est en effet plus faible du côté nord que du côté sud, soit 230 µS/cm en moyenne, par rapport à 255 µS/cm. Ce phénomène s'explique principalement par le fait que la rivière des Outaouais, qui compte un pourcentage important des eaux du fleuve, possède des valeurs très basses de conductivité (100 µS/cm) par rapport aux eaux des Grands Lacs, qui sont plutôt de 280 à 300 µS/cm. À la hauteur de Trois-Rivières, par exemple, les eaux de la rivière des Outaouais peuvent compter pour près de 50 % de l'eau du côté nord du fleuve (Martin et al., 2016). À cela s'ajoute la contribution des grandes rivières de la rive nord du Saint-Laurent, dont les rivières Saint-Maurice, Batiscan, Sainte-Anne et Jacques-Cartier, qui ont toutes des conductivités très faibles.

La comparaison entre les valeurs médianes et maximales indique également une faible variabilité temporelle : la différence entre les conditions médianes et le 95^e centile pour la période d'été est d'environ 20 à 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs maximales sont d'ailleurs atteintes presque toutes les années. La station de Cap Rouge Nord enregistre le plus grand écart, avec une valeur médiane de 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une valeur maximale de 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ atteinte au mois d'août. Le mois d'août est d'ailleurs le mois de la période estivale le plus commun pendant lequel les stations au fleuve enregistrent des valeurs maximales.

À l'exception de la station de mesure située à la hauteur de la prise d'eau de Sainte-Foy, aucune tendance n'a été détectée pour la conductivité ou les chlorures, autant du côté nord que du côté sud du fleuve. À Sainte-Foy, une diminution d'environ 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a été notée en hiver entre 2002 et 2008, mais les données sont stables depuis cette époque.

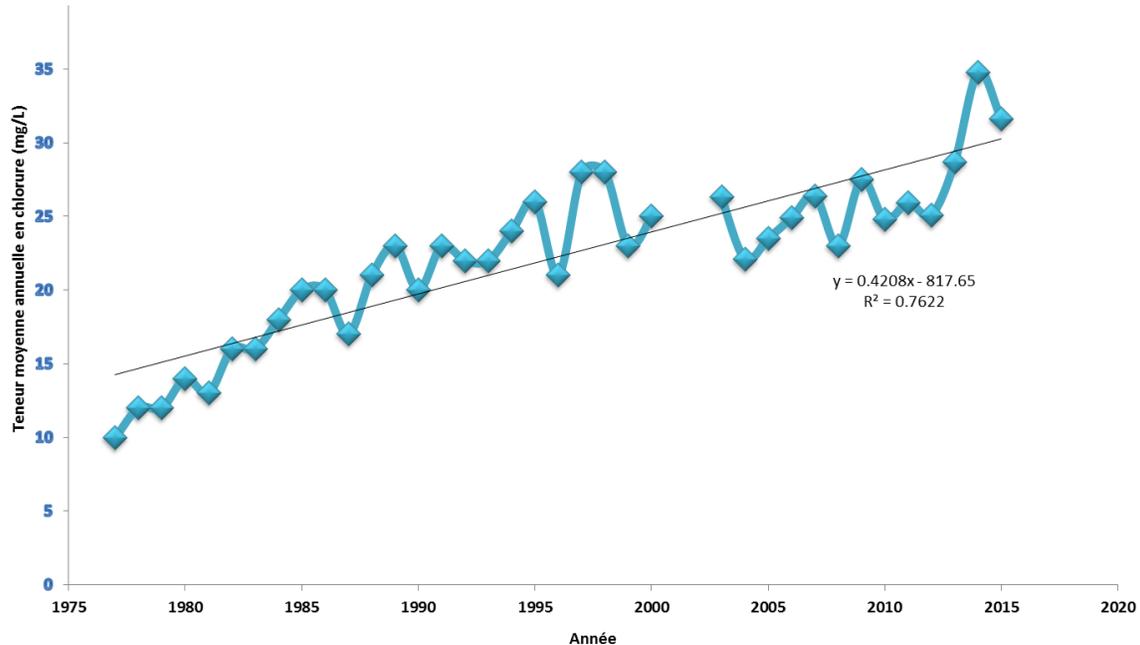
Tableau 8 - Conductivité médiane et maximale aux stations de la BQMA dans le fleuve Saint-Laurent

Fleuve Saint-Laurent	Années	Médiane - été			95 ^{es} centiles - été			Médiane - hiver		95 ^{es} centiles - hiver	
		Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mois	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mois	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mois	
Cap-Rouge (Nord)	2002-2016	230	270	Août	-	-					
Cap-Rouge (Centre)	2002-2016	250	270	Août	-	-					
Cap-Rouge (Sud)	2002-2016	255	280	Août	-	-					
Chenal sud Î.O. (Nord)	2002-2016	250	280	Août	-	-					
Chenal sud Î.O. (Centre)	2002-2016	250	280	Août	-	-					
Chenal sud Î.O. (Sud)	2002-2016	250	280	Août	-	-					
Fleuve, à la hauteur de la prise d'eau de Sainte-Foy	2012-2016	213	250	Sept.	210	250	Fév.				
Fleuve, à la hauteur de la prise d'eau de Lévis	2014-2016	265	290	Nov.	250	266	Fév.				
Fleuve, à la hauteur de la prise d'eau de Lauzon	2002-2014	250	280	Août	250	274	Mars				

4.4 Rivières du territoire de la CMQ et prise d'eau de Québec (Château-d'Eau)

Tels que présentés à la figure 12, les suivis effectués par la Ville de Québec à la prise d'eau de la rivière Saint-Charles tendent à démontrer une augmentation graduelle de la salinité dans les aquifères et les cours d'eau depuis 1975 (Proulx, 2016).

Figure 12 - Évolution de la teneur moyenne annuelle en chlorures dans l'eau brute de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles entre 1977 et 2016



Source : Proulx, 2016

Le tableau 9 de la page suivante présente les valeurs de conductivité des rivières de la région de Québec. Sauf lorsque spécifié autrement, les stations d'échantillonnage se trouvent à l'embouchure des rivières, en-dehors de l'influence du fleuve.

À l'exception des rivières fortement urbanisées telles que du Cap Rouge, Saint-Charles et Beauport, les résultats indiquent que les rivières situées sur la rive sud ont des valeurs de conductivité plus élevées que celles situées sur la rive nord. Cette différence est liée en partie au contexte géologique et à l'occupation du territoire.

Tableau 9 - Conductivité médiane et maximale des rivières de la région de Québec (BQMA)

Rivières	Année	Médiane - été	95 ^e centile - été		Médiane - hiver	95 ^e centile - hiver	
		COND (μ S/cm)	COND (μ S/cm)	Mois	COND (μ S/cm)	COND (μ S/cm)	Mois
RIVE-NORD							
Jacques-Cartier	2002-2008	42	60	Sept.	65	80	Mars
Jacques-Cartier (prise d'eau de Donnacona)	2008-2016	57	90	Sept.	65	110	Mars
Du Cap Rouge	2012-2016	640	800	Juil.	710	1325	Mars
Saint-Charles	2002-2016	380	627	Août	625	1631	Mars
Beauport	2002-2016	675	841	Oct.	880	2040	Mars
Montmorency	2004-2016	37	60	Août	-	-	-
RIVE-SUD							
Aulneuse	2012-2016	280	455	Sept.	-	-	-
Chaudière (prise d'eau de Charny)	2002-2016	140	215	Oct.	160	233	Mars
Chaudière	2002-2016	140	233	Oct.	-	-	-
Etchemin	2002-2016	150	257	Oct.	177	283	Mars

Les données indiquent que les valeurs maximales sont enregistrées entre août et octobre pour la période estivale, et au mois de mars durant la période hivernale. Dans les deux cas, il s'agit de mois où le débit en rivière est généralement très bas et, donc, où la dilution potentielle des contaminants est à son minimum. L'analyse des données de conductivité permet également, de façon générale, de classer les rivières en trois catégories, soit :

