

SUR LES TRACES DE LA BACTÉRIE *ESCHERICHIA COLI* DANS LE FLEUVE SAINT-LAURENT :
PISTER LA BACTÉRIE À L'AIDE DE PARAMÈTRES GÉOGRAPHIQUES ET TEMPORELS

Par Marie-Ève Bourget-Boulanger

Essai présenté en vue de l'obtention du double diplôme
Maîtrise en environnement
Master Gestion Intégrée de l'Environnement, de la Biodiversité et des Territoires

Sous la direction de François Guillemette

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE (Québec, Canada)

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER (France)

Juillet 2020

SOMMAIRE

Mots-Clés : *Escherichia coli*, *E. coli*, bactérie, fleuve Saint-Laurent, Québec, hydrologie, occupation du territoire, saisons.

Cet essai a pour objectif principal de dresser un portrait intégré de la distribution de la bactérie *Escherichia coli* dans le fleuve Saint-Laurent et ses sources afin de diriger les futurs efforts de mitigation. La bactérie *Escherichia coli* est un pathogène présent dans les milieux hydriques provenant des excréments humains et animaux. Cet organisme sert également d'indicateur de la qualité bactériologique marquant la présence de plusieurs autres bactéries ayant des risques sanitaires. La distribution de la bactérie *Escherichia coli* dans le fleuve Saint-Laurent est peu connue malgré les recherches effectuées par la ville de Montréal et le ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques. Ce fleuve est un cours d'eau traversant le sud de la province du Québec, ses rives abritent la majorité de la population québécoise. La zone d'étude de cet essai est le tronçon fluvial, soit du lac Saint-François à la ville de Portneuf.

Les analyses effectuées dans le cadre de cet essai démontrent que la masse d'eau centrale abrite les zones où la concentration en *Escherichia coli* est la plus importante. Cette dernière est contaminée par l'usine d'épuration de la ville de Montréal. Le second secteur à surveiller est à l'embouchure de plusieurs rivières où l'agriculture près des rives est dominante. En plus des zones à surveiller, plusieurs zones possèdent un pouvoir de rétention d'*Escherichia coli*, c'est le cas de l'archipel des îles de Sorel et du lac Saint-Pierre. En plus de l'hydrologie du fleuve Saint-Laurent, la quantité de précipitation obtenue et la température ambiante lors de la journée d'échantillonnage sont directement corrélées avec la concentration en *Escherichia coli*. Lorsque les données sont rassemblées par saisons, la concentration bactérienne hivernale est corrélée avec la température de l'eau. En été, la concentration en *Escherichia coli* est liée à l'occupation agricole présente sur le bassin versant des tributaires se jetant dans le fleuve Saint-Laurent. Puis les effets saisonniers démontrent que l'été et l'automne sont les deux saisons où la concentration en *Escherichia coli* est la plus élevée.

Bref, ces analyses ont permis de cibler plusieurs problématiques reliées à la concentration de la bactérie *Escherichia coli*. Plusieurs recommandations sont donc listées dans le but d'améliorer la qualité bactériologique de l'eau du fleuve Saint-Laurent. Parmi ces recommandations, il est conseillé de procéder le plus rapidement possible à la modernisation des usines d'épuration des eaux usées en s'assurant qu'elle soit capable de supporter la densification de la population. De plus, il est proposé de réduire les superficies de sol à nu dans les secteurs agricoles en pratiquant des cultures de couvertures ou toutes autres solutions efficaces. D'autres recherches concernant l'impact de la bactérie *Escherichia coli* sont requises pour l'acquisition de connaissances sur la distribution de cette bactérie pathogène et ses conséquences sur l'environnement.

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la rédaction de cet essai. Ces personnes m'ont appuyée en fournissant des informations ou en m'orientant dans mes recherches et mes analyses. De plus, il est important de souligner les gens ayant été capables de m'aider à conserver ma motivation ainsi que mon moral durant l'ensemble du projet. Malgré les circonstances d'isolement social causé par la Covid-19, tous ont fourni des efforts afin de permettre la communication et favoriser ainsi ma réussite.

D'abord, j'aimerais témoigner ma reconnaissance à mon directeur d'essai François Guillemette, ayant su m'orienter pour la rédaction et l'analyse. Il m'a donné la chance de travailler sur un projet innovant pouvant aider à l'amélioration de la qualité de l'eau du fleuve Saint-Laurent. De plus, il a été capable de partager sa passion pour ce sujet à chaque conversation. Je tiens à souligner également la disponibilité du CUFE et leur rapidité à répondre à mes questions.

Je remercie également l'équipe du laboratoire Guillemette qui m'a aidée pour la compréhension des données et pour leur participation à l'échantillonnage provenant du navire de recherche de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Je suis reconnaissante également envers l'organisme de la zone d'intervention prioritaire les Deux Rives, à la ville de Montréal, et au Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques de m'avoir autorisée à utiliser plusieurs jeux de données me permettant l'interprétation statistique et spatiale lors de cet essai.

Je tiens à remercier ma famille, mes amis et mon amoureux m'ayant appuyée durant l'ensemble de ce processus. Je suis reconnaissante auprès des gens avec qui j'ai étudié dans le cadre de cette maîtrise. Ceux-ci ayant aidé à la rédaction de cet essai et m'ayant soutenue à la rédaction de ce sujet. Je remercie particulièrement ma mère Claudine Bourget et mon amie Jade Cantin qui ont relu ce texte lors de chacune des étapes de la rédaction.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. EFFETS DE LA BACTÉRIE <i>E. COLI</i> DANS LES COURS D'EAU	4
1.1 Portrait de la bactérie <i>Escherichia coli</i>	4
1.1.1 Description biologique et origine de la bactérie.....	4
1.1.2 Problématiques sanitaires liées à la bactérie	5
1.2 Résistance de la bactérie en milieu hydrique.....	6
1.2.1 Habitats et temps de vie en milieu hydrique.....	7
1.2.2 Variables influençant la survie de l' <i>E. coli</i> dans l'environnement.....	7
1.2.3 Variation de la densité d' <i>E. coli</i> selon les saisons.....	9
1.3 Problématique de L' <i>E. coli</i> à travers le monde.....	10
1.3.1 Situation en Afrique.....	11
1.3.2 Situation en Europe.....	12
1.3.3 Situation en Amérique.....	13
1.3.4 Comparaison entre les continents.....	13
1.4 Présentation du fleuve Saint-Laurent	14
1.4.1 Paysage fluvial de la zone d'étude.....	14
1.4.2 Masse d'eau verte.....	16
1.4.3 Masse d'eau brune	17
1.4.4 Rivières présentes dans la zone d'étude	18
2. DYNAMIQUE DE L' <i>E. COLI</i> DU TRONÇON FLUVIAL DU SAINT-LAURENT.....	24
2.1 Description des bases de données	24
2.1.1 Mission Saint-Laurent 2017 et 2018.....	25
2.1.2 Programme Courdo de la ville de Montréal.....	25
2.1.3 Réseau-rivières et réseau-fleuve.....	25
2.1.4 Zone d'intervention prioritaire (ZIP) les Deux Rives du lac Saint-Pierre	26
2.2 Distribution des <i>E. coli</i> dans le fleuve Saint-Laurent	26
2.2.1 Distribution d' <i>E. coli</i> sur le tronçon fluvial	27
2.2.2 Sources d' <i>E. coli</i> dans le fleuve	29
2.2.3 Puits retenant la bactérie <i>E. coli</i>	32

2.3 Rôles hydrologiques de la distribution de la bactérie <i>E. coli</i> dans le fleuve	34
2.3.1 Paysage fluvial	34
2.3.2 Effets des saisons	37
2.3.3 Occupations du territoire	39
3. RÔLES DES RIVIÈRES ET DES SAISONS DANS LA DISTRIBUTION DES <i>E. COLI</i> EN MILIEU FLUVIAL	41
3.1 Charge d' <i>E. coli</i> des différents cours d'eau	41
3.1.1 Effets de l'occupation du territoire sur la concentration en <i>E. coli</i>	41
3.1.2 Effets des tributaires sur les masses d'eau fluviales	44
3.2 Facteurs territoriaux et météorologiques influençant les <i>E. coli</i>	48
3.2.1 Facteurs territoriaux influençant les tributaires	48
3.2.2 Facteurs météorologiques sur l'ensemble du territoire	50
3.3 Influence de la saisonnalité dans les dynamiques de l' <i>E. coli</i>	51
3.3.1 Période hivernale	51
3.3.2 Période printanière	53
3.3.3 Période estivale	54
3.3.4 Période automnale	56
3.3.5 Données saisonnières sur l'ensemble de l'année 2017	57
4. RECOMMANDATIONS	60
CONCLUSION	63
RÉFÉRENCES	66
ANNEXE-1 CARTES DES DONNÉES DE DISTRIBUTION MENSUELLES EN <i>E. COLI</i>	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Illustration d'une colonie d' <i>Escherichia coli</i>	4
Figure 1.2 Cycle de la bactérie <i>Escherichia coli</i>	6
Figure 1.3 Carte de la zone d'étude entre le lac Saint-François et la ville de Portneuf, illustrant les rivières et les lacs fluviaux	15
Figure 1.4 Diagramme de l'occupation du territoire en pourcentage des bassins versants des rivières se jetant dans le tronçon fluvial	23
Figure 2.1 Carte de la distribution des sites d'échantillonnages et leurs bases de données initiales.....	24
Figure 2.2 Carte de la distribution en <i>E. coli</i> en juillet 2017 et 2018.....	27
Figure 2.3 Carte de la distribution d' <i>E. coli</i> en aval du lac Saint-Pierre	29
Figure 2.4 Schémas décrivant le type d'égout unitaire (haut) et séparatif (bas).....	30
Figure 2.5 Carte de la distribution en <i>E. coli</i> en juillet 2017 et 2018 dans le secteur du lac Saint-Pierre.....	33
Figure 2.6 Carte de la distribution en <i>E. coli</i> en juillet 2017 et 2018 dans le secteur des lacs Saint-François et Saint-Louis	35
Figure 2.7 Diagramme de la variation de la concentration en <i>E. coli</i> en hiver (H) et au printemps (P).....	38
Figure 3.1 Diagramme de la distribution de la qualité bactériologique (<i>E. coli</i>) des 15 rivières à l'étude, ayant entre 9 et 12 échantillons par rivières	41
Figure 3.2 Carte de distribution des masses d'eau dans la zone d'étude. A. Secteur de Cornwall à Contrecoeur B. Secteur de Contrecoeur à Québec.	47
Figure 3.3 PLS saisonnière des variables territoriales, physicochimiques et météorologiques étudiées tentant de prédire la concentration en <i>E. coli</i> dans le fleuve Saint-Laurent A. Hiver B. Été	49
Figure 3.4 ACP illustrant les composantes météorologiques sur l'ensemble des données A. représentant les composantes 1 et 2 du modèle B. représentant les composantes 2 et 3 du modèle	50
Figure 3.5 Diagrammes de la variation de la concentration en <i>E. coli</i> pendant la période hivernale 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud.....	52
Figure 3.6 Diagrammes de la variation de la concentration en <i>E. coli</i> pendant la période printanière 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud.....	53
Figure 3.7 Diagrammes de la variation de la concentration en <i>E. coli</i> pendant la période estivale 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud.....	55

Figure 3.8 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* pendant la période
automnale 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs
C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud..... 56

Figure 3.9 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* en fonction des
saisons A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs
C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud..... 57

LISTES DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ACP	Analyse de composante principale
ADN	Acide désoxyribonucléique
°C	Degré Celsius
CDOM	Matière organique dissoute colorée
ECCC	Environnement et changement climatique Canada
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EFE	Écosystèmes forestiers exceptionnels
km	Kilomètre
km ²	Kilomètre carré
LSP	Lac Saint-Pierre
m	Mètre
m ³ /s	Mètre cube par seconde
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
mL	Millilitre
MRC	Municipalité régionale de comté
MSL	Mission Saint-Laurent
MTL	Montréal
pH	Potentiel hydrogène
PLS	Partial least square
Programme Courdo	Bilan annuel de la qualité de l'eau en aval de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Montréal publié par le Réseau de suivi du milieu aquatique (RSMA)
RSMA	Réseau de suivi du milieu aquatique
SHU	Syndrome hémolytique et urémique
St/ Ste	Saint/Sainte
UV	Ultra-violet
UFC	Unité formant une colonie
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
ZIP	Zone d'intervention prioritaire

INTRODUCTION

Puisque l'eau représente la vie, il est primordial d'en connaître sa qualité, c'est la raison de l'intérêt porté sur la bactérie *Escherichia coli* (*E. coli*). Celle-ci provient des excréments humains et animaux et peut survivre en conditions favorables jusqu'à trois mois dans l'eau naturelle (Groupe scientifique sur l'eau, 2017; Ville de Montréal, 2019). Cette bactérie sert de bio-indicateur à la pollution fécale, pouvant correspondre à des microorganismes néfastes pour la santé humaine (Chevremont, Farnet, Sergent, Coulomb, et Boudenne, 2012; da Silveira, Pich, Angioletto, et Bernardin, 2011). Les différentes bactéries fécales s'éliminent dans les masses d'eau de façon comparable à la bactérie *E. coli*, bien que cette dernière semble plus résistante (Chevremont et al., 2012). L'élimination naturelle de cette bactérie est due aux rayons UV du soleil, à la concentration en oxygène dans l'eau, à la salinité ainsi qu'à des produits chimiques inhibiteurs ou désinfectants. Des facteurs biologiques affectent également l'abondance en *E. coli* dans l'eau tels que la compétition avec les microorganismes aquatiques, ainsi que la consommation par les zooplanctons (Kischel, 2018). L'hydrologie du cours d'eau ainsi que l'occupation des sols du bassin versant sont des facteurs géographiques influençant la distribution des coliformes fécaux tels que la bactérie *E. coli* (Rochelle-Newall et al., 2016).

Selon la concentration mesurée, la baignade (plus de 200 coliformes par 100 mL) ou les activités de plaisance (plus de 1000 coliformes par 100 mL) peuvent être déconseillées. Ces indicateurs permettent de réduire les risques sanitaires liés aux contacts avec l'*E. coli* (Ministère de l'Environnement et lutte contre les changements climatiques [MELCC], s. d.b). La présence de la bactérie *E. coli* sur un substrat ingéré par l'humain peut causer des symptômes tels que des crampes, de la fièvre, des inflammations ainsi que de la diarrhée pour les personnes ayant été en contact avec cette bactérie (Hawley et Bradford, 2019). En plus de leur présence en eaux libres, la bioaccumulation de la bactérie *E. coli* chez les bivalves engendre également une problématique sanitaire lorsqu'elles sont consommées par les êtres humains. Toutefois, les conséquences de cette accumulation dans l'écosystème sont peu documentées à ce jour (Balière, 2017; Kischel, 2018).

Au Québec, le suivi de la qualité de l'eau des cours d'eau inclut notamment les coliformes fécaux et l'*E. coli*. Le plus grand cours d'eau de cette province est le fleuve Saint-Laurent qui puise son eau des Grands Lacs ainsi que des tributaires présents dans son bassin versant. Il est un pôle commercial important reliant Montréal au reste du monde en plus de fournir de l'eau potable à près de la moitié de la population du Québec (Giroux, Hébert et Berryman, 2016). Dans cet essai, le secteur du fleuve étudié couvre l'amont du lac Saint-François jusqu'à la proximité de Portneuf, c'est-à-dire la portion est du tronçon fluvial. Sur ce territoire, plusieurs endroits présentent des caractéristiques particulières, entre autres, Montréal avec son usine d'épuration qui se jette dans le fleuve Saint-Laurent (Ville de Montréal, 2019). La population croît à proximité du fleuve et cette présence entraîne des enjeux de qualité de l'eau en matière de rejets urbains et agricoles. Le lac Saint-Pierre fait également partie du secteur de recherche puisqu'il s'agit d'un site

Ramsar, une zone humide protégée (Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs [MDDEFP], 2013b).