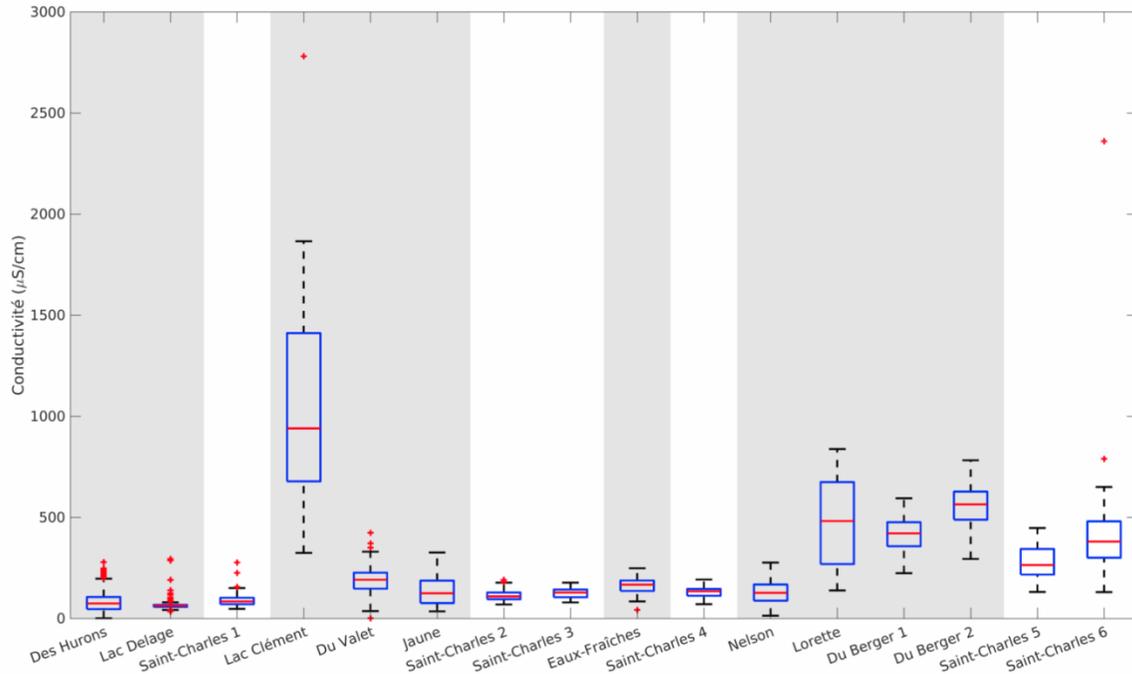
1. les rivières de la rive nord, peu influencées par les activités humaines (Jacques-Cartier et Montmorency) : les valeurs médianes de conductivité sont de moins de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On observe un faible écart entre les valeurs médianes et maximales et elles se classent parmi les plus faiblement conductrices de la base de données acquise du BQMA. Cela correspond bien aux observations de Painchaud (1997);
2. les rivières « agricoles » (Aulneuse, Chaudière et Etchemin) : les valeurs médianes de conductivité se situent entre 100 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On note un écart modéré entre les valeurs médianes et maximales et elles se classent dans la moyenne de la base de données acquise du BQMA. Encore une fois, cela correspond bien aux observations de Painchaud (1997);
3. les rivières « urbaines » (du Cap Rouge, Saint-Charles et Beauport) : les valeurs médianes de conductivité sont de plus de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour au moins une saison. On observe un écart élevé entre les valeurs médianes et maximales et elles se classent parmi les plus conductrices de la base de données acquise du BQMA.

4.4.1 Rivières urbaines

Les rivières du Cap Rouge, Saint-Charles et Beauport ont les valeurs de conductivité les plus élevées dans la région de Québec et sont parmi les plus conductrices de la base de données acquise de la BQMA. Ces rivières sont situées dans un environnement fortement urbanisé. Le bassin versant de la rivière Saint-Charles a été très documenté dans les dernières années. Grâce aux données de l'APEL et du CBRCR, les points où la conductivité est la plus élevée ont pu être localisés et correspondent à la présence d'autoroutes, d'aires de stationnement et, généralement, de régions plus fortement urbanisées.

Comme exemple, l'affluent du lac Clément, situé en bordure de l'A-73, se démarque par sa conductivité très élevée (figure 13). En 2010, une campagne d'échantillonnage de l'APEL a d'ailleurs noté des concentrations en chlorures à la surface du lac entre 138 et 178 mg/L, et des concentrations en profondeur situées entre 135 et 315 mg/L (Brodeur et Trépanier, 2013). Or, dans le Bouclier canadien, les concentrations de chlorures dans l'eau de surface varient normalement de 1 à 10 mg/L (Santé Canada, 2001). Des concentrations aussi élevées qu'au lac Clément ont également été notées dans d'autres lacs de la région. Dans tous les cas, les sels de voirie ont été indiqués comme la source principale de contamination (Brodeur et Trépanier, 2013).

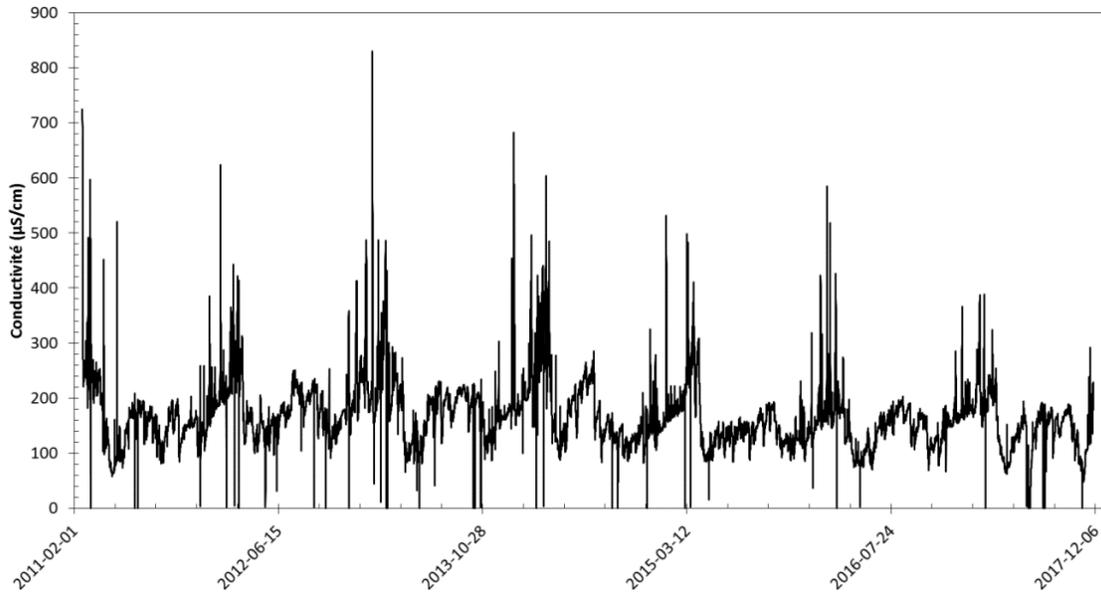
Figure 13 - Dispersion des mesures de conductivité sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles, selon la base de données de l'APEL



Note : Les stations sont listées de l'amont vers l'aval. Les tributaires sont indiqués en gris et sont ordonnés en fonction de la localisation de leur confluence avec la rivière (ou le lac) Saint-Charles. Chaque section de la boîte à moustache (boxplot) représente 25 % des données. La ligne rouge illustre donc la médiane. Les valeurs trop extrêmes pour être incluses dans la boîte à moustache sont illustrées séparément, à l'aide d'une croix rouge.

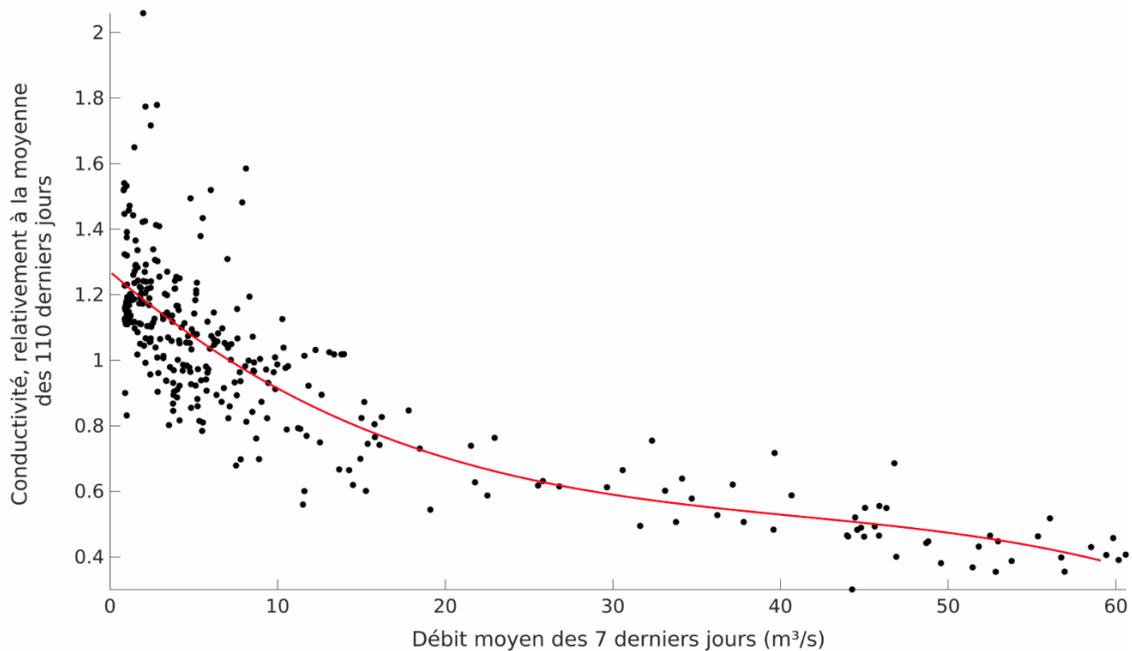
Concernant l'usine de Château-d'Eau, les données récoltées confirment une conductivité anormalement élevée dans la rivière Saint-Charles (figure 14). Contrairement à l'usine de Sainte-Foy présentée précédemment, il existe une différence marquée entre les valeurs de conductivité en été (< 200 µS/cm, aucune pointe) et en hiver (> 300 µS/cm, plusieurs pointes). La conductivité à Château-d'Eau (moins les pointes hivernales) peut être expliquée par la relation conductivité-débit décrite par Meybeck (1972), qui lie une conductivité relative au débit moyen (figure 15).

Figure 14 - Données brutes de conductivité à l'usine de production d'eau potable de Château-d'Eau de 2011 à 2017



Note : Les valeurs à 0 correspondent à des opérations de maintenance.

Figure 15 - Relation entre le débit et la conductivité à l'usine de Château-d'Eau pour 2017

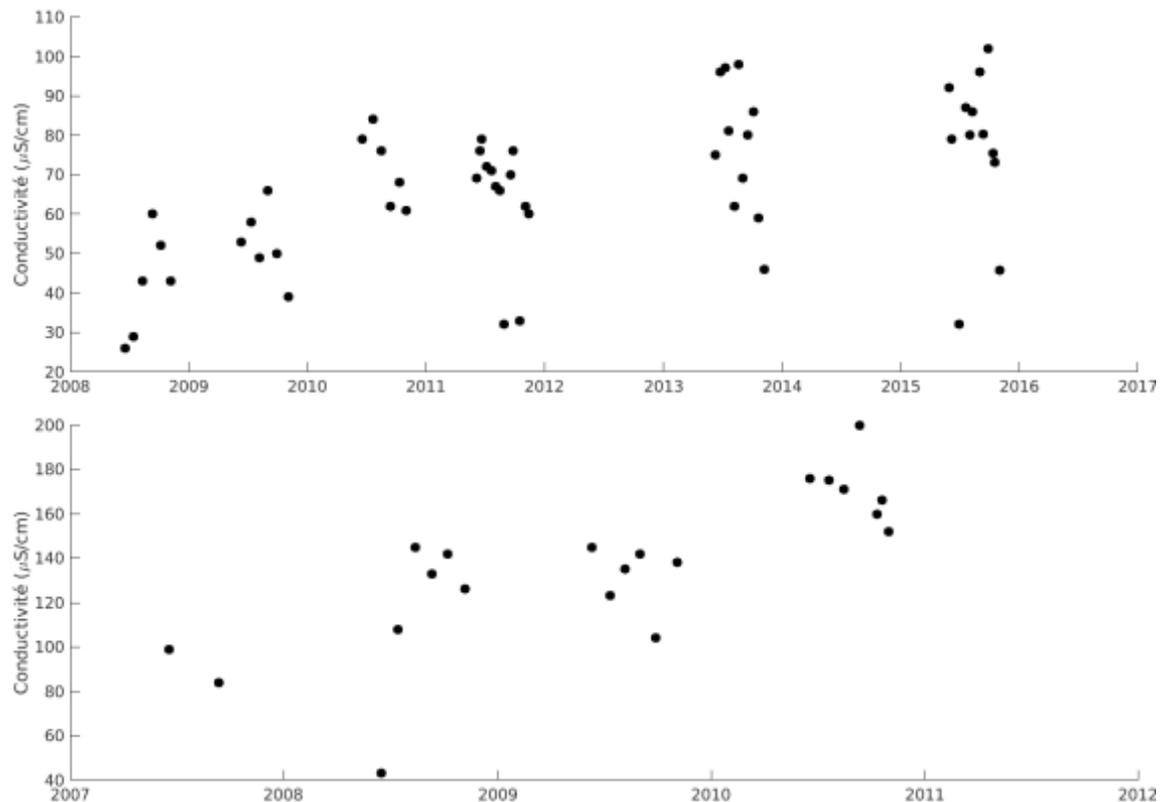


Note : Le nombre de jours optimal requis pour les moyennes (dans ce cas, 110 pour la conductivité et 7 pour le débit) varie d'une année à une autre.

Les données de conductivité échantillonnées par l'APEL révèlent également qu'en amont du lac Saint-Charles, plus de la moitié des points de mesure affichent une augmentation de la conductivité dans les dernières années. Par exemple, la **figure 16** illustre la conductivité à la station E51 de

l'APEL, sur la rivière des Hurons. Entre 2008 et 2016, la conductivité dans la rivière a doublé. La situation est similaire en aval du lac Saint-Charles, où le ruisseau des Eaux-Fraîches et la rivière Nelson indiquent une augmentation de la conductivité estivale.

Figure 16 - Conductivité mesurée à (haut) la rivière des Hurons et (bas) au ruisseau des Eaux-Fraîches



4.4.2 Rivières non urbaines de la rive nord

Les rivières Jacques-Cartier et Montmorency ont les valeurs de conductivité les plus faibles des rivières échantillonnées dans la région de Québec. Ces rivières sont peu influencées par les activités humaines et sont dominées par la forêt. La conductivité observée dans ces rivières dites naturelles correspond bien aux différences notées entre les rivières de la rive sud et de la rive nord du fleuve, en raison du contexte géologique et humain (Painchaud, 1997). Les rivières Jacques-Cartier et Montmorency drainent principalement le Bouclier canadien, sont faiblement habitées, possèdent peu de zones agricoles et de routes, et ont des débits soutenus. Il en résulte une conductivité très faible ($< 100 \mu\text{S}/\text{cm}$). Les rivières Montmorency et Jacques-Cartier sont d'ailleurs parmi les moins conductrices de la base de données acquise de la BQMA. En effet, une campagne d'échantillonnage de chlorures a été réalisée par le MELCC en 2008 sur la rivière Montmorency. Pour 4 des 5 échantillons, les résultats indiquent les valeurs attendues pour ce type de rivière, soit de 1,7 à 3,8 mg/L.

4.4.3 Les rivières « agricoles »

Les rivières Aulneuse, Chaudière et Etchemin ont une conductivité représentative des rivières en zone agricole de la rive sud du Saint-Laurent. Elles possèdent d'ailleurs une conductivité médiane

située à peu près au centre des valeurs typiques du MDDELCC (Hébert et Légaré, 2000). Aucune tendance n'a été observée sur ces rivières.

Il n'existe qu'une seule campagne d'échantillonnage de chlorures dans la base de données de la BQMA, réalisée en 2008 sur la rivière Etchemin. La rivière n'a présenté qu'entre 4 et 11 mg/L de chlorures.

L'UPE à Charny effectue régulièrement des mesures de la conductivité de l'eau brute de la rivière Chaudière, à raison de 5 à 10 analyses par mois. À priori, les valeurs semblent suivre la même relation conductivité-débit que les rivières, avec les valeurs maximales atteintes à la fin de l'hiver et de l'été. Toutefois, avec un maximum observé de 252 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en avril 2015, il ne s'agit pas de valeurs problématiques.

5. CAUSES ASSOCIÉES À LA SALINITÉ SUR LE TERRITOIRE DE LA CMQ

5.1 Préoccupations associées aux résultats des données des UPE

Les analyses préliminaires semblent indiquer que les pointes de salinité les plus importantes sont d'origine terrestre et non fluviale, et proviennent vraisemblablement de l'épandage de sels sur le territoire, puisque ces pointes surviennent lorsque des précipitations ont lieu à des températures près de 0°C. Elles ne sont pas toujours associées à des changements de débit dans les cours d'eau, ce qui laisse supposer que les sels pourraient être transportés vers les cours d'eau par les réseaux d'égouts pluviaux ou les surverses des réseaux unitaires. Avec les données actuelles, ces hypothèses sont malheureusement difficiles à confirmer ou à infirmer, mais la campagne d'échantillonnage prévue à l'étape 1.2 du projet pourrait explorer cette hypothèse. Il est toutefois possible d'affirmer que les pointes observées aux UPE de Sainte-Foy, Desjardins et de Lévis, ne proviennent pas d'un déplacement de la ZTS pour le moment.

À aucun moment, les valeurs observées aux usines ne dépassent le seuil de potabilité de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur maximale observée à l'UPE de Sainte-Foy est d'environ 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs sont basées sur les valeurs moyennes horaires et sur 15 minutes. Il est probable que la valeur réelle maximale observée sur 15 secondes soit plus élevée. Quant aux usines de la rive sud, la valeur maximale observée à l'UPE Desjardins est d'environ 391 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis qu'elle est de 397 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à l'UPE de Saint-Romuald. Ces valeurs sont basées sur les valeurs moyennes aux 10 minutes, il est donc probable que la valeur instantanée soit plus élevée.

5.2 Préoccupations associées aux résultats des données des stations de suivi de la BQMA

Faisant suite à l'analyse des données de conductivité du réseau de stations de suivi de la BQMA, seules certaines stations situées en rivières sont préoccupantes quant aux valeurs maximales enregistrées. Les rivières ayant enregistrées des valeurs au-dessus de 1 000, seuil identifié par Santé Canada, sont Beauport, Saint-Charles et du Cap Rouge (tableau 10). Sur ces rivières, ce seuil est égalisé ou dépassé environ une fois par an, habituellement au mois de février et/ou de mars. Il faut toutefois tenir compte de la fréquence d'échantillonnage, qui n'est que d'une fois par mois. Il est donc probable que ces valeurs au-dessus de 1 000 représentent les conditions moyennes de ces rivières, avec des pointes potentiellement encore plus élevées. Telles que décrites dans la section précédente, les valeurs s'expliquent vraisemblablement par la forte urbanisation du bassin versant de ces rivières. De plus, la présence d'infrastructures de transport telles que le boulevard Sainte-Anne, l'autoroute Dufferin-Montmorency et l'autoroute Félix-Leclerc à proximité de la rivière Beauport peuvent expliquer les valeurs au-dessus de 2 000.