Malgré la rédaction de rapports par la Ville de Montréal et du MELCC (Réseau-rivières), la distribution des *E. coli*, spatialement et temporellement, dans le fleuve Saint-Laurent demeure incomplète et peu connue de la communauté scientifique et des citoyens. Toutefois, plusieurs données ont été recueillies au fil du temps sans nécessairement être analysées dans le but de comprendre les dynamiques de cette bactérie (MELCC, s. d.a; Université du Québec à Trois-Rivières [UQTR], sous presse; Ville de Montréal, 2018). Il s'agit d'un enjeu important puisque l'image négative de la qualité de l'eau du fleuve réduit l'envie aux riverains de se baigner de même qu'aux villes riveraines de développer des plages (MELCC, s. d.b). C'est dans l'esprit de comprendre la distribution spatiale et la dynamique temporelle de cette bactérie que cet essai cherche à intégrer le rôle hydrologique ainsi que l'occupation du territoire. Ceux-ci servent à cibler les sources d'*E. coli* et son devenir dans le fleuve Saint-Laurent.

Au fil des saisons, la qualité de l'eau du fleuve Saint-Laurent varie, car les intrants biotiques ainsi que la quantité d'eau changent. Au printemps, la fonte des neiges provoque la crue des eaux, inondant les rives du lac Saint-Pierre et amenant avec elle une grande quantité de polluants dans l'eau fluviale (Ville de Montréal, 2019). Mis à part les grands centres urbains, il y a majoritairement des zones agricoles et forestières à proximité du fleuve Saint-Laurent et de ses tributaires. L'occupation du territoire de ces bassins versants a un rôle dans la distribution des intrants dans ce cours d'eau québécois (Simoneau, 2017).

L'objectif principal de cet essai est de dresser un portrait intégré de la distribution de la bactérie *Escherichia coli* dans le fleuve Saint-Laurent et de ses sources afin de diriger les futurs efforts de mitigation. Pour ce faire, il est prévu d'identifier les secteurs et les périodes où la concentration en *Escherichia coli* est problématique dans le fleuve. En plus d'être nocive pour la santé humaine, la bactérie *E. coli* est utilisée en tant qu'indicateurs, démontrant la présence d'autres microorganismes pathogènes. Il est également prévu d'établir l'origine de la bactérie, sa distribution ainsi que les relations entre l'occupation du territoire et les charges en *E. coli* du fleuve par les grands tributaires et les villes riveraines. Cette dernière permet de déterminer le type de corrélation entre la distribution d'*E. coli* en milieu hydrique et l'occupation du territoire. Il est possible d'estimer l'origine de la bactérie dans le fleuve en connaissant le rôle de l'hydrologie et des inondations dans l'exportation d'*E. coli* vers le fleuve. Puis une série de recommandations est formulée dans le but de réduire le déversement ou l'accumulation d'*Escherichia coli* dans le fleuve Saint-Laurent. Celles-ci peuvent ensuite être utilisées par les gestionnaires du territoire afin de réduire la concentration de la bactérie dans le tronçon fluvial.

Afin de pouvoir répondre à l'objectif principal et aux objectifs spécifiques énumérés précédemment, plusieurs jeux de données sont utilisés. D'abord, les missions de 2017 et 2018 du navire de recherche de l'Université du Québec à Trois-Rivières le *Lampsilis* ont recueilli plus d'une centaine de données disponibles pour la rédaction de cet essai. Lors de la première mission du navire, le territoire parcouru est du lacs Saint-

François jusqu'à Portneuf, en juillet 2017. Alors que la seconde année, la distance parcourue débute hors de la zone d'étude c'est-à-dire à l'embouchure des Grands Lacs jusqu'à Sainte-Anne-de-la-Pérade, pendant la période estivale (UQTR, sous presse). Ensuite, la ville de Montréal a échantillonné de l'île aux Vaches à l'exutoire de la station d'épuration de Montréal jusqu'au pont Laviolette à Trois-Rivières pendant l'été et l'automne 2017 (Ville de Montréal, 2019). Puis le Réseau-rivières fournit les informations sur les tributaires se jetant dans les eaux fluviales de façon mensuelle. De plus, quelques stations de suivis sont également sur le fleuve Saint-Laurent de 2017 (MELCC, s. d.a). Les derniers jeux de données proviennent de la zone d'intervention prioritaire les Deux Rives qui a échantillonné, en automne 2019, les rives en aval du lac Saint-Pierre (Zone d'intervention prioritaire les Deux Rives, sous presse).

Dans le premier chapitre, une revue de littérature permet de connaître les effets de la bactérie *E. coli* dans le cours d'eau en incluant les effets sur la santé humaine et sa présence en milieu hydrique à travers le monde et dans le fleuve Saint-Laurent. Le second chapitre se concentre sur la dynamique de l'*E. coli* sur le fleuve Saint-Laurent dans la zone d'étude soit du lac Saint-François jusqu'à Portneuf. Le rôle de l'hydrologie dans la distribution de l'*E. coli* de ce milieu hydrique ainsi que la délimitation des zones sensibles va être déterminés à l'aide d'échantillons pris au cours des années 2017 et 2018. Le troisième chapitre concerne le rôle des tributaires dans la distribution des *E. coli* en milieu fluvial, comparant la quantité en *E. coli* dans les différents tributaires et en mettant en relation l'occupation du territoire afin de pouvoir mesurer les effets des tributaires et leurs bassins versants dans les différentes masses d'eau fluviales. Ce chapitre traite également de l'influence de la saisonnalité dans la dynamique de l'*E. coli*, où chacune des saisons fait varier la concentration en *E. coli*. Puis, une série de recommandations est listée dans le but d'offrir des pistes de solutions afin de réduire la problématique de ce coliforme fécal dans le milieu hydrique.

1. EFFETS DE LA BACTÉRIE *E. COLI* DANS LES COURS D'EAU

La qualité de l'eau se mesure à l'aide de plusieurs indicateurs, tels que les coliformes fécaux. Dans ce groupe se retrouve le groupe des *E. coli* qui ont un impact sur la santé humaine, en plus d'indiquer la présence d'autres microorganismes fécaux possiblement néfaste pour la santé humaine (MELCC, s. d.b). De plus, la concentration en bactérie *E. coli* est influencée par les activités urbaines et agricoles (Petit et Teyssiere, 2013). En plus de ces problématiques sanitaires, cette bactérie est étudiée à de nombreux endroits dans le monde ainsi que sur le fleuve Saint-Laurent.

1.1 Portrait de la bactérie *Escherichia coli*

Avant d'approfondir sur la problématique, il est important de déterminer au sens biologique ce qu'est la bactérie *Escherichia coli* ainsi que de spécifier ses origines. Il y a également un aspect sanitaire qui n'est pas à négliger, car de nombreux symptômes peuvent être associés à la présence de cette bactérie chez l'être humain.

1.1.1 Description biologique et origine de la bactérie

La bactérie *E. coli* regroupe en réalité 184 espèces de bactéries dont certaines causent des infections chez les êtres humains (Iguchi et al., 2014; Todd et Baker, 2018). Ce groupe de bactéries fait partie de la grande famille des Enterobacteriaceae, c'est-à-dire des bactéries en forme de bacille à Gram négatif. La figure 1.1 représente une colonie d'*Escherichia coli*. Ces bactéries ont plusieurs couches protégeant le cytoplasme : la membrane interne, un espace périplasmique, une couche de peptidoglycanes et une membrane externe recouverte d'une capsule. Certaines espèces d'*E. coli* se déplacent à l'aide de flagelles alors que d'autres utilisent des pili (Hawley et Bradford, 2019).

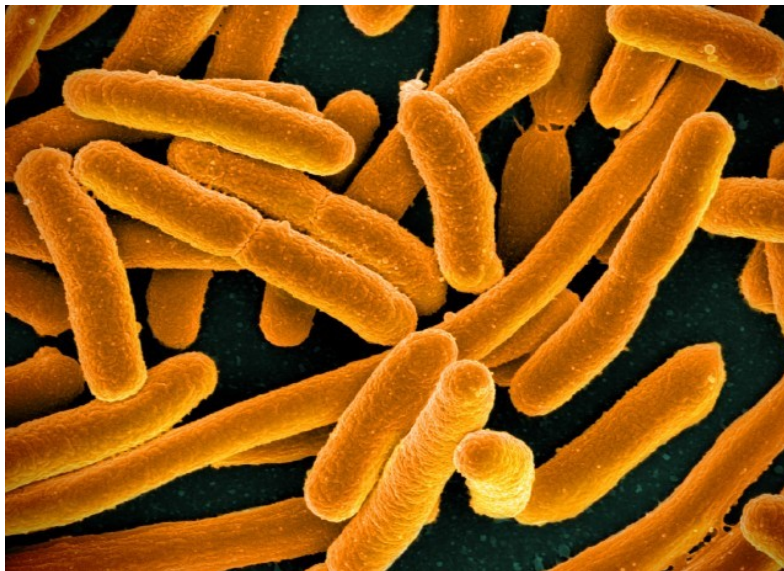


Figure 1.1 Illustration d'une colonie d'*Escherichia coli* ([NIAID, Flickr](#))

La température optimale de prolifération est de 37 °C ce qui correspond à la température corporelle des humains ainsi que de plusieurs autres mammifères et animaux à sang chaud. Il s'agit d'une bactérie sous dominante aérobique pouvant également proliférer en milieux anaérobies dans le tube intestinal des mammifères, car elle est tolérante à un environnement limité en oxygène (Balière, 2017). Cette bactérie possède deux phases, soit celle de maturation dans l'intestin de plusieurs animaux puis dans un habitat moins propice lui permettant de coloniser d'autres milieux (van Elsas, Semenov, Costa, et Trevors, 2011).

Les nombreuses bactéries *E. coli* se retrouvent dans les systèmes digestifs des animaux à sang chaud ainsi que des reptiles (Balière, 2017; Hawley et Bradford, 2019). Les bovins, les caprins ainsi que les humains excrètent cette bactérie par leurs fèces pouvant s'avérer être une souche infectieuse. Les fèces de ces espèces peuvent se rendre dans les cours d'eau ou être utilisées comme fertilisant dans les champs. C'est pourquoi les fruits et les légumes peuvent être porteurs d'*E. coli*, lorsque mal lavé ou lavé avec de l'eau impropre (Todd et Baker, 2018). La majorité des souches d'*E. coli* est sans danger pour l'humain et se retrouve naturellement dans le système digestif de plusieurs mammifères. Il reste tout de même plusieurs souches pouvant nuire à la santé des êtres humains tels que O157 H7 qui est associée à la plupart des contaminations répertoriées par ce groupe de bactéries au Canada (Todd et Baker, 2018).

Bien que la forme générale de ces bactéries soit similaire, il existe plusieurs méthodes permettant de différencier les nombreuses souches d'*E. coli*. La méthode servant à isoler le O-sérotype détermine souvent si la souche est pathogène ou non. Pour ce faire, l'antigène O regroupé subit un séquençage d'acide désoxyribonucléique (ADN) afin de pouvoir définir leurs sérotypes (Iguchi et al., 2014). L'ADN complet de la bactérie peut également être séquencé dans son ensemble afin de définir les locus différents d'une souche à l'autre, dans le but de classer les souches selon leurs caractéristiques biologiques (van Elsas et al., 2011). Cette bactérie peut causer divers problèmes de santé chez l'être humain.

1.1.2 Problématiques sanitaires liées à la bactérie

La diversité des souches d'*E. coli* ayant un gène virulent se traduit en une variété de symptômes pouvant être observé chez l'être humain. Certaines transmettent des symptômes de type entérohémorragique, c'est le cas de O157, O26, O103 et O111 (Iguchi et al., 2014). Ces bactéries produisent la Shigatoxine pouvant causer des nausées, des crampes, de la déshydratation, des vomissements et dans certains cas des diarrhées sanglantes (Hawley et Bradford, 2019; Todd et Baker, 2018). Les bactéries enthéropathogéniques s'accrochent aux parois intestinales de leurs hôtes pouvant induire des symptômes tels que de la diarrhée, de la fièvre ainsi que des vomissements. Puis, d'autres souches peuvent être enthérotoxigéniques créant des symptômes variés allant de peu de symptômes jusqu'à de violentes diarrhées (Hawley et Bradford, 2019).

La souche O157-H7 est considérée comme la souche la plus virulente de la bactérie *E. coli*, car elle peut entraîner un syndrome hémolytique et urémique (SHU) chez certains patients (Iguchi et al., 2014; Todd et Baker, 2018). La contamination peut s'être produite à la suite de consommation de bœufs ou de légumes

contaminés par le fumier agricole servant d'engrais (Hawley et Bradford, 2019). Au Canada, la souche de O157-H7 touche en moyenne 470 personnes par année, ceux-ci peuvent subir de graves symptômes se rendant parfois à des décès. Cependant, la plupart des gens ont les symptômes de cette infection pendant deux semaines et se rétablissent sans avoir recours à des traitements (Todd et Baker, 2018). Les antibiotiques représentent les premiers traitements pour traiter l'infection liée à la bactérie *E. coli*. Pour les patients ayant contracté le SHU, il est possible que la dialyse rénale soit nécessaire, lorsque les antibiotiques ne sont pas efficaces (Hawley et Bradford, 2019). Le SHU provient du fait que les Shigatoxines traversent le tube digestif de l'intestin pour se rendre dans le sang puis dans les reins (Balière, 2017). Ce syndrome, parfois mortel, est plus souvent observé chez les enfants que les adultes (Hawley et Bradford, 2019).

En plus du tractus digestif des animaux à sang chaud, les différentes souches de la bactérie *E. coli* peuvent survivre et parfois même croître dans des milieux abiotiques tels que les sols ou les cours d'eau. En effet, le mode de vie biphasique de cette bactérie permet à la bactérie de survivre hors de son hôte pour éventuellement retrouver le système digestif d'un autre hôte de la même espèce ou d'une espèce différente (van Elsas et al., 2011). L'*E. coli* peut tout de même vivre en milieux hydriques lorsque les conditions sont favorables.

1.2 Résistance de la bactérie en milieu hydrique

La figure 1.2 illustre le cycle de vie où les deux phases de la vie de la bactérie sont présentées.

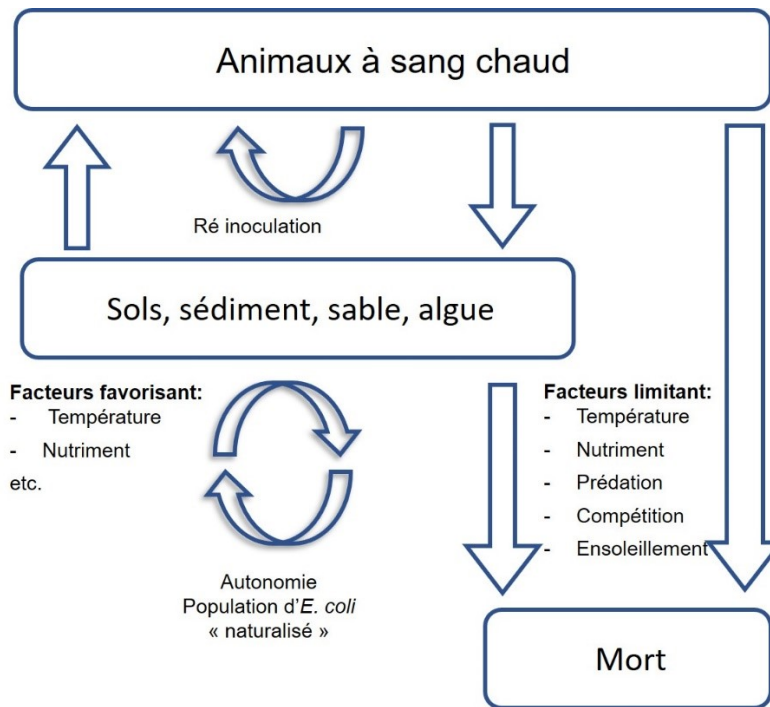


Figure 1.2 Cycle de la bactérie *Escherichia coli* (tiré de Balière, 2017)

En milieu hydrique, la quantité en bactérie *Escherichia coli* est majoritairement d'origine urbaine par les rejets sanitaires des villes ainsi que d'origine agricole par les engrais de fumier (Balière, 2017). Cette bactérie passe donc d'un milieu favorable pour sa croissance à un milieu rude où de nombreux facteurs influencent sa persistance dans ce nouvel habitat (van Elsas et al., 2011).