Tableau 10 – Rivières avec un seuil supérieur à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Rivières	Fréquence des valeurs au-dessus de 1 000	Valeur maximale (95 ^e centile)
Beauport	5 (1,25 échantillon/année)	2 040 (mars)
Saint-Charles	10 (0,71 échantillon/année)	1 625 (mars)
Du Cap Rouge	4 (1 échantillon/année)	1 325 (mars)

5.3 Causes associées à la variabilité observée

L'analyse des données de conductivité et de chlorures permet également d'avancer certains constats quant aux causes associées à la variabilité spatiale et temporelle observée.

5.3.1 Contexte géographique

Bien qu'il y ait une mise en garde par rapport aux données de conductivité provenant des stations au fleuve, en raison de l'échantillonnage en surface et de la fréquence des données, il est possible d'avancer que la conductivité dans l'estuaire fluvial demeure relativement stable. Cette situation pourrait s'expliquer notamment par les importants volumes d'eau qui favorisent la dilution des contaminants et qui masquent les pointes potentielles de conductivité provenant du fleuve Saint-Laurent.

5.3.2 Contexte géologique

Les rivières de la rive nord drainent principalement le Bouclier canadien, dont les roches ignées contiennent peu de chlorures. Dans plusieurs cas, les rivières de la rive nord sont également moins densément peuplées et possèdent de grandes étendues de forêt, ce qui limite l'érosion et le transport de contaminants (naturels ou anthropiques). Les rivières de la rive sud, telles les rivières Chaudière et Etchemin, s'écoulent principalement dans la région appalachienne et dans les Basses-terres du Saint-Laurent, respectivement formées de roches calcaires et sédimentaires plus susceptibles de contenir des sels et autres minéraux conducteurs. La présence d'argiles marines peut également favoriser l'apparition de sels dans l'eau (Painchaud, 1997). C'est ce qui explique que les rivières de la rive nord ont souvent une conductivité inférieure à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que les rivières de la rive sud ont plutôt une conductivité située entre 100 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

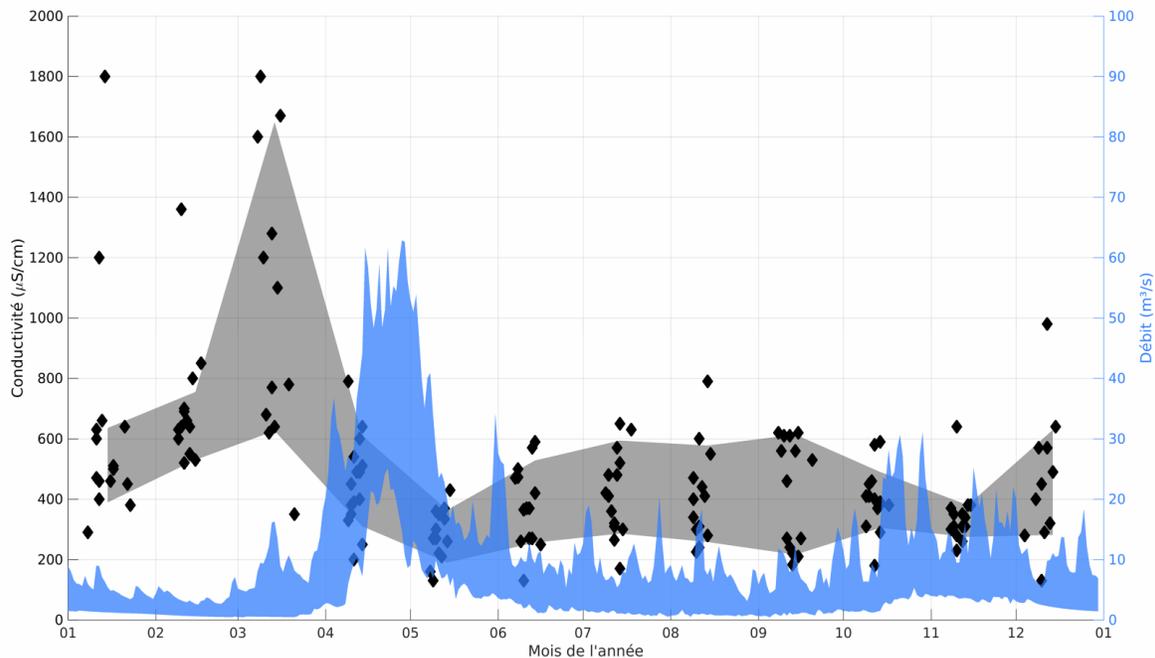
5.3.3 Contexte hydrologique

Nous savons depuis plusieurs décennies qu'il existe une relation inversement proportionnelle entre les débits d'une rivière et sa conductivité (Meybeck, 1972). Cette relation fait intervenir, entre autres, le débit des jours (ou des semaines) précédents. C'est ce qui explique que pour un débit donné, la conductivité ne sera pas toujours la même, mais dépendra plutôt des conditions météorologiques récentes. Par exemple, une situation de sécheresse signifiera habituellement une conductivité plus élevée que s'il a plu récemment.

Cette relation entre les débits et la conductivité possède deux valeurs limites. La première correspond aux très forts débits, lorsque la dilution sera maximale et que la conductivité tend vers celle des eaux de surface. La deuxième correspond aux très longues sécheresses, où la conductivité atteindra un plafond dicté par celle des eaux souterraines (Meybeck, 1972). Cette notion est très importante pour Québec, puisque la Ville de Québec a connu deux étiages sévères en 2002 et 2010. Cela pourrait donner une indication non seulement sur la conductivité des eaux souterraines, mais également sur la progression pendant ces huit années.

Une analyse des données de la BQMA et de la station hydrométrique de la DEH a permis de confirmer que les rivières de la région de Québec suivent la relation décrite par Meybeck (1972), où la conductivité maximale se retrouve pendant les épisodes de faibles débits en hiver et en été (figure 17 de la page suivante). Des analyses plus poussées pourraient être faites au besoin, mais cela n'a pas été jugé nécessaire pour la présente étude. Il est à noter que cette variation de la conductivité est également observée dans le fleuve Saint-Laurent.

Figure 17 - Comparaison entre la conductivité de la rivière Saint-Charles (noir) et les débits de la rivière (bleu) pour la période 2002-2016



Note : les losanges noirs illustrent les campagnes d'échantillonnage, tandis que la zone ombrée regroupe 70 % des données.

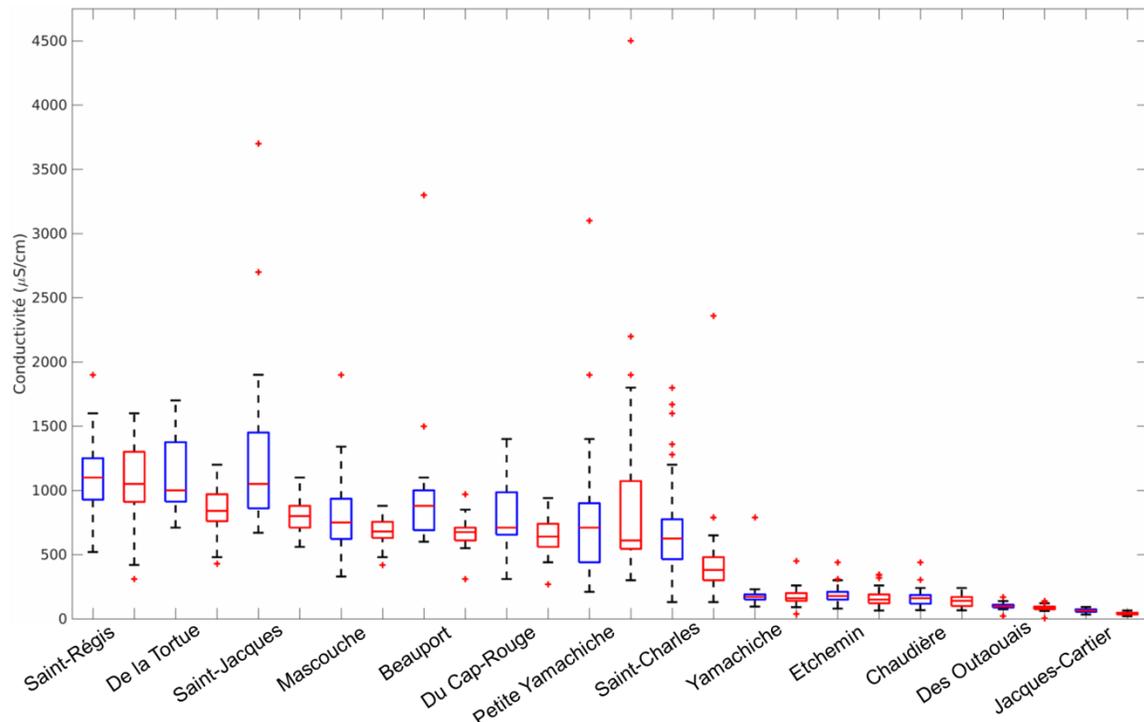
5.4 Urbanisation et activités humaines

Sur les rivières plus urbanisées, il a été remarqué que la conductivité est souvent beaucoup plus élevée en hiver qu'elle ne l'est en été. Or, ce n'est pas le cas sur les rivières agricoles ou non urbanisées. Cela aurait tendance à confirmer que la conductivité ne provient pas seulement de sources naturelles, mais également anthropiques.

La figure 18 illustre la répartition des données de conductivité en hiver et en été pour les rivières du territoire de la CMQ et pour d'autres rivières mentionnées précédemment dans ce rapport. Les rivières sont ainsi classées en ordre décroissant de leur conductivité estivale médiane. Il peut être observé que les rivières à droite de la rivière Saint-Charles, dont les territoires sont peu habités ou sont majoritairement en zone agricole, ont une conductivité similaire en hiver et en été, quoique toujours un peu plus élevée en hiver.

En contrepartie, à l'exception des rivières Saint-Régis et Petite Yamachiche discutées plus bas, les rivières dans la moitié gauche du graphique, qui se trouvent généralement sur des territoires plus urbains, ont toutes un débalancement important entre la conductivité hivernale et estivale. Un débalancement est également noté au niveau de la dispersion des données, illustrée par la taille de la boîte à moustache. Les rivières Petite Yamachiche et Saint-Régis n'ont pas le débalancement hiver-été noté pour les autres rivières dans la moitié gauche de la figure 18. Dans le cas de la Petite rivière Yamachiche, il est probable que les grandes valeurs en été et possiblement en hiver soient dues à l'érosion d'argiles marines et/ou à une contamination de la nappe phréatique par les sels de déglacage (OBVRLY, 2015).

Figure 18 - Comparaison de la conductivité hivernale (décembre-mars, bleu) et estivale (juin-novembre, rouge) de douze rivières de la BQMA

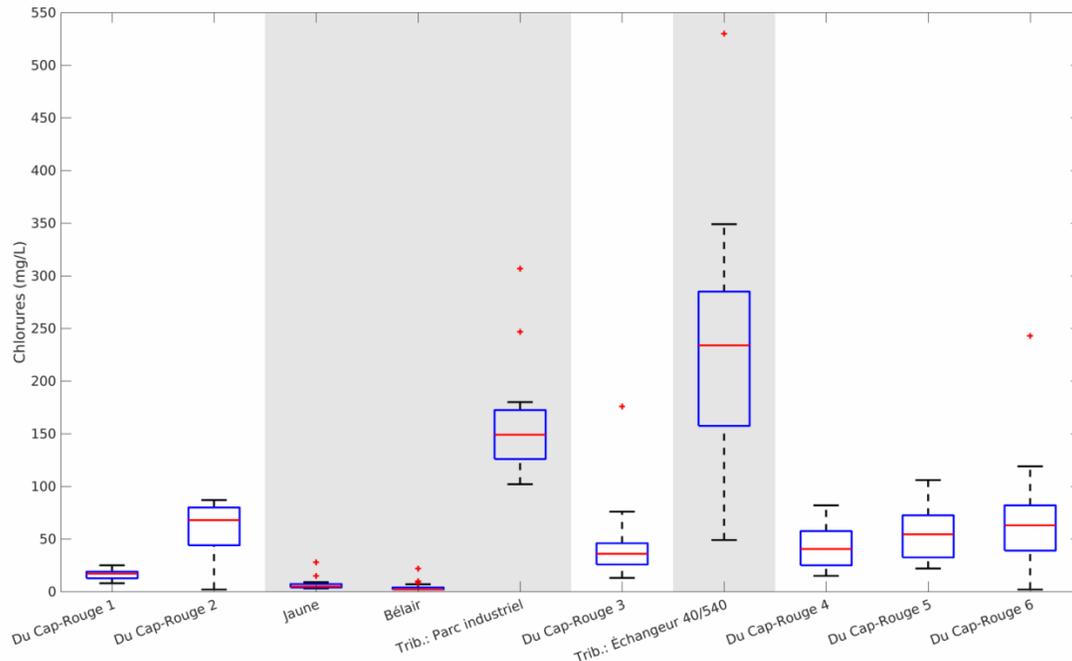


Note : Chaque section de la boîte à moustache (boxplot) représente 25 % des données. La ligne rouge illustre donc la médiane. Les valeurs trop extrêmes pour être incluses dans la boîte à moustache sont illustrées séparément, à l'aide d'une croix rouge.

Pour la rivière Saint-Régis, une contamination aux chlorures de la nappe phréatique a été notée et pourrait elle aussi expliquer la forte conductivité estivale (Audet, 2015). La rivière Yamachiche a été ajoutée à la figure 18 parce qu'il s'agit d'une version relativement « naturelle » ou « rurale » de ce que pourraient être les rivières Saint-Charles, du Cap Rouge et Beauport dans le secteur de Québec. Le bassin versant de la rivière Yamachiche est de 266 km², un peu plus petit que celui de la rivière Saint-Charles, et se situe dans une géologie similaire aux rivières de Québec : la tête du bassin versant se trouve dans le Bouclier canadien, alors qu'une grande partie du bassin versant est plutôt dans la Plateforme du Saint-Laurent. Les sections en tête du bassin versant sont peu peuplées, tandis que le reste est plutôt agricole. Un point important est que la station de mesure sur la rivière Yamachiche se trouve en amont de l'A-40. Or, alors que la figure 18 indique des valeurs de conductivité et un profil qui ressemble aux rivières de la rive sud du Saint-Laurent (Chaudière, Etchemin, etc.) pour la rivière Yamachiche, les rivières de Québec, beaucoup plus urbanisées, ressemblent plutôt aux rivières de la couronne de Montréal (Saint-Jacques, de la Tortue, Mascouche).

La rivière du Cap Rouge présente des valeurs similaires aux rivières de la couronne de Montréal (Saint-Régis, de la Tortue, Saint-Jacques, Mascouche). Une analyse similaire a été effectuée avec les mesures de chlorures de la rivière du Cap Rouge. Les résultats sont présentés à la figure 19 de la page suivante.

Figure 19 - Concentration estivale en chlorures de la rivière du Cap Rouge et de ses tributaires



Note : Les stations sont listées de l'amont vers l'aval. Les tributaires sont indiqués en gris et sont ordonnés en fonction de la localisation de leur confluence avec la rivière du Cap-Rouge. Chaque section de la boîte à moustache (boxplot) représente 25 % des données. La ligne rouge illustre donc la médiane. Les valeurs trop extrêmes pour être incluses dans la boîte à moustache sont illustrées séparément, à l'aide d'une croix rouge.

Il faut également noter que les bassins versants de la rivière du Cap Rouge (1 et 2) et des ruisseaux Jaune et Bélair sont à peu près homogènes et, à l'exception de la rivière du Cap Rouge (2), les chlorures mesurés correspondent aux valeurs attendues. La rivière du Cap Rouge (2), quant à elle, reçoit les eaux de l'A-40 et possède une concentration médiane de 68 mg/L, soit bien au-dessus des valeurs typiques d'une station en tête de bassin versant. Ces résultats confirment, dans un premier temps, que des chlorures sont retrouvés en été et, dans un deuxième temps, que les sels de déglacement en sont probablement à l'origine.

Deux autres tributaires de la rivière du Cap Rouge ont des concentrations très élevées de chlorures. L'un d'entre eux draine le parc industriel François-Leclerc Sud, tandis que l'autre est constitué à 14,4 % de routes et est situé en bordure de l'échangeur 40/540 et d'une aire de stationnement pour les magasins Walmart, Super C, Home Depot, HomeSense, Cinéplex et autres (Brodeur et Trépanier, 2013). Dans le cas de ce dernier tributaire, la médiane des chlorures estivages est presque égale à la norme de qualité de l'eau, tandis que la valeur maximale enregistrée est deux fois plus élevée que la norme (MDDEFP, 2013). Il n'existe pas de mesures en hiver. À l'embouchure de la rivière du Cap Rouge, la teneur en chlorures est similaire à ce qui est observé pour la rivière Saint-Charles, et la valeur maximale historique atteint presque la norme de qualité d'eau. Cela n'est pas anormal, car le bassin versant est fortement urbanisé et il accueille plusieurs dépôts à neige ainsi que l'Aéroport international Jean-Lesage. Les pistes de l'aéroport ne sont pas déglacées avec du sel, mais les grands espaces de stationnement le sont.

5.4.1 Contexte météorologique

Alors que les points précédents expliquent les conditions moyennes de conductivité, les pointes observées aux UPE semblent se dérouler lors de « cocktails météo » hivernaux. Ces conditions sont associées à des précipitations survenant lors de redoux, mais lorsque la température minimale journalière demeure sous 0°C. Il s'agit souvent de conditions dangereuses pour le réseau routier, ce qui pourrait amener à des opérations d'épandage de sel sur les routes. Une partie de ce sel s'écoule vers les cours d'eau, que ce soit par ruissellement ou par les égouts municipaux, ce qui provoque une pointe de salinité aux usines dans les heures ou les jours suivants.