1.2.1 Habitats et temps de vie en milieu hydrique

La bactérie *Escherichia coli* est biphasique, c'est-à-dire qu'elle possède deux phases de vie telle qu'illustrée à la figure 1.2. D'abord, elle prolifère dans le tractus digestif d'un animal à sang chaud, la plus grande densité de cette bactérie est dans le colon. Les *E. coli* cohabitent avec plusieurs autres bactéries dans le mucus protégeant les cellules épithéliales du tube digestif, constituant un environnement propice à la prolifération de la bactérie *E. coli* (Balière, 2017). Puis, la bactérie est éjectée du tube digestif, se dirigeant vers les milieux naturels. Ce second habitat est considérablement différent et instable, à l'inverse du premier, qu'il s'agisse de fumier, de sols, de sédiments ou de l'eau libre (Balière, 2017; van Elsas et al., 2011). Sous ces nouvelles conditions, la bactérie est capable de s'adapter afin de favoriser sa survie dans ce nouvel habitat. Plusieurs facteurs de stress sont présents pouvant réduire la concentration de l'*E. coli* dans ce milieu (van Elsas et al., 2011). Ces conditions de stress peuvent également induire une période de dormance permettant à *E. coli* de persister dans le milieu jusqu'à ce que les conditions soient favorables (Campos, Kershaw, et Lee, 2013; van Elsas et al., 2011). Plusieurs conditions peuvent induire une période de dormance pour cette bactérie, telles que le déficit nutritionnel, une radiation solaire importante ainsi qu'une augmentation de la salinité (Campos et al., 2013). La présence d'une forte concentration de nutriments dans l'environnement peut faire sortir la bactérie *E. coli* hors de sa période de dormance (van Elsas et al., 2011).

La survie de la bactérie *E. coli* en milieu naturel varie grandement entre le milieu terrestre et aquatique. Dans le fumier, le taux de survie est favorable, car les conditions sont comparables à son habitat primaire. Bien que le temps de survie de la bactérie ne soit pas estimé, certaines toxines peuvent rester jusqu'à 24 mois dans les fèces humaines et 38 mois dans les fèces bovines (Balière, 2017). C'est pourquoi les fumiers épandus peuvent être une source importante d'*E. coli* ruisselant jusque dans les cours d'eau. Dans ces derniers, la bactérie peut coloniser les sédiments ou l'eau libres. Dans les sédiments, l'*E. coli* peut survivre entre 65 et 80 jours alors qu'en eau libre salée, elle survit au plus 20 jours (Balière, 2017; Campos et al., 2013). La survie dans les cours d'eau varie selon sa salinité, en eau douce l'*E. coli* peut survivre 60 jours, soit trois fois plus longtemps qu'en eau salée (Balière, 2017). En observant la variation de persistance de l'*E. coli* dans l'environnement, il est évident que plusieurs facteurs influencent le taux de survie de cette bactérie.

1.2.2 Variables influençant la survie de l'*E. coli* dans l'environnement

La transition entre le tractus digestif d'un animal vers un milieu ouvert tel que le sol ou l'eau, modifie grandement les conditions de survie de la bactérie *E. coli*. Celle-ci passe d'un milieu où la température, le

pH ainsi que les nutriments sont relativement constants vers un endroit où la bactérie est exposée à de nombreuses variations (Balière, 2017). Plusieurs de ces facteurs influencent la survie des *E. coli* dans l'environnement, car ceux-ci peuvent être abiotiques ou biotiques (Campos et al., 2013).

Selon les recherches de Campos et ses collaborateurs (2013), le plus grand élément limitant la survie de la bactérie *E. coli* en milieu hydrique, particulièrement en milieu estuarien, est la radiation solaire. En effet, leur revue de littérature à ce sujet démontre que le temps de vie de la bactérie est 27 fois plus court sous la lumière que dans la noirceur. Cependant, les effets de la lumière varient selon la latitude de la zone d'étude, car l'intensité lumineuse change (Balière, 2017). Les effets de la luminosité sont souvent liés à ceux de la température, en favorisant la survie de la bactérie *E. coli* lorsque celle-ci augmente s'approchant de la température optimale permettant sa croissance (van Elsas et al., 2011). La vie de l'*E. coli* est donc compromise lorsque la température est basse. Une exposition prolongée à de fraîches températures telles que 11 °C ou 7 °C peut considérablement réduire la densité d'*E. coli* dans le milieu (Campos et al., 2013; van Elsas et al., 2011). La variation rapide de température peut également avoir des effets néfastes sur la bactérie créant un stress, que ce soit une diminution ou une augmentation de la température (van Elsas et al., 2011).

En milieu naturel, le pH varie davantage que dans le système digestif des animaux à sang chaud. La bactérie *E. coli* a un meilleur taux de survie dans les milieux acides tels que les sols riches en purin servant de fertilisant (Balière, 2017). Parmi les nombreuses souches de la bactérie, peu de sérotypes ont la capacité de survivre aux milieux acides créant donc une population peu diversifiée (van Elsas et al., 2011). De plus, la survie des bactéries dépend de la quantité de nutriments disponibles dans l'environnement. Les nutriments proviennent des sédiments ainsi que les affluents, tous les deux accompagnés de population d'*E. coli* qui ont un meilleur taux de survie (Campos et al., 2013). Les communautés d'*E. coli* sont capables d'absorber différentes sources de carbone, malgré tout, la rareté des nutriments réduit la survie de la bactérie (van Elsas et al., 2011). Dans les cours d'eau, les nutriments sont majoritairement dans les premiers centimètres de sédiments, laissant la zone d'eau libre quasiment dépourvue de nutriments pour l'*E. coli* (Campos et al., 2013; van Elsas et al., 2011). Cependant, certains cours d'eau riches en nutriments peuvent favoriser la présence de cette bactérie dans l'eau libre tels que les tributaires agricoles (Miller, Schoonover, Williard, et Hwang, 2011). La turbidité de l'eau indique que les nutriments sont élevés en eau libre, les particules proviennent des affluents ainsi que des sédiments remis en suspension lors des périodes de crue (Campos et al., 2013).

En plus de ces facteurs abiotiques, plusieurs facteurs biotiques affectent la survie de l'*E. coli* en milieu naturel. En présence de cours d'eau oligotrophes, les nutriments se sédimentent réduisant la quantité disponible pour la bactérie pouvant également engendrer la compétition entre l'*E. coli* et les bactéries indigènes du milieu (Balière, 2017). Dans un nouvel écosystème déjà riche en microorganismes, la bactérie *E. coli* peut avoir de la difficulté à persister, car elle entre en compétition avec des espèces déjà capables

d'avoir accès aux nutriments. Il a été observé qu'en condition stérile, les colonies d'*E. coli* peuvent croître en raison de l'absence de compétiteur et prédateur. Cependant, sa survie en présence de compétiteurs n'est toutefois pas toujours létale, car l'*E. coli* est capable de s'adapter rapidement dans son milieu (van Elsas et al., 2011). Il n'est pourtant pas possible de formuler une hypothèse à la suite de ces informations, car il y a trop peu d'information sur les effets de la disponibilité des nutriments permettant de prédire la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau. Les interactions entre l'*E. coli* et les autres microorganismes peuvent être nuisibles, notamment les protozoaires qui consomment la bactérie en milieu hydrique ainsi que dans le fumier (Campos et al., 2013; van Elsas et al., 2011). Il a été démontré que l'*Acanthamoeba polyphaga* est un protozoaire qui s'attaque à la souche O157 H7 de l'*E. coli*, soit la souche la plus infectieuse au Canada (Todd et Baker, 2018; van Elsas et al., 2011). De surcroît, une corrélation positive entre la température et la présence de protozoaire cilié réduit la quantité d'*E. coli* dans le milieu, à cause de leur prédation. Malgré une température favorable pour la bactérie *E. coli*, il est tout de même possible que son effectif diminue. En habitat eutrophe, la pression de prédation subite par l'*E. coli* provient également des rotifères qui s'en prennent aux bactéries présentes en eaux libres dans le milieu (Campos et al., 2013). Bien que des effets bien précis aient été observés sur des interactions entre l'*E. coli* et des espèces spécifiques, le rôle de la biodiversité microbienne ne semble pas avoir d'impact sur la survie de la bactérie *E. coli* (van Elsas et al., 2011). En somme, la prédation ainsi que la radiation solaire sont les facteurs qui réduisent le plus le taux de survie de la bactérie *E. coli* (Campos et al., 2013).

1.2.3 Variation de la densité d'*E. coli* selon les saisons

L'effet des saisons occasionne une variation de la plupart des facteurs influençant la survie de la bactérie *E. coli*. La variation de température induit un changement de l'abondance des souches d'*E. coli* dans l'environnement ainsi qu'une réduction de concentration (Campos et al., 2013; Lyautey et al., 2010; Stanford, Johnson, Alexander, McAllister, et Reuter, 2016). En effet, Lyautey et ses collaborateurs (2010) suggèrent qu'il y a une transition entre les souches présentes dans un bassin versant ontarien, proposant que l'origine des bactéries change selon les saisons. L'équipe de Stanford, en 2016, confirme cette hypothèse en analysant le bovin d'abattage des Prairies canadiennes et en démontrant la transition des sérotypes O26, O103, O121 et O157 en été vers les sérotypes O45 et O111 en hiver. De plus, bien que les déchargements agricoles soient sensiblement les mêmes en Amérique du Nord, il est prouvé que la concentration de bactéries dans les déchargements de fumier hivernaux est significativement moins importante (Campos et al., 2013; Stanford et al., 2016). Pour ce qui est des activités des effluents urbains, peu d'informations en période hivernale sont disponibles, leurs écoulements peuvent peut-être expliquer la présence hivernale d'*E. coli* (Stanford et al., 2016).

De plus, les événements de pluie entraînent une grande quantité de bactéries et altèrent la qualité de l'eau en la rendant turbide (Tornevi, Bergstedt, et Forsberg, 2014). Ces épisodes de crue favorisent le déplacement des bactéries par le lessivage du sol vers les cours d'eau (Lyautey et al., 2010). Les épisodes de pluie peuvent expliquer près de 50 % de la variation de concentration en *E. coli* au printemps alors qu'elle

explique 20 % de variation en hiver et automne pour une rivière de la Suède (Tornevi et al., 2014). C'est pourquoi les tempêtes et les coups d'eau doivent être pris en comptes lors de l'étude de la dynamique de la bactérie *E. coli* dans les cours d'eau.

La luminosité varie également selon les saisons, induisant une plus grande radiation en été qu'en hiver, car le temps d'ensoleillement est plus grand qu'en hiver. De surcroit, une couche de glace peut recouvrir les cours d'eau limitant également la pénétration de la lumière dans la masse d'eau (Häder et al., 2015). La radiation solaire par les rayons ultra-violet (UV) a la capacité de dégrader l'ADN des bactéries telle que l'*E. coli* (Chevremont et al., 2012). La radiation solaire peut également varier selon la quantité de nutriment en eaux libres ainsi qu'avec la turbidité. En effet, ces deux variables réduisent la pénétration de la lumière dans les cours d'eau, l'empêchant de se rendre plus profondément dans la colonne d'eau (Häder et al., 2015). L'effet de la saisonnalité de la radiation solaire peut favoriser la présence de la bactérie *E. coli* dans les cours d'eau, lorsque les températures hivernales sont clémentes (Tornevi et al., 2014). Selon plusieurs recherches, la température optimale pour cette bactérie est de 37 °C, mais *E. coli* a été observé à des températures descendant entre 7 et 11 °C (van Elsas et al., 2011). En période hivernale d'Amérique du Nord, la température est la variable limitant la densité d'*E. coli*, malgré la réduction des effets de la radiation solaire (Stanford et al., 2016). Le niveau des cours d'eau varie grandement au fil des saisons, induisant également une fluctuation de la densité de la bactérie *E. coli* ainsi que ses prédateurs (Campos et al., 2013). En période de crue, l'augmentation de la quantité d'eau et son débit crée une dilution de la concentration en *E. coli*. Lorsqu'une quantité importante d'eau est transportée rapidement, la remise en suspension de la matière peut toutefois augmenter la concentration en *E. coli* en eau libre (Balière, 2017). Les concentrations en *E. coli* dans les cours d'eau varient selon les saisons ainsi que les précipitations. En effet, il peut y avoir près de 50 % plus d'*E. coli* au printemps qu'en automne (Lyautey et al., 2010). Au Michigan, le département de la santé estime que 65 000 gallons de matières fécales non traitées sont rejetés dans les cours d'eau de l'état chaque année (Pandey, Soupir, Haddad, et Rothwell, 2012). Il est donc important de prendre en compte la saisonnalité ainsi que les facteurs biotiques et abiotiques afin de comprendre les tendances de la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau. En effet, plusieurs variables peuvent influencer la présence de la bactérie tout en étant corrélées les unes avec les autres. Étant donné que la bactérie *E. coli* est présente dans les fèces des mammifères, elle est retrouvée partout dans le monde.

1.3 Problématique de L'*E. coli* à travers le monde

Les bactéries *E. coli* ont été mesurées dans plusieurs grands fleuves et rivières dans le monde. Pour chacune, des régions, l'origine de la bactérie, l'étendue de la problématique ainsi que les effets environnementaux et sanitaires varient (Chahboune, Chahlouoi, et Zaid, 2014; Passerat, Ouattara, Mouchel, Rocher, et Servais, 2011). La situation sur les différents continents varie beaucoup, car les conditions de vie, la densité de population, la météo et la disponibilité en eau ne sont pas les mêmes.

1.3.1 Situation en Afrique

Dans le continent africain, la densité de population est en constante augmentation, forçant également l'efficacité agricole afin de pouvoir nourrir les populations. Cette densité de population peut altérer davantage la qualité de l'eau due à des réseaux de récupération d'eaux usées inadéquats réduisant considérablement l'accessibilité en eaux potables sur ce continent (Gemmell et Schmidt, 2012). Cette augmentation de population engendre des problèmes sanitaires liés aux rejets d'eaux usées par des installations non conformes ou simplement absentes amenant l'eau chargée de coliformes fécaux directement dans les cours d'eau (Chahboune et al., 2014; Nougang et al., 2011). Certaines méthodes de traitements des eaux usées peuvent être efficaces telles que des usines de filtrations mécaniques et les étangs d'aérations. Ces usines peuvent avoir jusqu'à 90 % d'efficacité, alors que les fosses septiques de ce continent n'ont qu'en moyenne 40 % d'efficacité (Fulazzaky, Seong, et Masirin, 2010). De plus, les différentes activités agricoles du continent sont une seconde source d'*E. coli* en milieu hydrique. L'érosion des sols agricoles fraîchement épandus ou des parcelles agricoles où le fumier est entreposé transporte l'eau chargée de bactéries *E. coli* dans les rivières (Chahboune et al., 2014; Fulazzaky et al., 2010). Les animaux domestiques des peuples nomades majoritairement des ovins peuvent créer des rejets dans la nature et dans les cours d'eau lorsqu'ils vont s'abreuver (Chahboune et al., 2014; Nougang et al., 2011). Les animaux sauvages peuvent également avoir un impact lors des migrations ou même la faune sauvage excréant dans leurs habitats puis dans les cours d'eaux (Chahboune et al., 2014). Finalement, une dernière source d'*E. coli* dans les cours d'eau peut être due à des rejets de matières fécales illégales dans l'environnement (Gemmell et Schmidt, 2012).