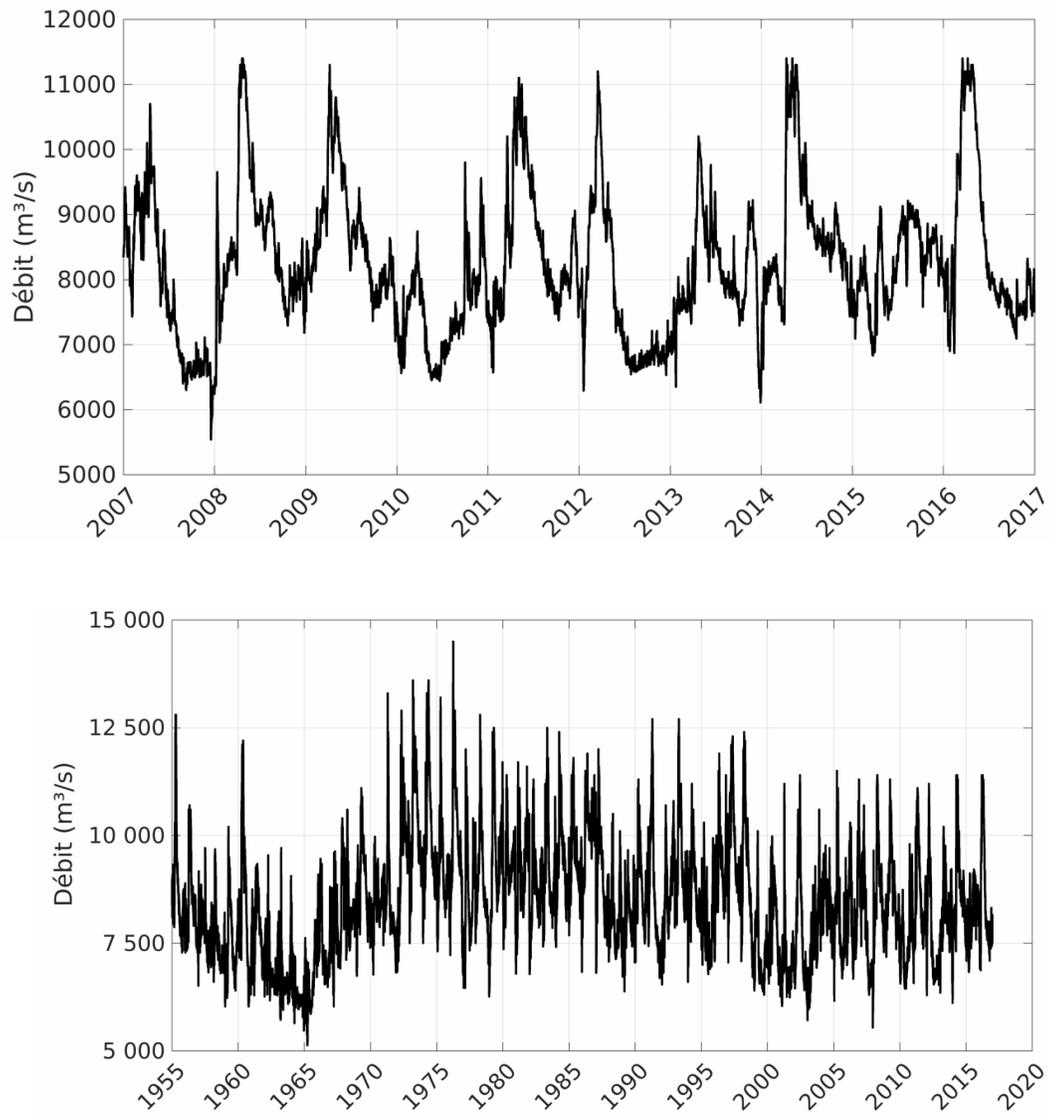
5.4.2 Changements climatiques

Plusieurs études suggèrent que les effets des changements climatiques viendront dans certains cas amplifier la problématique de la salinité de l'eau au fleuve et dans les rivières du territoire de la CMQ. Telle que spécifiée dans ce rapport, la conductivité dans les cours d'eau est inversement proportionnelle aux débits. Or, les changements climatiques engendreront des modifications dans le régime des précipitations et provoqueront une hausse des températures estivales de l'ordre de 1,6 à 4,5°C vers 2050 (Ouranos, 2015). Ces conditions pourraient provoquer des étiages estivaux plus sévères et plus longs (CEHQ, 2015). Cette tendance favoriserait ainsi une augmentation de la salinité de l'eau dans les rivières en été. Également, la hausse des températures hivernales pourrait impliquer un nombre plus élevé de redoux. Ces événements, lorsqu'ils sont accompagnés de précipitations, correspondent à des situations propices aux opérations d'épandage de sels sur les routes. Avec des redoux plus fréquents en hiver, il y a donc un risque que les pointes de salinité aux usines deviennent plus fréquentes.

Concernant la ZTS, la hausse du niveau de la mer pourrait se faire sentir jusqu'à la hauteur de Québec. Bien que les analyses dans le cadre de cette étude n'aient pu démontrer cette tendance en raison des limites méthodologiques (échantillonnage à la surface du fleuve seulement), cette hausse, combinée à la marée haute et à des débits estivaux plus faibles dans le Saint-Laurent, pourrait provoquer un déplacement de la ZTS vers les prises d'eau de Québec et de Lévis. Un rehaussement des niveaux d'eau est observé sur les marégraphes situés à Neuville et au Vieux-Québec, de l'ordre de 1,03 et 0,77 cm/année respectivement, basé sur la période 2007-2016 et 2009-2016. Un rehaussement a été observé à Saint-François-de-l'Île-d'Orléans, 0,12 cm/année pour 2007-2016, mais n'est pas statistiquement significatif.

Cette hausse dépasse de beaucoup le rehaussement causé par les changements climatiques. Or, dans la région de Québec, les niveaux d'eau sont fortement influencés par les débits du fleuve Saint-Laurent. Une analyse des débits à la hauteur de LaSalle, donc en dehors de toute influence de l'océan, confirme que les débits ont augmenté en moyenne de 250 m³/s depuis 2007. Cela pourrait expliquer, du moins en partie, le rehaussement important des niveaux d'eau observés à Québec. Depuis les années 70, toutefois, le fleuve a plutôt vu une diminution d'environ 1 420 m³/s (figure 20).

Figure 20 - Comparaison entre les débits du fleuve Saint-Laurent à LaSalle pour la période 2007-2016 (haut) et pour la période historique de 1955 à aujourd'hui (bas)



6. CONCLUSION

Depuis 1999, des études ont soulevé l'hypothèse que les effets des changements climatiques se traduiront par une hausse du niveau marin et par une baisse du débit du Saint-Laurent. Cette situation provoquerait une remontée du front salin vers l'amont, ce qui pourrait compromettre l'alimentation en eau potable de certaines municipalités de la CMQ.

La littérature confirme que les changements dans les conditions de salinité et les impacts sur la consommation de l'eau potable ont été observés dans plusieurs pays. Sur le fleuve Delaware, par exemple, la baisse du débit du fleuve survenue dans les années 60 à la suite d'un épisode historiquement chaud et sec a entraîné le déplacement du front salin sur près de 160 km à partir de son embouchure, l'amenant à 12 km de la prise d'eau potable desservant la Ville de Philadelphie. Au Québec, des concentrations de sels anormalement élevées ont été documentées dans plusieurs rivières et lacs, et ce, à proximité des prises d'eau potable. À titre d'exemple, dans la ville de Québec, une concentration importante de sels dans les cours d'eau a été observée dans les bassins versants de la rivière Saint-Charles, de la rivière du Cap Rouge et du lac Saint-Augustin. Les sels de déglçage empruntant les effluents sont identifiés comme la source principale de contamination des cours d'eau.

Dans le cadre de la présente étude, les données portant sur la conductivité et les chlorures ont été étudiées. À aucun moment, les valeurs observées aux usines n'ont dépassé le seuil de potabilité de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les analyses semblent indiquer que les pointes de salinité les plus importantes sont d'origine terrestre et non fluviale, et proviennent vraisemblablement de l'épandage de sels sur le territoire. En effet, les pointes de salinité surviennent lorsque des précipitations ont lieu à des températures près de 0°C. Elles ne sont pas toujours associées à des changements de débit dans les cours d'eau, ce qui laisse supposer que les sels pourraient être transportés vers les cours d'eau par les réseaux d'égouts pluviaux ou les surverses des réseaux unitaires. Il est toutefois possible d'affirmer que les pointes observées aux UPE de Sainte-Foy, Desjardins et de Lévis, ne proviennent pas d'un déplacement de la ZTS pour l'instant.

Les prochaines étapes du projet serviront à renforcer les hypothèses sur l'origine de la salinité. Elles serviront également à acquérir et modéliser les données sur la salinité actuelle et future afin d'étudier la disposition de la ZTS et son possible avancement dans un contexte de changements climatiques.