En fonction de l'occupation du territoire, de la gestion de l'eau et des gouvernements des différents pays africains, la qualité de l'eau peut grandement varier. Gemmell et Schmidt (2012) ont étudié la qualité de l'eau de la rivière Baynespruit, en Afrique du Sud, où la concentration d'*E. coli* varie entre 7300 unités formant des colonies par volume de 100 millilitres (UFC/100 mL) et 301 000 UFC/100 mL avec une moyenne de 77 400 UFC/100 mL. L'association mondiale de la santé émet la recommandation de ne pas utiliser l'eau ayant une concentration excédant 1000 UFC, soit 77 fois mieux que la moyenne observée dans cette région de l'Afrique du Sud. Les concentrations en *E. coli* dans l'eau y sont si grandes que l'irrigation des terres agricoles et le rinçage des fruits et légumes sont fortement déconseillés (Gemmell et Schmidt, 2012). Au Maroc, la situation est assez différente à proximité du barrage Hissan II, car la qualité de l'eau est assez bonne pour permettre aux gens de consommer l'eau, lorsque la qualité de l'eau répond aux normes du pays (Chahboune et al., 2014).

Au niveau de la santé, la présence d'*E. coli* dans les cours d'eau affecte la population qui utilise l'eau à leur disposition sans nécessairement connaître la qualité bactériologique du cours d'eau. En effet, plusieurs cas d'infections peuvent être liés à la présence d'*E. coli* dans l'eau que les gens consomment. Dans l'étude de Nougang et ses collaborateurs (2011) parmi les 13 points d'eau analysés, 11 cas d'infections de la bactérie *E. coli* d'un sérotype hétéropathogène ont été répertoriés dans la région Yaoundé au Cameroun. De plus,

cette étude relate de nombreux risques d'infections causés par le sérotype O157 qui est l'un des plus infectieux (Nougang et al., 2011; Todd et Baker, 2018).

Bien que la situation en Afrique soit différente de celle en Europe ou au Québec, il est tout de même possible de faire un parallèle avec les grands centres urbains. En effet, l'efficacité ou la présence des usines d'épuration des eaux usées, ainsi que l'occupation du territoire peuvent être mises en cause puisqu'ils n'ont pas été conçus pour autant de gens (Gemmell et Schmidt, 2012; Hébert, 2016).

1.3.2 Situation en Europe

En Europe, la situation en *E. coli* est différente de celle en Afrique. Par exemple, les installations de traitement des eaux usées sont présentes, malgré le fait qu'elles peuvent être une source de rejet dans le milieu hydrique. Les sources d'*E. coli* issues des installations de traitement peuvent être dues à des traitements non adaptés des eaux usées, à l'étanchéité des tuyaux, aux mauvais raccordements du réseau ainsi qu'à des surverses du réseau de collecte (Kischel, 2018). Le réseau de collecte peut être surchargé en période de pluie lorsque les eaux usées et les eaux de pluie partagent les mêmes conduites d'égout, car c'est à ces périodes que des déversements en milieux hydriques peuvent se produire (Kischel, 2018; Tornevi et al., 2014). En plus de la pluie, la densité de population affecte la Seine. Ce fleuve traverse Paris, où 75 % de la pollution en coliformes fécaux provient de la capitale française et ses arrondissements (Passerat et al., 2011). Une autre source importante de bactérie *E. coli* dans les réseaux hydriques européens proviendrait des activités agricoles, soit par le lessivage des sols fertilisés en lisier ou fumier ou par l'érosion des terrains réservés aux pâturages des animaux (Kischel, 2018; Vermeulen et Hofstra, 2014). De plus, plusieurs bateaux de plaisance habités ne disposent pas de systèmes de récupération d'eau noire, ceux-ci représentent une source de coliformes fécaux dans les cours d'eau sur lesquels ils naviguent (Kischel, 2018).

Parmi les recherches européennes, plusieurs conclusions ont été émises quant aux zones d'accumulations et des effets de la météo sur la concentration en *E. coli* dans l'eau. La bactérie *E. coli* est capable de s'associer aux matières en suspension pouvant être plus abondantes dans la matière organique que dans l'eau vive. L'eau peut remettre en suspension les sédiments libérant de 47 à 69 % de la concentration d'*E. coli* lorsque les conditions sont favorables, telles que des précipitations (Passerat et al., 2011). En périodes de pluie, la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau peut quadrupler, comparé au temps sec, que ce soit par la remise en suspension de la bactérie ou par le lessivage des sols (Passerat et al., 2011; Tornevi et al., 2014). De plus, la Seine subit beaucoup de pression anthropique par la ville de Paris et ses arrondissements. Les débordements d'égouts combinés de la ville et ses arrondissements augmentent de 7 à 9 fois la concentration en coliformes fécaux comparés en amont de Paris (Passerat et al., 2011).

La santé de la population européenne peut être affectée par les grandes concentrations en *E. coli* dans les cours d'eau. Certaines activités sont interdites lorsque la concentration en *E. coli* dépasse la mesure seuil

déterminée par la région soit de 500 UFC/100 mL. La baignade, ou la consommation des produits conchylicoles sont interdites lorsque la concentration est trop élevée, car il y a des risques de gastro-entérite (Kischel, 2018). Ce seuil est plus grand que les normes permises au Québec où il faut une concentration inférieure à 200 UFC/100 mL afin de pouvoir autoriser la baignade (MELCC, s. d.b). L'Europe s'intéresse également aux produits conchylicoles, des espèces de bivalves ayant la capacité d'accumuler les polluants hydriques telle que l'*E. coli* de 10 à 100 fois plus concentré dans les tissus que dans leur habitat. Dans cette région du monde, la consommation de ces invertébrés est importante, et la bioaccumulation de l'*E. coli* dans leurs tissus représente un risque sanitaire pour la population humaine (Balière, 2017; Kischel, 2018).

1.3.3 Situation en Amérique

En Amérique, les sources d'*E. coli* en milieu hydrique sont similaires à ce que l'on retrouve en Europe, bien que la superficie des bassins versants soit plus grande (Dalla et al., 2015; Lyautey et al., 2010; Verhougstraete, Martin, Kendall, Hyndman, et Rose, 2015). Les sources d'*E. coli* dans les Amériques proviennent majoritairement de l'humain et ses activités (Lyautey et al., 2010). Les activités agricoles ont un fort impact sur la concentration d'*E. coli* en milieu hydrique. Lorsqu'une grande partie du bassin versant pratique de grandes cultures telles que le maïs, le fumier et les pesticides utilisés peuvent ruisseler jusqu'au cours d'eau et rendent l'eau chargée en coliformes fécaux et polluants agricoles (Pandey et al., 2012). De plus, les *E. coli* d'origine bovine issus de la production laitière ont été observés de façon prédominante dans certains secteurs de l'Ouest canadien (Lyautey et al., 2010).

En outre, plusieurs études sur la diversité génétique des sérotypes dans les cours d'eau démontrent que pour chacune des saisons il y a des souches infectieuses (Iguchi et al., 2014; Lyautey et al., 2010). Pour la plupart des sérotypes, ils sont présents dans les cours d'eau durant toutes les saisons, cependant 4,6 % des sérotypes sont observés lors d'une seule saison (Lyautey et al., 2010).

Lorsque la concentration en *E. coli* dans l'eau est forte, par exemple au-delà de 200 UFC/mL la baignade est interdite afin de limiter les risques d'infection due à la bactérie *E. coli*. De plus, une concentration de 1000 UFC/mL et plus engendre une interdiction de pratique récréative, telle que le bateau de plaisance (MELCC, s. d.b). De plus, au Michigan, une forte concentration en *E. coli* compromet la baignade, la consommation de poissons et de fruits de mer (Verhougstraete et al., 2015).

1.3.4 Comparaison entre les continents

Bien que l'Afrique, l'Europe ainsi que l'Amérique soient des continents assez différents, il y a tout de même des similitudes entre eux. Notamment quant à la gestion des usines d'épuration des eaux usées qui ne supporte pas la densification de la population. De plus, dans certaines villes d'Afrique, il n'y a pas de méthode d'épuration des eaux usées, c'est également le cas pour certaines municipalités québécoises (Gemmell et Schmidt, 2012; Hébert, 2016). Dans ces trois continents, l'effet de l'agriculture sur la concentration d'*E. coli* dans les cours d'eau est visible (Balière, 2017; Chahboune et al., 2014; Lyautey et

al., 2010). En Afrique, malgré une certaine proportion d'agriculture nomade, les sols sont fertilisés en fumiers pouvant ruisseler vers les cours d'eau (Chahboune et al., 2014). En Europe et en Amérique, l'agriculture moderne peut également engendrer des ruissellements de fumier dans les cours d'eau, qui est une source d'*E. coli* (Balière, 2017; Pandey et al., 2012).

La gestion de la qualité bactériologique de l'eau varie d'un continent à l'autre. En effet, en Amérique la baignade est permise lorsque la concentration en *E. coli* est en dessous de 200 UFC/100 mL alors qu'en Europe le seuil permettant cette activité est de 500 UFC/100 mL (Kischel, 2018; MELCC, s. d.b). En Afrique, quant à eux la norme permettant l'irrigation est d'une concentration inférieure à 1000 UFC/100 mL (Gemmell et Schmidt, 2012). Ce seuil représente l'interdiction de faire des activités de plaisance, en Amérique du Nord (MELCC, s. d.b). En Afrique, des rejets illégaux de matière fécale dans les cours d'eau ont été recensés, chose qui ne semble pas avoir été observée ailleurs (Gemmell et Schmidt, 2012). En Europe, la qualité de l'eau n'est pas la seule variable analysée pour mesurer la contamination en *E. coli* dans les cours d'eau. Les bivalves sont analysés, afin d'éviter l'empoisonnement des gens consommant ces invertébrés (Balière, 2017; Kischel, 2018). Cette pratique ne semble pas être commune sur les autres continents.

1.4 Présentation du fleuve Saint-Laurent

Les Grands Lacs ainsi que plusieurs rivières alimentent le fleuve, cependant la qualité de l'eau varie en fonction de son origine. En effet, l'eau provenant des différentes sources forme des masses d'eau ne se mélangeant pas dans le fleuve à cause des différentes forces hydrologiques (Ville de Montréal, 2019). Les deux sources principales d'eau sont les Grands Lacs apportant de l'eau verte et la rivière des Outaouais apportant de l'eau brune (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014). De plus, la masse d'eau centrale suivant le chenal de navigations du fleuve, entraîne entre autres l'eau issue de l'usine d'épuration de la ville de Montréal (Ville de Montréal, 2019).

1.4.1 Paysage fluvial de la zone d'étude

Au Québec, le fleuve Saint-Laurent est touché par la problématique de la bactérie *E. coli*, par l'occupation du territoire sur l'ensemble de son bassin versant. La zone d'étude de cet essai est de l'amont du lac Saint-François jusqu'à la municipalité de Portneuf, la figure 1.3 représente la carte de cette zone, c'est-à-dire le tronçon fluvial du Saint-Laurent. Cette section du fleuve Saint-Laurent comprend trois lacs fluviaux: le lac Saint-François, le lac Saint-Louis et le lac Saint-Pierre. Plusieurs archipels d'îles façonnent également le paysage du fleuve, celles-ci agissent comme puits de carbone, pouvant améliorer la qualité de l'eau (Grater, 2018). De plus, plusieurs centres urbains tels que Montréal et Trois-Rivières ont un rôle dans la qualité de l'eau du fleuve.

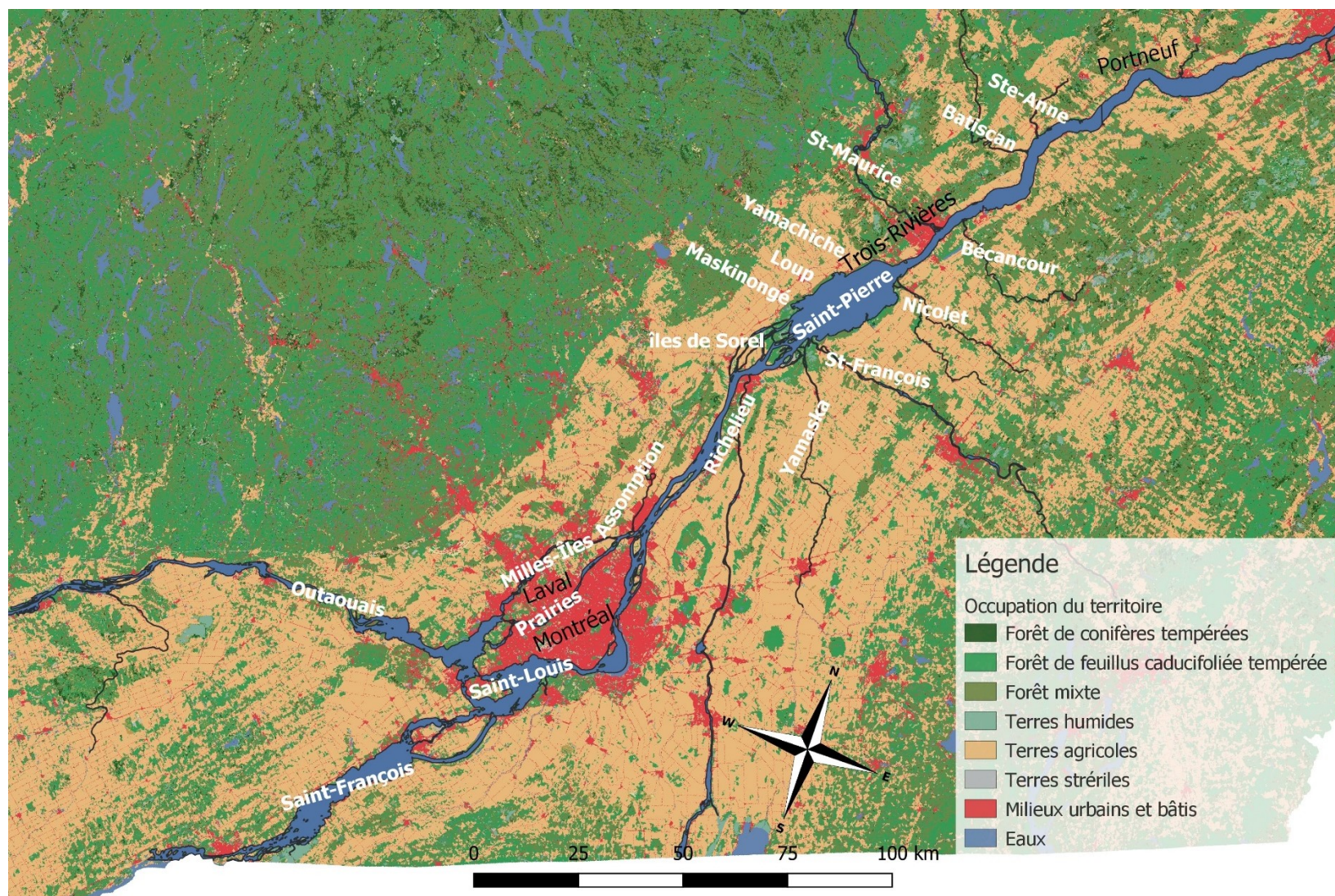


Figure 1.3 Carte de la zone d'étude entre le lac Saint-François et la ville de Portneuf, illustrant les rivières et les lacs fluviaux (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

Parmi les lacs fluviaux, le lac Saint-Pierre est le plus volumineux, possédant l'archipel des îles de Sorel en amont (Frenette, Massicotte, et Lapierre, 2012). Entre Sorel-Tracy et Trois-Rivières, le lac Saint-Pierre est un élargissement du fleuve Saint-Laurent, où une douzaine de rivières ayant des bassins versants s'y jette (MDDEFP, 2013b). De plus, le lac Saint-Pierre subit des effets des usines de traitement des eaux usées au centre de celui-ci, bien qu'une réduction de la concentration soit observée (Ville de Montréal, 2019). Les rives de ce lac sont caractérisées par des milieux humides reconnus comme un site Ramsar, un milieu humide d'importance internationale (MDDEFP, 2013b). Le lac Saint Pierre aide à l'amélioration de la qualité bactériologique du fleuve Saint-Laurent, car la qualité de l'eau est nettement meilleure en aval qu'en amont (Giroux, Hébert, et Berryman, 2016; MDDEFP, 2013b). Toutefois, la qualité bactériologique du lac Saint-Pierre ainsi que de l'ensemble du fleuve varie d'une année à l'autre selon le débit du fleuve, des eaux de ruissellement, des précipitations ainsi que la fréquence et l'intensité des débordements des égouts municipaux (Giroux et al., 2016).

À Montréal, l'exutoire de l'usine de traitement des eaux usées se fait dans le secteur de l'île aux Vaches. La ville de Montréal fait donc un suivi de la qualité de l'eau de surface, dans le but de suivre les impacts de l'usine et ces épisodes occasionnels de débordement (Ville de Montréal, 2018, 2019). Le programme Courdo permet de faire un suivi de la qualité de l'eau de l'exutoire de l'usine de traitement des eaux usées jusqu'au pont de Trois-Rivières, c'est-à-dire 104 km en aval de la ville tel qu'illustré à la figure 1.3. Il s'agit d'un programme mené par la ville de Montréal afin de suivre les effets de la station d'épuration des eaux usées de Montréal sur les écosystèmes en aval de celle-ci. En 2017, les concentrations en *E. coli* à la sortie de l'usine sont plus de 600 000 UFC/100 mL alors qu'à Sorel-Tracy, à 44 km en aval la concentration est 12 000 UFC/100 mL (Ville de Montréal, 2019). Ces mesures excèdent de 12 à plus de 600 fois la limite permise pour pratiquer des activités avec des possibilités de contacts indirects tels que la pêche sportive et le canotage (Ville de Montréal, 2018). Pendant l'année 2017, une crue exceptionnelle causant des inondations altère les activités bactériologiques dans le fleuve amplifiant les effets de l'usine de traitement de Montréal (Ville de Montréal, 2019). De plus, des épisodes de fortes pluies peuvent mener à un débordement d'eaux usées réduisant ainsi la qualité des eaux de surfaces. En été, en moyenne une dizaine d'épisodes de pluie mènent à un débordement d'eaux usées (Ville de Montréal, 2018). La masse d'eau issue de l'usine de traitement des eaux usées de Montréal reste au centre du fleuve, vers la rive nord, sans toutefois la rejoindre (Ville de Montréal, 2019).

1.4.2 Masse d'eau verte

L'eau provenant des Grands Lacs traverse une grande densité de population ainsi que de nombreuses industries au Canada et États-Unis (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014; Marsh, 2015). Parmi les cinq Grands Lacs, c'est le lac Ontario qui se jette dans le fleuve Saint-Laurent à Everett Point. De ce point à Montréal, la dénivellation est brusque formant donc des rapides (Marsh, 2015). Étant l'une des deux principales sources du fleuve Saint-Laurent, l'eau des Grands Lacs permet de contrôler la quantité de

l'eau du fleuve limitant l'effet des crues, par la présence de divers barrages à fleur d'eau (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014).

La masse d'eau issue des Grands Lacs est caractérisée par une couleur verdâtre, qui ne se mélange que très peu avec l'eau provenant des autres affluents tels que la rivière des Outaouais (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014; Ville de Montréal, 2019). Cette masse d'eau suit la rive sud favorisée par un écoulement laminaire sur une longue distance du fleuve. Au lac Saint-Pierre, l'eau verte va se décaler vers le centre du cours d'eau, car les tributaires de la rive sud relâchent leur eau dans le fleuve forçant un mélange avec une partie de la masse d'eau verte. La voie maritime entraîne également le mélange des deux masses d'eau dans ce secteur du fleuve (Ville de Montréal, 2019).

En amont de Montréal, le lac Saint-François est dominé par les eaux vertes et la qualité de l'eau est excellente ou bonne (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014; MDDEFP, 2013a; Ville de Montréal, 2019). Parmi les variables analysées de la qualité de l'eau, la concentration en *E. coli* indique qu'il n'y a pas de dépassement des normes de 200 UFC/100mL permettant d'entrer en contact avec l'eau (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014; Ville de Montréal, 2018).

De plus, la diversité de la communauté de macro invertébrée n'est pas préoccupante sur ce point d'eau et la contamination des sédiments est parmi les moins préoccupantes avec le lac Saint-Louis qui possède également une grande proportion d'eau verte (Groupe de travail suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014). L'eau verte possède une eau de bonne qualité grâce à son temps passé dans les Grands Lacs, permettant de décanter une certaine quantité de polluants (MDDEFP, 2013a).

1.4.3 Masse d'eau brune

La masse d'eau brune provient en majorité de la rivière des Outaouais se jetant dans le fleuve ainsi que les rivières de la rive nord du fleuve. La masse d'eau brune est également composée de l'eau issue des tributaires de la rive nord, longeant cette rive, et entraînant chacune une charge annuelle en *E. coli* unique selon leur bassin versant. La qualité de l'eau à proximité des rives a été analysée au niveau des plages en 2009 (Hébert, 2010). À Lanoraie, la qualité de l'eau lors des 10 visites estivales était considérée comme polluée avec une moyenne géométrique de 761 UFC/100 mL. En effet, selon Hébert (2010) cette mauvaise qualité de l'eau serait due aux débordements d'eaux usées non traitées des rivières de l'Assomption, des Prairies ainsi que des Mille-Iles dans le fleuve. De plus, ce texte met en lumière l'importance de la qualité de l'eau des tributaires sur celles des rives. Les tributaires moins volumineux que la rivière des Outaouais influence la qualité bactériologique de la masse d'eau brune que sur une petite distance en aval de leur exutoire.

Les tributaires du fleuve Saint-Laurent ont également une influence sur la qualité des communautés bactériologiques, car certaines apportent une grande quantité d'eau ainsi que de particules dans le lit du

fleuve Saint-Laurent (Ville de Montréal, 2019). Pour connaître ce qui se passe de particulier avec ces masses d'eau, une analyse de la distribution en *E. coli* dans le tronçon fluvial est requise.

De plus, l'usine d'épuration des eaux usées de la ville de Montréal présente sur la pointe est de l'île rejette une quantité d'eau significative. Cette masse est alors coincée entre la masse d'eau verte du sud et la masse d'eau brune du nord, empêchant l'eau usée partiellement filtrée de se rendre près des rives du fleuve. La masse d'eau centrale transporte ainsi les eaux polluées jusqu'en amont du lac Saint-Pierre (Ville de Montréal, 2019).

1.4.4 Rivières présentes dans la zone d'étude

En amont de l'île de Montréal, la rivière des Outaouais est un tributaire important du fleuve Saint-Laurent. En plus de son débit important, cette rivière occupe un bassin très volumineux dominé par la forêt. Selon le portrait sommaire rédigé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC, 2015), le couvert forestier occupe 73 % du bassin versant de la rivière des Outaouais. Le bassin versant de cette rivière couvre plusieurs régions du Québec, telles que l'Outaouais, une portion de la Lanaudière et de l'Abitibi. Autrefois, cette rivière était utilisée par l'industrie du bois, où la drave était pratiquée afin de déplacer rapidement les billots de bois. En plus de l'industrie forestière, le paysage forestier a été modifié par plusieurs barrages présents sur les différents cours d'eau de ce bassin versant, inondant plusieurs forêts. L'ensemble de ces barrages ont théoriquement la capacité de réguler le débit d'eau de l'ensemble du bassin versant. Cependant, plus de 50 % de la capacité de stockage se situe en amont, réduisant considérablement la capacité de gestion du débit lors d'une crue. Le réseau hydrique occupe quant à lui 19 % du bassin versant par la présence de plusieurs lacs, réservoirs et rivières. Pour ce qui est de l'agriculture, seulement 3 % de la partie québécoise du bassin versant est consacrée à cette occupation. En 2013, le nombre d'exploitations a été dénombré à 2700 fermes dans ce bassin versant. Les cultures de maïs, soya et céréales occupent 15 % du territoire des régions de l'Outaouais et de Lanaudière et 5 % de l'Abitibi. Les milieux urbains tels que les villes de Gatineau et d'Ottawa représentent 1 % de ce bassin versant. Bien que la majorité des 1 138 200 habitants résident dans ces deux villes, la population est répartie à travers le bassin versant. L'agglomération Gatineau-Ottawa est un des secteurs du bassin versant de la Rivière des Outaouais où la qualité de l'eau est la plus problématique (MDDELCC, 2015).

Puis, la rivière des Prairies se situe entre deux grandes villes du Québec, soit Montréal et Laval, deux îles présentes sur le fleuve Saint-Laurent (Institut de la Statistique du Québec, 2017). Cette rivière est alimentée par le lacs des Deux Montagnes ainsi que ses îles urbanisées (Tremblay, Drolet, et Girard-Brisson, 2015). La rivière des Mille-Îles est quant à elle entre la rive nord et l'île de Laval. Cette île est séparée de l'île de Montréal par la rivière des Prairies (Ville de Montréal, 2019). Selon Tremblay et ses collaborateurs, le bassin versant de la rive nord de la rivière des Mille-Îles est occupé à 48 % d'agriculture, à 28 % de boisés et à 20 % de zones urbaines. Trois cultures occupent la majorité du territoire agricole soit le maïs à 24 %, le

soya à 21 % et le foin à 18 %. Plusieurs agriculteurs sèment leurs semences de foin en automne laissant le sol à nu augmentant les risques d'érosion éolienne et pluviale. Les boisés occupent quant à eux 28 % du territoire, bien que ce chiffre puisse avoir été réduit à cause des développements immobiliers. Ces étendues forestières sont fortement fragmentées par les quartiers résidentiels et les nombreuses routes présentes dans ce secteur. En effet, les zones urbaines sont très étendues en particulier par le réseau routier. Ce bassin est fortement anthropisé notamment par la densité de population de 414 personnes/km². Entre 1996 et 2006, l'étalement urbain a subi une croissance globale de 18 %, et avec Mirabel en tête de liste (53 %). De plus, les estimations proposent une augmentation de l'urbanisation de 34 % dans ce secteur comparé à 16 % dans l'ensemble du Québec (2015).

À Proximité du lac Saint-Louis, la rivière Châteauguay et son bassin versant occupent une partie de la rive sud. Il s'agit d'une rivière dominée par l'agriculture à 64 %, où 917 producteurs agricoles y sont actifs. Les productions végétales sont majoritairement le maïs, le soya ainsi que les productions maraîchères. Les élevages présents sur ce territoire sont les productions bovines laitières et de boucherie, de porc ainsi que de volailles. Ces nombreuses activités agricoles nécessitent une grande quantité d'eau, c'est pourquoi 29 barrages ont été construits, fournissant de l'eau à l'année, même pendant l'étiage. Les écosystèmes forestiers couvrent 32 % du bassin versant de la rivière Châteauguay. Ces forêts sont dominées par des érablières à caryer cordiformes (*Carya cordiformis*). Sur ce territoire, 38 écosystèmes forestiers exceptionnels (EFE) dont 27 sont à tenure privée protègent une superficie forestière de 1140 ha. Puis, le territoire urbain occupe moins de 760 km² abritant 297 897 habitants. Les zones urbaines sont majoritairement à proximité des rives du fleuve Saint-Laurent. Plusieurs secteurs urbains sont en zones inondables. Dans ces territoires urbains, la majorité des surfaces sont imperméables, causant 55 % du ruissellement d'eau de pluie. Il est à noter que seulement 1 % de l'eau de pluie ruisselle en milieux forestiers naturels (Audet et al., 2015).

En longeant le fleuve, à l'est, sur la rive nord du lac Saint-Pierre, se situe l'embouchure de la rivière Maskinongé. Il s'agit d'une rivière majoritairement forestière, mais dominée par l'agriculture au sud de son bassin versant. En effet, bien que 72 % de son bassin versant soit occupé par des écosystèmes forestiers, les 9 % agricoles occupent les rives du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Maskinongé. Ces secteurs du bassin versant sont très fertiles, faisant partie des basses terres du Saint-Laurent où les alluvions sont riches en nutriments. Les principales cultures de ce territoire sont le maïs et le soya occupant ensemble 49 % des champs, puis les cultures pérennes qui occupent 23 %. Les céréales occupent les 12 derniers pour cent connus de la région. Les activités agricoles ont un impact sur les eaux de surfaces liées à l'exportation de sédiments, de phosphores et d'azotes dus au labourage et à l'épandage d'engrais chimiques ou organiques. Les écosystèmes forestiers à dominance mixte occupent la majorité de l'amont du bassin versant. En effet, plusieurs sous-bassins versants sont entièrement forestiers, tels que la rivière Matambin. Cependant, dans le secteur de Saint-Damien, les territoires forestiers perdent de la superficie au profit de l'agriculture. Bien que la superficie urbaine soit faible, il y a tout de même plusieurs municipalités

où le réseau d'égout est majoritairement privé. En effet, seulement 35 % des citoyens sont raccordés à un système de réseaux d'égouts. Les usines d'épuration n'ont pas de traitement de désinfections des coliformes fécaux, ils utilisent toutefois des étangs de décantations afin de réduire les concentrations (Agir Maskinongé, 2019).

Près de la rivière Maskinongé se situent les rivières du Loup et Yamachiche présent dans le même bassin versant, sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, à la hauteur du lac Saint-Pierre. L'agriculture domine le secteur sud du bassin, alors qu'elle n'occupe que 16 % de l'ensemble du bassin versant. La rivière du Loup subit une plus grande pression agricole que la rivière Yamachiche où 220 des 422 exploitants agricoles sont présents. Le bassin versant de la rivière du Loup abrite près de la moitié de l'agriculture de l'ensemble du bassin versant. En plus de son abondance dans le secteur sud, il y a quelques sites agricoles, entre autres à Saint-Paulin et à Saint-Alexis-des-Monts. Le type de culture de ce bassin versant est à 48 % de grand interligne, soit maïs et soya. Il y a 29 % du territoire agricole qui est consacré à la culture fourragère puis 21 % produisent des cultures de petits interlignes tels que les céréales. Le reste du bassin versant est dominé à 76 % d'écosystème forestier où une portion de celle-ci est utilisée à des fins de villégiature. La forêt est majoritairement privée à l'exception du secteur de la rivière du Loup où la forêt est d'instance publique à 57 %. Puis, le secteur urbain occupe 2 % du bassin versant comptant 20 municipalités et 2 villes. La majorité de la population occupe les secteurs Maskinongé et Matawanie. La densité de population est plus grande à proximité des rives du fleuve Saint-Laurent (Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche [OBVRLY], 2014).