7. RÉFÉRENCES

Agbenowosi, N.K., 2000. A Mechanistic Analysis Based Decision Support System for Scheduling Optimal Replacement. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute. Disponible en ligne: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-11302000-3612/unrestricted/dissert1.pdf>.

Aminot et Kérouel, 2004. Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses. p. 42.

APEL, 2009. Étude limnologique du haut-bassin de la rivière Saint-Charles, rapport final. Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord, Québec, 354 p.

APEL, 2016. Suivi des rivières du bassin versant de la rivière Saint-Charles – Campagne 2015, Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord, Québec, 158 p.

Audet, G., Blackburn, F., Lapointe, M.-C. et Boothroyd, K., 2015b. Diagnostic de la Zone Châteauguay. SCABRIC : Saint-Chrysostome (Québec), ISBN 978-2-9815404-1-6 (pdf), 82 p.

Audet, G., Lapointe, M.-C., Boothroyd, K., De Mello, J., Jeanneau, S. et Blackburn, F., 2015a. Portrait de la Zone Châteauguay. SCABRIC : Saint-Chrysostome (Québec), ISBN978-2-9815404-0-9 (pdf), 192 p. + 5 annexes

Boucher, 2010. La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable, ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable », 118 p.

Bourgault D & Koutitonsky VG, 1999. Real-time monitoring of the freshwater discharge at the head of the St. Lawrence Estuary. Atmos. Ocean.

Bourgault, D., 2001. Circulation and Mixing in the St-Lawrence estuary. Thèse de doctorat. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research. McGill University, Montreal, 127 p., annexes

BPR, 2008. Étude technico-économique de solutions techniques visant l'approvisionnement en eau des cultures horticoles à l'île d'Orléans. Rapport de projet. Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec, 79 p. + annexes.

Brodeur, C. ET J. Trépanier. 2013. Diagnostic des bassins versants de la Capitale. Organisme des bassins versants de la Capitale. Publié en mars 2013 – révision en continu.

Carolinas Integrated Sciences and Assessments and South Carolina Sea Grant Consortium, 2012. Assessing the Impact of Saltwater Intrusion in the Carolinas under Future Climatic and Sea Level Conditions. Columbia, SC. 25 p. En ligne : www.cisa.sc.edu.

CCWD, 2010. Historical Fresh Water and Salinity Conditions in the Western Sacramento-San Joaquin Delta and Suisun Bay : A summary of historical reviews, reports, analyses and measurements. Water Resources Department Contra Costa Water District Concord, California, 316 p.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2015. Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 81 p.

CMQ, 2016. Projet Oléoduc Énergie Est de TransCanada Section québécoise. Mémoire présenté par la Communauté métropolitaine de Québec à la Commission d'enquête du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE), 293 p.

Commission mixte internationale, 2017. En ligne <http://ijc.org/fr/>, consultée le 9 décembre 2017.

Conrads, P.A., and Roehl, E.A., Jr., 2007. Analysis of salinity intrusion in the Waccamaw River and Atlantic Intracoastal Waterway near Myrtle Beach, South Carolina, 1995–2002: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007–5110, 41 p. En ligne.

Corsi, S., Graczy, D., Geis, S., Booth, N. et Richards, K., 2010. A Fresh Look at Road Salt: Aquatic Toxicity and Water-Quality Impacts on Local, Regional, and National Scales, *Environmental science & technology*, Vol 44, n.19, 7 p.

Courbin, A., 2012. Évolution de la remontée du front des 1 000 us/cm sur le fleuve Maroni. BRGM/RP-62127, 60 p.

Cusson, E., 2011. Patrons de distribution des crustacés planctoniques dans le fleuve Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, [Département de sciences biologiques](#), Université de Montréal, 148 p.

Daniel, F., 2018. Florence DANIEL, « FORCE DE CORIOLIS ». [En ligne]. <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/force-de-coriolis/>, consultée le 28 mai 2018

Dassonville, F., 2013. La qualité de l'eau du robinet en France – données 2013. Ministère des affaires sociales et de la santé. [En ligne]. http://www.crespaca.org/depot_arkcms_crespaca/depot_arko/articles/710/definition-d-une-eau-agressive- doc.pdf. Consultée le 17 avril 2018.

De Vries, P.M. et Weiss, L.A., 2001. Salt-Front Movement in the Hudson River Estuary, New York— Simulations by One-Dimensional Flow and Solute-Transport Models. US Geological Survey Water-Resources Investigation Report 99-4024 retrieved from: <http://ny.water.usgs.gov/pubs/wri/wri994024/wrir99-4024.pdf>

Delaware river basin commission, 2016. General drought information. Page consultée le 30 novembre 2016 : <http://www.state.nj.us/drbc/hydrological/drought/index.html>

Delaware Valley Regional Planning Commission, 2004. Sea level rise in the Delaware estuary of Pennsylvania. Pennsylvania coastal zone management program, Department of Environmental protection water planning office, 50 p.

Delisle, R., 1999. Autoroute 40 - Cap-de-la-Madeleine : étude de la contamination de la nappe aquifère par les sels déglacant. Ministère des Transports du Québec, 98 p.

Deschênes, J. et Sérodes, J.B., 1985. The influence of salinity on *Scirpus americanus* tidal marshes in the St. Lawrence River Estuary, Québec, *Canadian Journal of Botany*, 63, 920-7.

Dubé, S., 2013. Évaluation du potentiel de rétablissement de la population d'esturgeon noir (*Acipenser oxyrinchus*) du Saint-Laurent: habitat et menaces. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2013/037. v + 12 p.

EC et SC, 2001. Rapport d'évaluation de la liste des substances d'intérêt prioritaires - Sels de voirie, Ottawa, environnement Canada, 188 p.

Furlow, John; Scheraga, J. D.; Freed, Randall, and Rock, Ken, 2002. The Vulnerability of Public Water Systems to Sea Level Rise, In *Proceedings of the Coastal Water Resource Conference*, John R. Lesnik (editor), American Water Resources Association, Middleburg, Virginia, TPS-02-1, 2002, 31-36.

Gagnon, M., Y. Ménard et J.-F. La Rue, 1993. Caractérisation et évaluation des habitats du poisson dans la zone de transition saline du Saint-Laurent. *Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat.* 1920: vili -t- 104 p.

Galvez et al., 2012. Mise en place d'un projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du Lac Saint-Augustin. Analyse comparative des volets I et II. Rapport final préparé pour la Ville de Québec et présenté au MDDEP.

Gauthier, B., 1980. Les limites phytogéographiques du Saint-Laurent. Thèse, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, 102 p.

Gélinas, P. et Locat, J., 1998. Effets des sels déglacant sur la qualité de l'eau de l'aquifère de Trois-Rivières-Ouest. Ministère des Transports du Québec, Direction des sols et matériaux, 120 p.

Gibbons, D.C. 1986. *The economic value of water*. Washington, DC: Resources for the Future. 101 p.

Hull, C. H. J., et J. G. Titus, eds., 1986. *Greenhouse Effect, Sea Level Rise, and Salinity in the Delaware Estuary*. Trenton, N.J.: Delaware River Basin Commission and U.S. Environmental Protection Agency, 88 p.

Kreeger, D., J. Adkins, P. Cole, R. Najjar, D. Velinsky, P. Conolly, and J. Kraeuter., 2010. Climate Change and the Delaware Estuary: Three Case Studies in Vulnerability Assessment and Adaptation Planning. Partnership for the Delaware Estuary, PDE Report No. 10-01. 1 –117 pp.

Martin, S., O. Champoux et J. Morin. (2016). Modélisation des masses d'eau du fleuve Saint-Laurent au lac Saint-Pierre en support au suivi de la qualité de l'eau. Note technique NT-118, Service météorologique du Canada, Environnement et Changement climatique Canada, Québec. 30 p.

Meybeck, M., 1972. Qualité chimique naturelle de l'eau des rivières (ions majeurs): Revue de littérature. Rapport scientifique (R10). INRS-Eau, Québec.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2014. Guide de gestion des eaux pluviales. Chapitre 2 – Impacts et justification. P. 2-11. [En ligne]. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>. Consulté le 25 octobre 2017.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2016. Procédures d'échantillonnage pour le suivi de la qualité de l'eau en rivière, Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-77216-3 (PDF) 25 p. et annexes. [En ligne]. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/flrivlac/guides-protocoles.htm>

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), 2013. Critères de qualité de l'eau de surface, 3e édition, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-68533-3 (PDF), 510 p. et annexes.

Morteau, B., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S, 2006. Développement d'une chaîne de traitement pour l'atténuation des contaminants provenant des produits d'entretien de l'autoroute Félix-Leclerc : lit filtrant et marais épurateur adapté. Rapport Technique 03605'2_06 présenté au Ministère des Transport du Québec. 45 pp.

Mortsch, L., Hengeveld, H., Lister, M., Lofgren, B., Quinn, F.H., Slivitsky, M. and Wenger, L., 2000. Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence system. Canadian Water Resources Journal, 25: 153-179

Moulton, R.J. et D.R. Cuthbert. 2000. "Cumulative impacts/risk assessment of water removal loss from the Great Lakes – St. Lawrence River system" Canadian Water Resources Journal, 25(2).