Le bassin versant de la rivière Richelieu, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, occupe une superficie de 2546 km dont 70 % sont agricoles. Les sols fertiles de cette région ainsi que sa position géographique favorisant une période estivale plus longue expliquent pourquoi l'agriculture est aussi importante dans cette région. Le type de production végétale le plus important est la culture de grand interligne, telle que le maïs (45,9 %) et le soya (29 %). Les cultures de petits interlignes et le fourrage représentent respectivement 6 % et 5,8 % du territoire agricole bien que la culture maraîchère représente moins de 1 % des terres agricoles, la MRC Rouville produit près de 35 % des pommes du Québec. La production animale de cette région est également importante. Le bassin versant est le secteur produisant le plus de volailles du Québec avec près de 2,5 millions de têtes. Il se retrouve au deuxième rang de la production porcine avec 300 000 individus dans les 25 municipalités de la région. Sur une période de 12 ans, il y a eu une augmentation de la production porcine et de volaille dans la région de la rivière Richelieu. Le territoire forestier représente quant à lui 16 % du bassin versant, il est dominé par des feuillus. Les étendues forestières sont dispersées dans le secteur, causant de la fragmentation et réduisant la biodiversité. Les écosystèmes forestiers sont utilisés à 45 % pour des activités récréatives et 3,4 % sont public pouvant être des forêts non exploitées, des parcs nationaux et des réserves écologiques. Puis, 10 % du territoire est utilisés à des fins urbains, par des bâtiments ou des routes. Le réseau routier est réparti de façon relativement uniforme sur le bassin versant. La population, quant à elle, est concentrée à proximité de la rivière Richelieu ainsi que des routes 116 et

112. Les citoyens sont concentrés dans cinq centres urbains : Sorel, Saint-Jean-Sur-Richelieu, Chambly, Saint-Bruno-de-Montarville ainsi que Belœil et ses environs (Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu [COVABAR], s. d.).

À côté du bassin versant de la rivière Richelieu se trouve celui de la rivière Yamaska dont la superficie est de 4845 km². L'agriculture occupe la plus grande place de ce bassin versant avec 43,6 %, elle est principalement au nord du bassin versant, c'est-à-dire à proximité du fleuve, dans les basses terres du Saint-Laurent. Les cultures de grands interlignes représentent 66 % du territoire agricole, les cultures fourragères et de petits interlignes utilisent respectivement 12 % et 3 % des terres cultivées. En ce qui concerne la production animale, c'est la production porcine qui domine le bassin versant avec 57 % des unités animales. La production bovine et la production de volaille occupent respectivement 29,5 % et 11 % des unités animales du territoire. Au total, le nombre d'unités animales dans ce bassin versant est de 317 897, sachant qu'une unité correspond à 500 kg ou une vache, quatre truies et 125 poules. En plus de la production agricole, l'écosystème forestier représente 35 % du bassin versant, ayant perdu de sa superficie au profit des terres agricoles. En effet, entre 2003 et 2009, il y a une perte nette de 5 % de superficie du bassin versant en forêt, observée majoritairement dans les basses terres du Saint-Laurent. En aval, le territoire forestier est fragmenté par les activités agricoles, alors qu'en amont l'écosystème forestier est dominant. En plus des forêts naturelles, il y a également des plantations de sapins de Noël présentes sur ce bassin versant. Les milieux urbains occupent 6,3 % du territoire où la densité est plus importante dans le secteur de Saint-Hyacinthe et Granby (Organisme de bassin versant de la Yamaska [OBV YAMASKA], 2014).

À l'est de la rivière Yamaska, la rivière Saint-François et son bassin versant occupent un territoire réparti au Québec et aux États-Unis. L'écosystème forestier occupe près de 66 % du territoire alors que l'agriculture en occupe 29 %. Les cultures fourragères possèdent 65 % des terres agricoles, alors que le maïs et le soya correspondent à 35 %. La principale production animale de cette région est la production bovine. De plus, cette région est reconnue comme la plus grande productrice bovine du Québec. Dans les régions de Sherbrooke, Thetford Mines et Mégantic, la production de sapin de Noël occupe une superficie de 5 300 ha. Cette superficie est classée parmi les écosystèmes forestiers représentant dans son ensemble 66 % du territoire. Sur le bassin versant de cette rivière, il y a 66 EFE majoritairement privés couvrant une superficie de 11,5 km². Ces EFE sont des forêts anciennes, des forêts rares, des forêts refuges ou même les trois à la fois. De plus, trois parcs nationaux et plusieurs réserves fauniques sont présents sur ce bassin versant. Près de 5 % du bassin versant est urbain, notamment les régions de Sherbrooke, Drummondville et Magog (Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François [COGESAF], 2006).

La rivière Nicolet est située à l'est de la rivière Saint-François où l'occupation du territoire est très similaire. D'abord, l'agriculture représente 37 % du territoire, elle est concentrée dans les basses terres du Saint-

Laurent. Les terres agricoles produisent principalement du foin et du maïs correspondant respectivement à 26 % et 24 % de la superficie cultivée. Cependant, dans le secteur près du lac Saint-Pierre, le maïs et le soya représentent 80 % des terres agricoles. Pour ce qui est de la production animale, les fermes porcines possèdent 71 % du bétail. L'occupation forestière représente 47 % du territoire, elle occupe l'amont du bassin versant dans le secteur des Appalaches. Le reste du territoire du bassin versant est réservé aux zones urbaines (9 %) concentrées dans les villes de Victoriaville, Asbestos, Nicolet et Warwick (Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet [COPERNIC], 2015).

La dernière rivière analysée de la rive sud du fleuve Saint-Laurent est la rivière Bécancour qui est composée d'écosystèmes forestiers (57 %), de zones agricoles (39 %) et de zones urbaines (3 %). La zone agricole du bassin versant est plus concentrée près de la rive du fleuve, semblable à ce qui est observé chez les autres rivières de la rive sud. Les cultures sont majoritairement des plantes fourragères à 64 % suivies par le maïs occupant 15 % de la zone cultivée. Les cultures de petits interlignes utilisent, quant à elle, 12 % du territoire. Pour ce qui est des élevages, les plus fortes densités d'animaux se retrouvent en amont du bassin versant. La production bovine est la plus importante, suivie par la production porcine. Comme la plupart des bassins versants, le milieu agricole prend de l'expansion au profit de l'écosystème forestier. Ce dernier occupe toujours la majorité du bassin versant avec 57 %; il y a toutefois des signes de fragmentations ainsi que des îlots forestiers isolés. De plus, plusieurs secteurs forestiers peuvent être détruits afin d'y aménager de nouveaux quartiers. En effet, les zones urbaines représentant 3 % du bassin versant peuvent mettre une pression sur les milieux forestiers. Les secteurs où la démographie est la plus grande sont : la municipalité de Princeville, la ville de Plessisville et de Thetford Mines qui est partiellement dans ce bassin versant (Morin et Boulanger, 2005).

Sur la rive nord, près de la ville de Trois-Rivières se trouve l'embouchure de la rivière Saint-Maurice ayant un bassin versant de 42 651 km². Ce bassin versant est dominé par les forêts sur 75 % de son territoire, c'est pourquoi l'industrie forestière est encore active dans ce bassin versant. La rivière Saint-Maurice a servi pour la drave, déplaçant de nombreux billots de bois au fil du temps. Aujourd'hui, l'industrie du bois déplace les billots de bois à l'aide de camions. Certains secteurs forestiers sont préservés par des réserves fauniques ou par le parc national de la Mauricie. Les impacts de l'agriculture sont très faibles, car ils ne représentent que 0,2 % du bassin versant. La majorité de la population vit à proximité des rives de la rivière, notamment à Trois-Rivières, Saint-Étienne-des-Grès, Shawinigan, Saint-Boniface et La Tuque (Bassin versant Saint-Maurice [BVSM], 2014).

Le bassin versant suivant est celui de la rivière Batiscan, également dominé par les forêts sur 87 % du territoire, les zones agricoles occupent 5 % et les zones urbaines en occupent 0,4 %. Le secteur forestier occupe l'amont du bassin versant, soit au nord des basses terres du Saint-Laurent. C'est l'agriculture qui occupe une grande portion des basses terres, en aval. Les zones urbaines sont concentrées dans les

secteurs de Saint-Tite, lac-à-la-Tortue, Sainte-Thècle, Saint-Narcisse et Sainte-Geneviève-de-Batiscan (Société d'aménagement et de mise en valeur du bassin de la Batiscan [SAMBBA], 2015).

La dernière rivière étudiée dans le cadre de cet essai est la rivière Sainte-Anne, à l'est de la rivière Batiscan. Tous comme les deux dernières rivières, elle est dominée par les forêts à 79 % alors que les zones agricoles urbaines couvrent respectivement 13,7 % et 2 % du territoire. Le milieu agricole est majoritairement dans la portion sud et parmi ces cultures seulement 5 % des agriculteurs affirment pratiquer des cultures d'hiver afin que les sols ne soient pas à nu et pour réduire l'érosion. De plus, certains chemins forestiers sont également susceptibles à l'érosion (Organisme de bassin versant : Rivières Sainte-Anne, Portneuf et secteur La Chevrotière [CAPSA], 2014).

Les tributaires se déversant dans le fleuve Saint-Laurent ont chacune des caractéristiques uniques au niveau de l'occupation du territoire tel que présenté précédemment. Dans le tronçon fluvial, il y a 15 grandes rivières étudiées lors de cet essai, celles-ci sont présentées à la figure 1.4.

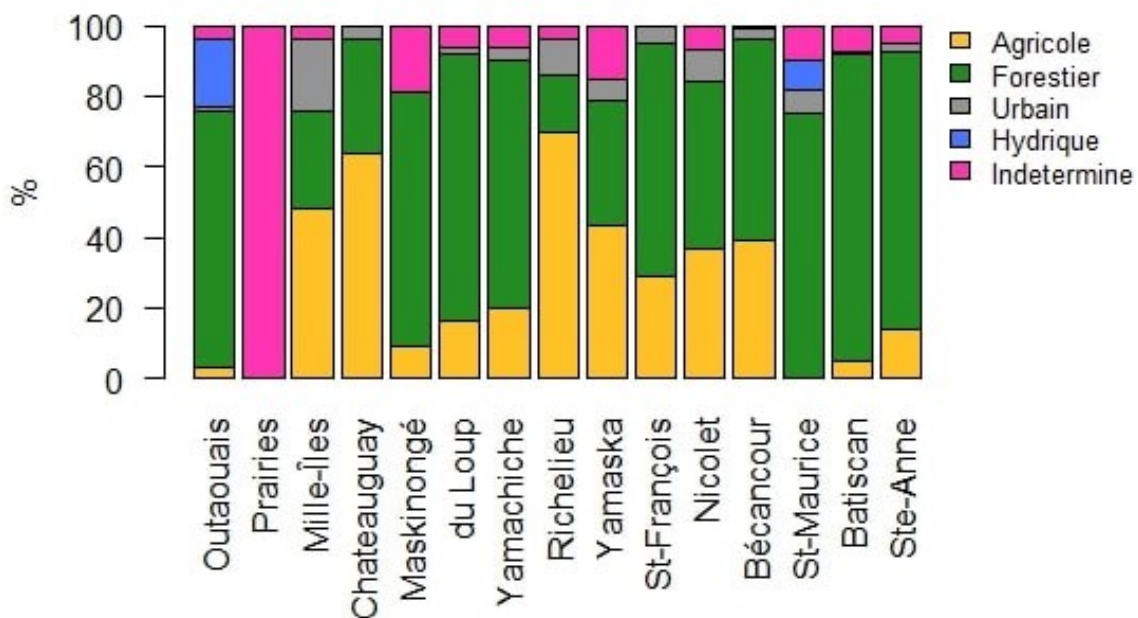


Figure 1.4 Diagramme de l'occupation du territoire en pourcentage des bassins versants des rivières se jetant dans le tronçon fluvial (données tirées d'Agir Maskinongé, 2019 ; Audet et al., 2015; BVSM, 2014; CAPSA, 2014; COGESAF, 2006; COPERNIC, 2015; COVABAR, s. d.; Morin et Boulanger, 2005; MDDELCC, 2015; OBVERLY, 2014; OBV YAMASKA, 2014; SAMBBA, 2015; Tremblay et al., 2015)

2. DYNAMIQUE DE L'*E. COLI* DU TRONÇON FLUVIAL DU SAINT-LAURENT

La dynamique de la bactérie *Escherichia coli* varie tout au long du tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent, selon différents facteurs qui sont explorés dans ce chapitre. Plusieurs bases de données sont décrites afin de démontrer la pertinence des informations recueillies. Ces données permettent de déterminer l'origine et la distribution de la bactérie dans le fleuve, le rôle hydrologique de la distribution des *E. coli* ainsi que de délimiter les zones sensibles.

2.1 Description des bases de données

Les quatre bases de données utilisées pour les prochaines analyses couvrent différents secteurs de la zone d'étude, la figure 2.1 illustre la répartition des données recueillies par les différentes instances. Bien que dans cette section, une analyse de la dynamique des *E. coli* est présentée, l'effet des tributaires ainsi que le rôle des saisons sont étudiés à l'aide de ces mêmes bases de données. Une base de données cumulant les données recueillies lors des missions Saint-Laurent (MSL), du programme Courdo, du réseau-rivières et réseau-fleuve permettent de faire les analyses statistiques ainsi que géospatiales.

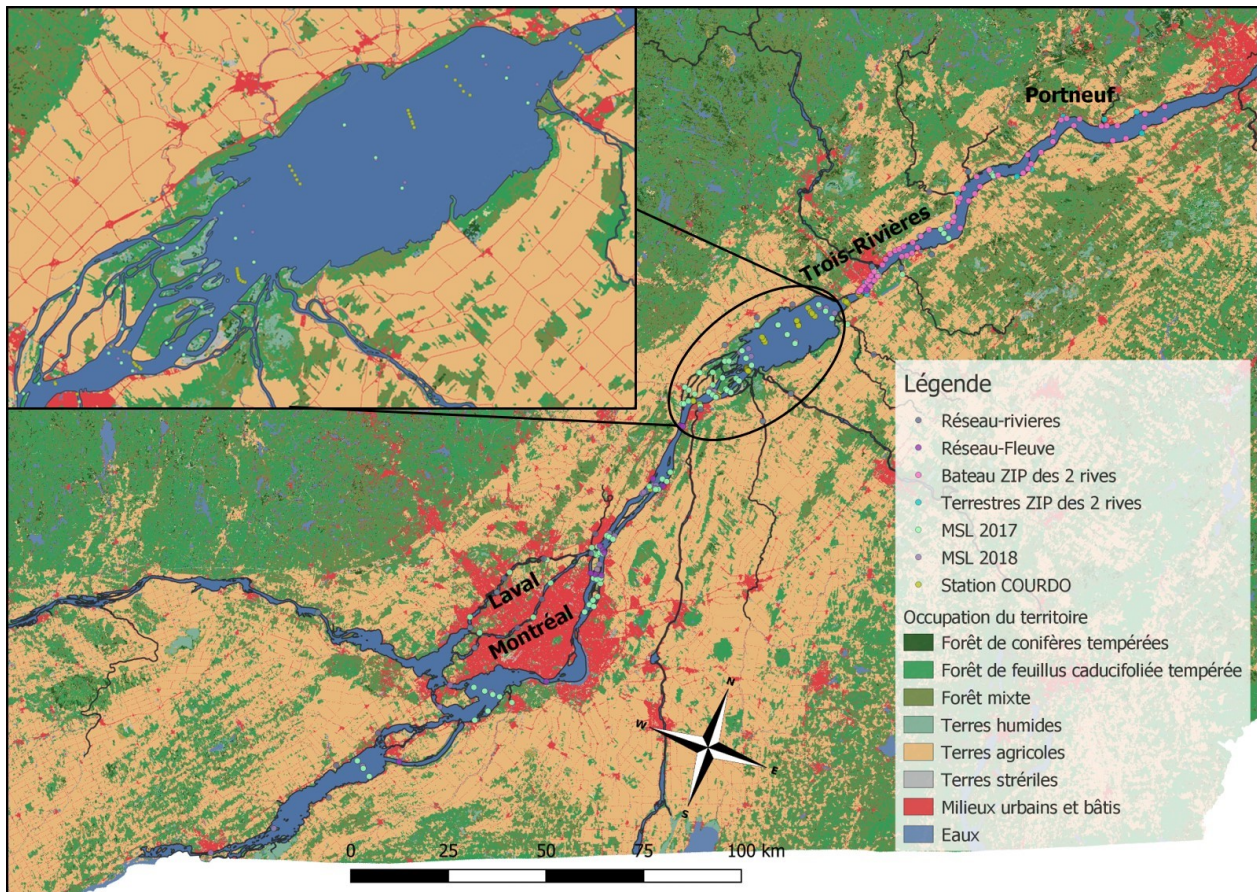


Figure 2.1 Carte de la distribution des sites d'échantillonnage et leurs bases de données initiales (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

2.1.1 Mission Saint-Laurent 2017 et 2018

En 2017 et 2018, le navire de recherche *Lampsilis* de l'Université du Québec à Trois-Rivières œuvre afin de connaître l'état de santé du fleuve, en échantillonnant une grande variété de données, telles que l'*E. coli*, les terres rares ainsi que la faune ichthyologique (Poiré, 2019, 18 mai). La méthode de prélèvement ainsi que le décompte d'*E. coli* des échantillons d'eau suivent le protocole élaboré par le laboratoire Guillemette de l'Université du Québec à Trois-Rivières (Tanguay, 2020). Les prélèvements des échantillons ont été récoltés pendant la période estivale en juillet 2017 et 2018. Les échantillons prélevés sur le fleuve Saint-Laurent correspondent à la couche superficielle de l'eau récoltée à l'aide d'un tube d'échantillonnage d'eau de marque Go-Flo. Il s'agit d'une méthode permettant de prélever de l'eau en limitant le plus possible le contact de celle-ci à l'atmosphère afin de conserver les caractéristiques de l'eau. Les échantillons provenant des tributaires ainsi que des îles fluviales sont prélevés à l'aide de bouteilles en plastique propres et stérilisées (UQTR, sous presse). Tous les échantillons sont analysés de la même façon, l'eau est filtrée à l'aide d'une pompe. La quantité d'eau filtrée est prédéterminée à 100 mL. Puis, le filtre est ensuite disposé sur une gélose puis incubé afin de former des colonies *E. coli*. Il se peut que la gélose contienne une grande quantité de colonies rendant le décompte difficile. Dans ce cas, il est conseillé de refaire la filtration avec 10, 1 ou 0,1 mL, en réduisant le volume d'eau le nombre d'*E. coli* présent sur la gélose, puis un simple calcul permet de conserver l'unité de concentration. Le comptage des colonies peut se faire sur l'ensemble de la gélose ou sur un sous-échantillon de 1/16 de la surface totale (Tanguay, 2020).

2.1.2 Programme Courdo de la ville de Montréal

Le programme Courdo effectué par le réseau de suivi du milieu aquatique (RSMA) comporte plusieurs programmes dont le Courdo régulier, le Courdo crue et le Courdo lac Saint-Pierre. Dans le cadre de cette recherche, seul le Courdo lac Saint-Pierre est utilisé, car il comprend les sites à proximité de l'usine d'épuration des eaux usées jusqu'au pont Laviolette en aval du lac Saint-Pierre. Les données sont échantillonnées de manière à fournir des transects des îles de Sorel-Berthier jusqu'à l'aval du lac Saint-Pierre afin de suivre le panache de contamination de l'usine d'épuration de la Ville de Montréal, n'ayant aucune unité de désinfection telle que l'ozone. Ces transects ont entre quatre et dix sites d'échantillonnages, en plus des sites à proximité de Montréal. Au total, 49 échantillons ont été prélevés en octobre et novembre 2017. Pour ce qui est de l'analyse en laboratoire, les échantillons d'eau ont été envoyés dans un laboratoire qualifié afin d'estimer la charge en *E. coli* dans l'eau (Ville de Montréal, 2019).

2.1.3 Réseau-rivières et réseau-fleuve

Prélevé par les organismes de bassin versant ainsi que les organismes environnementaux locaux, le réseau-rivières échantillonne des tributaires du fleuve Saint-Laurent mensuellement (MDDEFP, 2013a). Les données de 2017 sont disponibles au grand public sur l'atlas interactif de qualité de l'eau et des écosystèmes aquatiques (MELCC, s. d.a). Le réseau-rivières possède également un volet dans le fleuve Saint-Laurent appelé réseau-fleuve. Les échantillons sont recueillis dans des bouteilles propres et

envoyées au laboratoire affilié avec le gouvernement provincial du Québec. Ce laboratoire fait le dénombrement de coliforme fécal, incluant la bactérie *E. coli*. Bien que les résultats ne représentent pas uniquement le dénombrement de la bactérie *E. coli*, celle-ci représente entre 80 et 90 % des colonies dénombrées (Chevalier et membres du Groupe scientifique sur l'eau de l'Institut national de santé publique du Québec, 2003). Les analyses obtenues ont un plafond de 6000 UFC/100 mL, c'est-à-dire que les données au-dessus de cette valeur ne sont pas mesurées précisément. C'est pour cette raison que le dernier intervalle de concentration en *E. coli* est de 5999 UFC/100 mL et plus afin de pouvoir catégoriser l'ensemble des données issues des autres bases de données de la même façon que celle-ci. Bien que la précision des autres bases de données soit réduite, cette méthode permet tout de même d'utiliser cette base de données.

Les données des tributaires permettent de mesurer les intrants dans le fleuve provenant des tributaires, et par le fait même l'occupation du territoire de leur bassin versant respectif. Cette base de données offre également des données quant aux effets possibles des saisons sur la bactérie *E. coli*, car plusieurs sites ont des échantillons mensuels pour l'ensemble de l'année alors que d'autre en ont du printemps à l'automne, soit six à huit mois (MELCC, s. d.a).

2.1.4 Zone d'intervention prioritaire (ZIP) les Deux Rives du lac Saint-Pierre

Les données récoltées par la ZIP des 2 rives du lac Saint-Pierre ont été prélevées à l'aide de bouteilles propres. Puis, les échantillons ont été analysés par le laboratoire Guillemette de l'UQTR suivant le même protocole que les missions Saint-Laurent 2017 et 2018 (Zone d'intervention prioritaire les Deux Rives, sous presse). Les données ont été récoltées de l'aval du lac Saint-Pierre jusqu'à la hauteur de la municipalité de Portneuf. Les échantillons ont été recueillis en septembre 2019, pendant deux journées à quelques jours d'intervalle. Il s'agit des données les plus récentes de l'analyse, elles sont pertinentes afin d'observer les variations d'*E. coli* en automne sur la dynamique de l'*E. coli* en zones peu profondes en rive et plus précisément en aval du lac Saint-Pierre. Les données suivent principalement les rives du fleuve, pouvant intégrer les variations en *E. coli* causé par l'apport des rivières.

2.2 Distribution des *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent

La distribution de la bactérie *Escherichia coli* sur le tronçon fluvial du Saint-Laurent est déterminée à l'aide des jeux de données décrits à la section dernière. Grâce à ces observations, l'emplacement des sources et des puits de coliformes fécaux peut être estimé. La bactérie *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent provient de diverses activités anthropiques telles que les activités urbaines et agricoles (MELCC, s. d.c). De plus, en regardant les tendances de distribution de la bactérie dans le tronçon fluviale, il est possible de cibler des zones captant de l'*E. coli* grâce à une hétérogénéité de l'hydrologie.

2.2.1 Distribution d'*E. coli* sur le tronçon fluvial

À l'aide des données disponibles, il est possible de constater que la distribution de la bactérie *E. coli* sur le fleuve Saint-Laurent varie d'un secteur à l'autre. L'intervalle des données illustrées à la figure 2.2 a été établi de façon arbitraire afin de pouvoir visualiser rapidement lors des différentes catégories de concentration en *E. coli* et suivent les intervalles utilisés pour le gouvernement provincial. D'abord, les points bleus correspondent aux secteurs où la qualité bactériologique est excellente, soit inférieure ou égale à 20 UFC/100 mL. Les points verts représentent une bonne qualité bactériologique soit de 21 UFC/100 mL à 100 UFC/100 mL. Les points jaunes illustrent les sites sous le seuil de 200 UFC/100 mL; la norme provinciale permettant la baignade, il s'agit des sites de qualité médiocre. Puis, les points en rouge correspondent aux sites où la concentration en *E. coli* est entre 201 et 1000 UFC/100 mL. Cette couleur de point est au-dessous de 1000 UFC/100 mL; la norme provinciale autorisant les activités nautiques. Puis en brun, les sites ont une concentration de 1001 à 5999 UFC/100 mL, car les données du réseau-rivières ne pouvaient générer des données précises au-delà de 6000 UFC/100 mL. Finalement, les points noirs correspondent à toutes les données au-delà de 5999 UFC/100 mL.

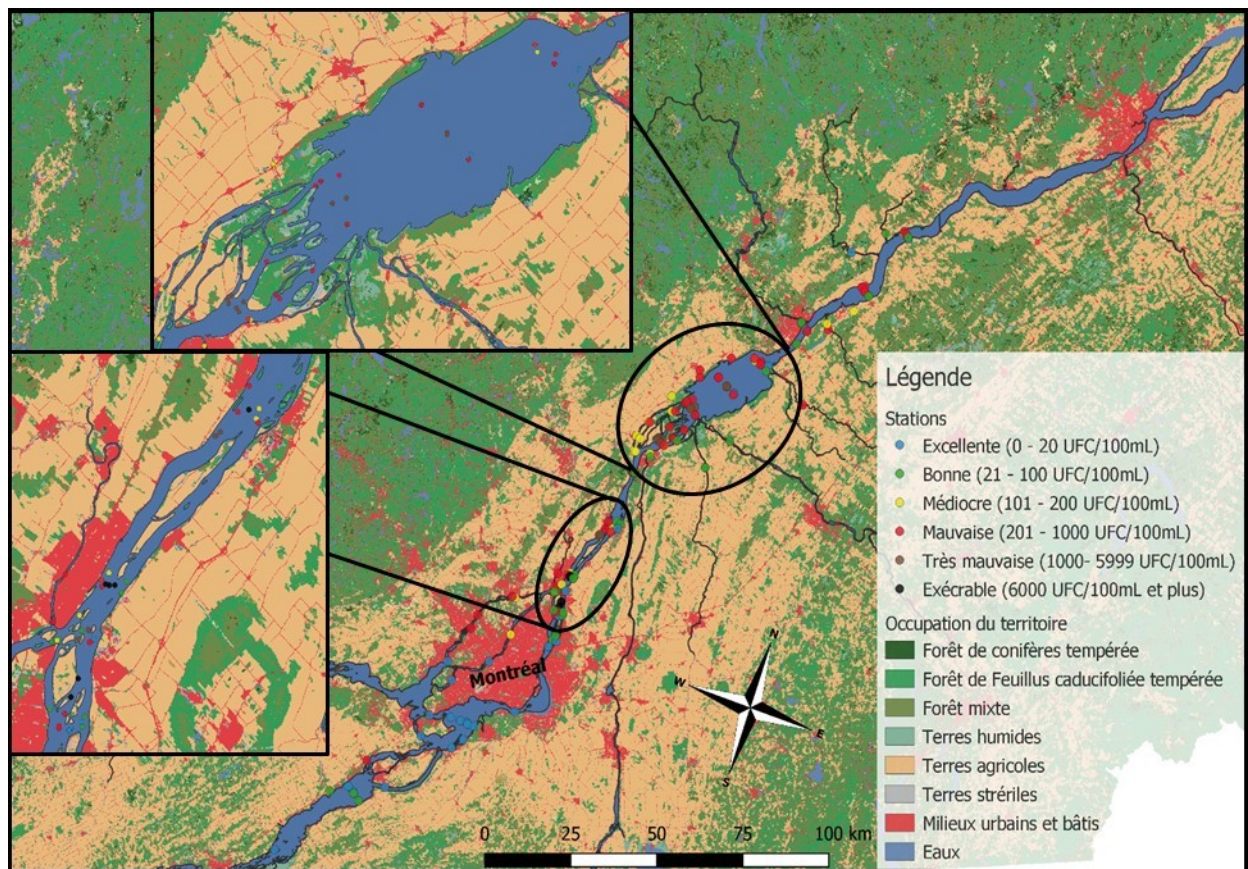


Figure 2.2 Carte de la distribution en *E. coli* en juillet 2017 et 2018 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

Dans certaines zones, la qualité de l'eau est excellente notamment en amont de l'usine d'épuration des eaux usées de la ville de Montréal, particulièrement la masse d'eau longeant la rive sud. En effet, l'eau provenant des Grands Lacs ne semble pas transporter une grande charge en *E. coli*. Sur la figure 2.2, il est possible de voir une meilleure qualité de l'eau à l'ouest de l'île de Montréal. En effet, seulement un site dépasse la norme provinciale de 200 UFC/100mL autorisant la baignade, à l'embouchure de la rivière Delisle (MELCC, s. d.b). Cette rivière longe un territoire agricole, pouvant être la cause de cette légère réduction de la qualité de l'eau à cet endroit. La figure 2.2 représente les données recueillies en juillet 2017 et 2018 traduisant donc des données estivales. Bien que la majorité des stations en amont de l'île de Montréal varient peu au fil du temps, la station de la rivière Delisle varie beaucoup, suggérant qu'il y a une covariance entre l'occupation du territoire et la saisonnalité.

En aval de Montréal, il y a de nombreux points où la concentration en *E. coli* dépasse plus de six fois la norme provinciale d'activités nautiques de 1000 UFC/100 mL (MELCC, s. d.b). Bien que les stations ayant les pires concentrations en *E. coli* soient au centre du fleuve Saint-Laurent, le panache de contamination s'étend de l'île aux Vaches à l'exutoire de l'usine d'épuration de la ville de Montréal jusqu'à l'île Chipeau à la hauteur de Contrecoeur. Puis, des îles de Sorel jusqu'en aval du lac Saint-Pierre, la concentration en *E. coli* oscille entre 1000 et 5999 UFC/100 mL. Bien que la concentration en *E. coli* soit moins importante, il s'agit de la continuité du panache de l'usine de filtration de la ville de Montréal, où celui-ci reste au centre du Lac Saint-Pierre à proximité du chenal de navigation.

Les rives du fleuve Saint-Laurent ont une moins grande concentration d'*E. coli* qu'en son centre, variant de 0 à 500 UFC/100 mL. En effet, bien que la plupart des stations possèdent des normes permettant de se baigner, il y a tout de même des secteurs où la concentration en *E. coli* est plus importante que la norme provinciale. L'eau de la rive sud, dominée par l'eau des Grands Lacs, est généralement de meilleure qualité que celle de la rive nord notamment pour ce qui est de la rivière du Loup qui est très agricole en aval et dépasse régulièrement les normes provinciales déconseillant la baignade et la navigation. Cependant, les tributaires présents sur la rive sud peuvent amener une grande quantité de bactéries *E. coli* et réduire la qualité de la masse d'eau verte longeant la rive sud. Sur la rive nord du fleuve, il y a plusieurs dépassements des normes provinciales sur la qualité bactériologique notamment au niveau du lac Saint-Pierre où ces deux rives sont fortement agricoles.

En aval du lac Saint-Pierre, il est possible d'observer cette variation à l'aide des données recueillies par la ZIP les Deux Rives en automnes 2019. La figure 2.3 illustre la variation des données en aval du lac Saint-Pierre, démontrant que la concentration en *E. coli* est généralement plus grande sur la rive nord que la rive sud. Dans le secteur de la ville de Trois-Rivières, la qualité de l'eau est moins bonne que sur la rive sud. La ville de Trois-Rivières peut affecter la qualité bactériologique dans le cours d'eau. La masse d'eau provenant du lac Saint-Pierre a un impact sur la concentration en *E. coli* sur les rives en aval. Il y a également des échantillons médiocres à mauvais près des rivières Batiscan et Sainte-Anne qui relarguent très peu d'*E. coli*.

Ces échantillons démontrent donc que bien que les tributaires aient un rôle dans la présence d'*E. coli* dans l'eau du fleuve, les masses d'eau fluviales transportent avec elle une charge d'*E. coli* affectant davantage la rive nord que la rive sud.