MTQHébert, S. et S. Légaré, 2000. Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, envirodoq n° ENV-2001-0141, rapport n° QE-123, 24 p. et annexes.

Mullaney, J.R., Lorenz, D., Arntson, A.D., 2009. Chloride in groundwater and surface water in areas underlain by the glacial aquifer system, northern United States: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009–5086, 41 p.

OBVRLY, 2015. Projet collectif par bassin versant de la Petite rivière Yamachiche, rapport de caractérisation - 2014, réalisée par l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY) dans le cadre du volet II du Programme Prime Vert du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Yamachiche, 94 p. et 4 annexes.

Ouranos, (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.

Ouranos, 2014. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec Édition 2014, consortium Ouranos. <http://www.ouranos.ca/fr/synthese2014/>

Painchaud, 1997. La qualité de l'eau des rivières du Québec : état et tendances. Ministère de l'Environnement et de la Faune, 76 p.

Parizot, M., 2007. Évaluation des remontées salines en saison sèche sur les fleuves Mana, Kourou et Comté, Rapport BRGM/RP-55265, 37 p.

Philadelphia Water Department, 2007. The Delaware River Watershed Source Water Protection Plan, Pennsylvania department of environmental protection, 215 p.

Proceedings of the National Academy of Sciences PNAS 2017 Salting our freshwater lakes, <https://portal.edirepository.org/nis/mapbrowse?scope=edi&identifiant=8>. pp. 4454-4458

Proulx, François. 2016. Un enjeu environnemental : les déversements de sels de voirie et leurs impacts sur les prises d'eau potable de la Ville de Québec, présentation au 10^{ème} Congrès sur la viabilité hivernale, 18 p.

Proulx, François. 2017. Rapport de caractérisation de l'eau des puits privés des bassins versants des prises d'eau situées dans la rivière Saint-Charles et la rivière Montmorency, CMQ, avril 2017, 40 p.

Rice, K.C., Bennett, M.R., et Shen, J., 2001. Simulated changes in salinity in the York and Chickahominy Rivers from projected sea-level rise in Chesapeake Bay: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1191, 31 p.

Robitaille, J.-P., 2011. Les sels de voirie au Québec : proposition d'une démarche de gestion environnementale spécifique aux zones vulnérables. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, Université de Sherbrooke, 115 p.

SACA, 2011. Saltwater intrusion and climate change. Prince Edward Island Department of Environment, Labour and Justice, 26 p.

Santé Canada, 1987. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – chlorure, Ottawa, 4 p.

Santé Canada, 2001. Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999), Liste des substances d'intérêt prioritaire, Rapport d'évaluation, Sels de voirie. 188 p.

Santé Canada, 2009. Document de conseils sur le contrôle de la corrosion dans les réseaux de distribution d'eau potable. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa (Ontario). En ligne : <https://www.canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/water-corrosion-eau/alt/water-corrosion-eau-fra.pdf>

Saucier, J.F., Roy, F., Senneville, S., Smith, G., Lefavre, D., Zakardjian, B. et J.F. Dumais, 2009. Modélisation de la circulation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en réponse aux variations du débit d'eau douce et des vents. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 22, n° 2, p. 159-176.

Simons RD, Monismith SG, Saucier FJ, Johnson LE & Winkler G, 2010. Modelling stratification and baroclinic flow in the estuarine transition zone of the St. Lawrence estuary.

Swenson, H., : Why is the ocean salty : Page consultée le 28 octobre 2017 : http://www.all-science-fair-projects.com/science_fair_projects/26/304/56e21a18f5fce879c747cbd72dfc5a23.html

Trépanier, J., 2011. Diagnostic du bassin versant de la rivière du Cap Rouge. Organisme des bassins versants de la Capitale, Québec. 115 p,

Villeneuve, J.-P., Mailhot, A., Salvano, E., 2001. Problématique de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'eau potable dans la nouvelle ville de Québec. Rapport final présenté au Comité de transition de la nouvelle Ville de Québec, INRS-Eau-Terre et Environnement, Sainte-Foy, 14 4 p.

ANNEXE 1

Équipe de réalisation et comité de pilotage

Équipe de réalisation

Communauté métropolitaine de Québec

Charles-Éric Bernier	Conseiller en environnement et en aménagement du territoire
Caroline Brodeur	Directrice Environnement
Andréane Choinière	Agente de secrétariat et réceptionniste
Suzanne Labrosse	Adjointe administrative - Direction générale (2015-2019)
Caroline Lavoie	Technicienne en géomatique
François Morneau	Conseiller spécial et coordonnateur du plan de protection des sources d'eau (2015-2018)
Steeve Tremblay	Technicien en géomatique

Consortium Ouranos

Chantal Quintin	Géographe
David Huard	Spécialiste, Scénarios et services climatiques
Gabriel Rondeau-Genesse, ing	Spécialiste, Scénarios et services climatiques
Élyse Fournier	Spécialiste, Scénarios et services climatiques

Comité de pilotage

Charles-Éric Bernier	CMQ
Jean-Claude Belles-Isles	Ville de Lévis
Josée Michaud	MELCC (2015-2017)
François Proulx	Ville de Québec et Université Laval
Chantal Quintin	Ouranos
François Morneau	CMQ/Ouranos (2017-2018)
Richard Turcotte	MELCC/Ouranos
Julie Veillette	MELCC

ANNEXE 2

Problématiques documentées à l'international, au Canada et au Québec

Localisation	Type de milieu	Causes évoquées	Références
France	Fleuve Morani	Remontée du front salin dans le fleuve (débit du fleuve, hauteur de la marée, période sèche)	Courbin, 2012
France	Fleuves Mana Kourou et Comté	Remontée du front salin dans le fleuve (débit du fleuve, hauteur de la marée, période sèche)	Parizot, 2007
États-Unis	York and Chickahominy River	Remontée du front salin dans le fleuve (hausse du niveau de la mer, période sèche, débit du fleuve.)	Rice et al., 2001
États-Unis	Waccamaw River	Remontée du front salin dans le fleuve (période sèche, débit du fleuve, hausse du niveau de la mer)	Conrad et al., 2007; Carolinas Integrated Sciences and Assessments and South Carolina Sea Grant Consortium, 2012
États-Unis	Hudson River	Remontée du front salin dans le fleuve (débit du fleuve, hauteur de la marée, vent, surcote, bathymétrie, période sèche)	De Vries et Weiss, 2001
États-Unis	Fleuve Delaware	Remontée du front salin dans le fleuve associée à : hausse du niveau de la mer, période sèche, débit du fleuve, urbanisation, activités anthropiques	Gibbons, 1986; Delaware Valley Regional Planning Commission, 2004; Philadelphia Water Department, 2007; Kreeger et al., 2010
États-Unis	Sacramento San Joaquin River Delta	Remontée du front salin dans le fleuve associée à : activités humaines-chenalisation, dragage, barrage de chenaux, période sèche, hausse du niveau de la mer	CCWD, 2010
États-Unis	100 rivières dans la partie Nord des États-Unis	Concentration de sels anormalement élevée dans plusieurs rivières associées à : occupation du sol, densité du réseau routier, autoroute, activités humaines, débit annuel	Mullaney et al., 2009
États-Unis	12 rivières au Wisconsin	Concentration de sels anormalement élevée dans plusieurs rivières associée à : occupation du sol, densité du réseau routier, autoroute, activités humaines.	Corsi et al., 2010
Canada	Zone côtière et estuaires des provinces maritimes	Intrusion d'eau saline dans les eaux souterraines en zone côtière et remontée du front salin associée à : occupation du sol, période sèche, changement climatique	SACA, 2011

Localisation	Type de milieu	Causes évoquées	Références
Canada	Eau souterraine et de surface des provinces canadiennes	Concentration de sels anormalement élevée dans le réseau municipal d'approvisionnement en eau associé à : occupation du sol, activités humaines	EC et SC, 2001
Québec	Fleuve Saint-Laurent	Remontée du front salin associée à : hausse du niveau de la mer, baisse du débit du fleuve.	Mortsch et al., 2000; Bourgault, 2001; Villeneuve et al., 2001; Ouranos, 2014
Québec	Bassin versant de la rivière Saint-Charles	Concentration de sels anormalement élevée dans les cours d'eau associée à : occupation du sol, activités humaines	APEL, 2009
Québec	Bassin versant de la rivière du Cap Rouge	Concentration de sels anormalement élevée dans les cours d'eau associée à : occupation du sol, activités humaines	Trépanier, 2011
Québec	Bassin versant du lac Saint-Augustin	Concentration de sels anormalement élevée dans les cours d'eau associée à : occupation du sol, activités humaines	Morteau et al., 2008
Québec	Aquifère de Trois-Rivières	Concentration de sels anormalement élevée dans l'aquifère associée à : occupation du sol, activités humaines	Gélinas et Locat, 1998
Québec	Lac à la truite, Sainte-Agathe-des-Monts	Concentration de sels anormalement élevée dans le lac associée à : occupation du sol, activités humaines	EC et SC, 2001
Québec	Nappe aquifère Cap-de-la-Madeleine	Concentration de sels anormalement élevée dans la nappe aquifère associée à : occupation du sol, activités humaines	Delisle, 1999