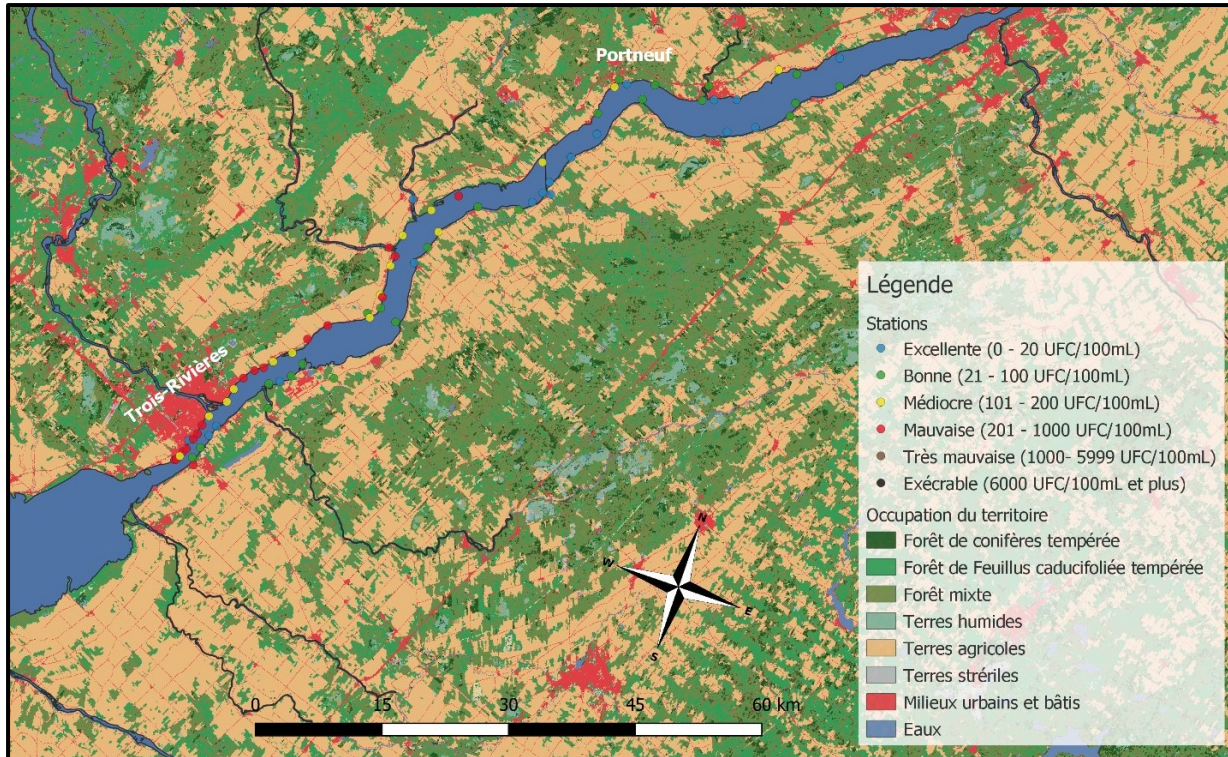


Figure 2.3 Carte de la distribution d'*E. coli* en aval du lac Saint-Pierre (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

La concentration en *E. coli* ne varie pas uniquement selon les zones du tronçon fluvial du Saint-Laurent, mais également en fonction des saisons. Les variations saisonnières et la quantité de précipitation influencent la concentration en *E. coli* des stations. Dans certaines zones, la concentration varie beaucoup dans l'année, alors que d'autres restent sensiblement similaires lorsqu'elles sont comparées aux autres stations. L'annexe 1 présente les différentes cartes des données mensuelles, pouvant démontrer les périodes et les endroits où il y a des problématiques en *E. coli*.

2.2.2 Sources d'*E. coli* dans le fleuve

La pression anthropique est importante sur le fleuve Saint-Laurent, car la majorité des Québécois réside dans son bassin versant (Marsh, 2015). C'est pourquoi l'altération de la qualité de l'eau est si importante, que ce soit à cause des activités urbaines ou des activités agricoles (MELCC, s. d.c).

De nombreux grands centres urbains rejettent des contaminants bactériologiques tels que l'*E. coli* par leurs usines de filtration des eaux usées. Bien que ces usines servent à réduire la quantité de polluants dans les

cours d'eau, il y a tout de même des périodes de surverses, lors de pluie intense, qui relarguent de l'eau non traitée dans les cours d'eau naturels (Dulude, 2016a). En 2017, 93 municipalités effectuent des surverses fréquemment de leurs eaux usées, expliquant les 62 000 cas de surverses ayant été observés sur le territoire québécois (*Campagne contre les déversements d'eaux usées*, 2018, 26 novembre). Dans le bassin versant du Fleuve Saint-Laurent, il y a 162 ouvrages de débordements laissant l'eau non traitée se diriger vers les cours d'eau naturels (Dulude, 2016a). L'année suivante, 62 municipalités ont déversé 53 645 fois leurs eaux usées représentant 21 millions de m³ d'eaux usées (Tardy, 2020, 1er juin). Ces déversements d'eaux usées sont dus à de fortes périodes de pluie. En effet, les égouts peuvent être unitaires ou séparatifs, connectant les résidences privées ainsi que les bâtiments publics aux usines de filtration des eaux usées. La figure 2.4 illustre ces deux types de raccordement d'égouts, unitaire et séparatif. Le réseau unitaire raccorde les eaux usées résidentielles au réseau pluvial, en cas de pluie, l'usine ne peut filtrer l'ensemble de l'eau du réseau, entraînant donc des surverses de l'eau. Le réseau séparatif, quant à lui, sépare les eaux usées résidentielles des eaux pluviales réduisant les variations importantes d'eau lors de période de pluies. L'eau de pluie ne subit pas de filtration et s'évacue dans les cours d'eau (Godmaire et Demers, 2009).

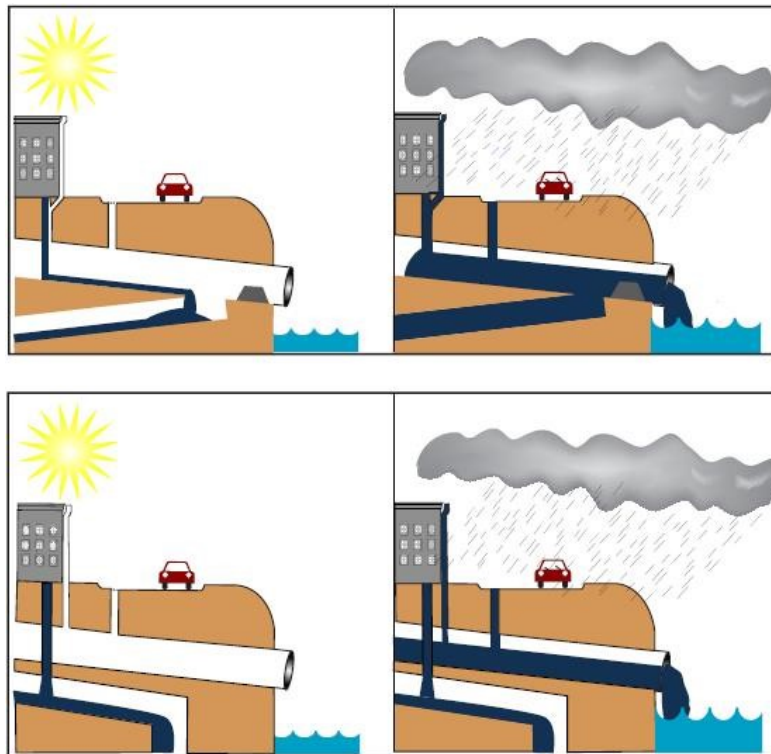


Figure 2.4 Schémas décrivant le type d'égout unitaire (haut) et séparatif (bas) (tiré de Godmaire et Demers, 2009)

À Montréal, par exemple, il s'agit du 2/3 du réseau d'égout qui est unitaire, augmentant considérablement le volume d'eau à traiter lors de forte de pluie (Dulude, 2016a). Des situations similaires peuvent être

observées dans les autres centres urbains de la province. Bien que les égouts séparatifs semblent grandement réduire les épisodes de surverses d'eaux usées résidentielles, des raccordements croisés peuvent engendrer d'autres conséquences. En effet, dans plusieurs villes, il y a des cas où des tuyaux résidentiels sont raccordés aux égouts pluviaux et les tuyaux pluviaux sont connectés aux égouts résidentiels. Pour ce qui est du premier cas, le raccordement engendre un déversement d'eaux usées non traitées dans les cours d'eau de façons diffus. Dans le second cas, le réseau d'eau de pluie raccordé aux égouts résidentiels peut amener une trop grande quantité d'eau à traiter dans les usines de filtration engendrant ainsi une surverse comparable à ce qui est visible dans le réseau unitaire (Godmaire et Demers, 2009). Ce type de problème est visible dans les villes de Laval, Longueuil, Montréal, Repentigny, Salaberry-de-Valleyfield et Trois-Rivières (Godmaire et Demers, 2009; MELCC, s. d.c).

La ville de Montréal suit les effets des rejets de son usine de filtration des eaux usées afin de déterminer l'étendue du panache. Selon leurs résultats, le panache reste aux centres du fleuve confiné à proximité du chenal maritime. Les effets de cette usine de filtrations peuvent être observés jusqu'au pont Laviolette au centre du fleuve (Ville de Montréal, 2019). De plus, en 2017, les usines de filtration des eaux usées des villes de Longueuil et de Shawinigan ont rejeté des millions de litres d'eaux usées en surverse (*Campagne contre les déversements d'eaux usées*, 2018, 26 novembre). Bien que la ville de Shawinigan ne soit pas sur les rives du fleuve Saint-Laurent, l'usine de filtration des eaux usées se situe sur les rives de la rivière Saint-Maurice (Ville de Shawinigan, 2011). Malgré la présence de ville de Shawinigan et de Trois-Rivières dans le bassin versant de la rivière Saint-Maurice, l'effet de ces usines n'est pas aussi visible sur la qualité de l'eau bactériologique du fleuve Saint-Laurent que l'usine d'épuration de Montréal.

Plusieurs municipalités ne possèdent pas d'usine de filtration des eaux usées, car les citoyens ont des fosses septiques. Celles-ci doivent être entretenues afin de ne pas contaminer la nappe phréatique et les cours d'eau à proximité des fosses (Miller et al., 2011). Ces installations sanitaires sont majoritairement retrouvées dans les municipalités agricoles, car les propriétés sont loin des uns des autres. Bien que les centres urbains soient la plus grande source d'*E. coli* dans le fleuve, les zones agricoles jouent également un rôle non négligeable pour ce type de pollution. Dans les basses terres du Saint-Laurent, la Montérégie, le Centre-du-Québec et Lanaudière représentent des secteurs ayant une grande superficie agricole (MELCC, s. d.c). Le lac Saint-Pierre semble particulièrement touché par la pollution agricole, car la plupart de ces tributaires ont un bassin versant dominé par l'agriculture (Dulude, 2016b). Les sources d'*E. coli* d'origine agricoles proviennent d'animaux en pâturage ainsi que de l'épandage de fumier et de lisier. Lors du pâturage, les animaux excrètent dans les champs et ces excréments peuvent subir du lessivage vers les cours d'eau, semblable à ce qui est observé dans les champs fraîchement épandus (Miller et al., 2011). En comparant les données recueillies, les tributaires agricoles tels que les rivières Nicolet, Yamachiche, du Loup (en Mauricie) et Maskinongé ont une concentration en coliformes fécaux supérieure à celle de la rivière Saint-Maurice qui est forestière et urbaine.

2.2.3 Puits retenant la bactérie *E. coli*

Bien que les sources en *E. coli* soient nombreuses sur le fleuve Saint-Laurent, il y a tout de même des sites où les conditions environnementales permettent de capter une certaine quantité de cette bactérie. Les sites considérés comme des puits peuvent capter les polluants aquatiques ou favoriser leur dégradation naturelle dans le milieu aquatique. Dans la section 1.2 de ce texte, une série de variables biotiques et abiotiques limitantes la survie de la bactérie *E. coli* en milieu hydrique y est énuméré. D'abord, la concentration en *E. coli* diminue lorsqu'elle est exposée à des rayons ultra-violetts tels que la radiation solaire. Les eaux claires, telles que celle provenant des Grands Lacs, favoriseraient donc la dégradation de cette bactérie, à l'inverse des eaux turbides (Maraccini et al., 2016). De plus, cette masse d'eau verte subit moins de pression anthropique que la masse d'eau brune et son débit élevé engendre un effet de dilution dans cette masse d'eau (Ville de Montréal, 2019). Par exemple, la rivière Nicolet est une rivière agricole relarguant à l'occasion une quantité d'*E. coli* supérieure aux normes provinciales permettant la baignade ou parfois même les activités récréatives en contact avec l'eau. Cependant à l'embouchure de cette rivière l'eau a souvent une meilleure qualité. À quelques kilomètres en aval de l'exutoire, la qualité de l'eau permet, la plupart du temps, des activités telles que la baignade où la concentration doit être inférieure à 200 UFC/100 mL.

Bien que la turbidité réduise la pénétration de la lumière dans l'eau, il est tout de même possible que la matière organique puisse modifier la concentration en *E. coli*. La présence de matière organique dissoute colorée (CDOM) permet de capter, sous certaines conditions, la bactérie *E. coli* lorsque celle-ci se sédimente dans le fond du cours d'eau (Maraccini et al., 2016). Les sédiments enfouis enterrent avec eux une certaine quantité de polluants tels que la bactérie *E. coli*. Afin de favoriser la sédimentation de la matière organique, le débit de l'eau doit être faible. Par exemple, les côtés latéraux des lacs fluviaux et les zones riveraines ont tendance à ralentir le débit d'eau du fleuve où il est possible d'observer la sédimentation. Parmi les facteurs abiotiques pouvant amplifier la réduction en *E. coli* dans l'eau libre, les basses températures amplifient l'effet du puits dans les sédiments (Chandrasekaran et al., 2015). Cependant, ce puits peut remettre en suspension la matière organique entraînant également la bactérie *E. coli* dans le cours d'eau. La matière organique devient alors une source d'*E. coli* (Rochelle-Newall et al., 2016).

Parmi les zones riveraines, les milieux humides sont parmi les meilleurs puits de ce secteur pouvant capter près de 90 % de la bactérie *E. coli* lorsque l'eau traverse cet écosystème. De plus, les milieux humides agissent comme zone tampon en période de crue. En effet, il n'y a pas de variation significative entre la concentration en *E. coli* durant les périodes sèches et humides (Meng et al., 2018).

Dans le fleuve Saint-Laurent, les puits d'*E. coli* ne semblent pas être très définis spatialement. Il n'y a pas de secteurs où la concentration en *E. coli* diminue lorsque la masse d'eau traverse ce point. Cependant, il semble y avoir une tendance de réduction de la concentration en *E. coli* lorsque l'eau traverse l'archipel des îles de Sorel. Dans la figure 2.5, il y a une réduction de la bactérie sur le cours d'eau longeant la masse d'eau qui entre au centre de l'archipel des îles de Sorel. En effet, en amont, la plupart des points du centre

du fleuve ont une très mauvaise qualité d'eau alors que les points en aval de l'archipel varient de mauvais à très mauvais. Les secteurs très mauvais semblent avoir suivi le chenal de navigation alors que les secteurs mauvais proviennent de l'eau ayant passé entre les îles. Cet archipel représente près de 50 % des milieux humides présents sur le tronçon fluvial du Saint-Laurent. De plus, 20 % des marais du fleuve se trouvent également dans cet archipel de 103 îles (Lebel, 2013, 9 juillet). En plus de cet archipel à l'entrée du lac Saint-Pierre, les rives de ce lac fluvial comptent les milieux humides tels que le site Ramsar à proximité de Nicolet, sur la rive sud du lac Saint-Pierre (MDDEFP, 2013b).

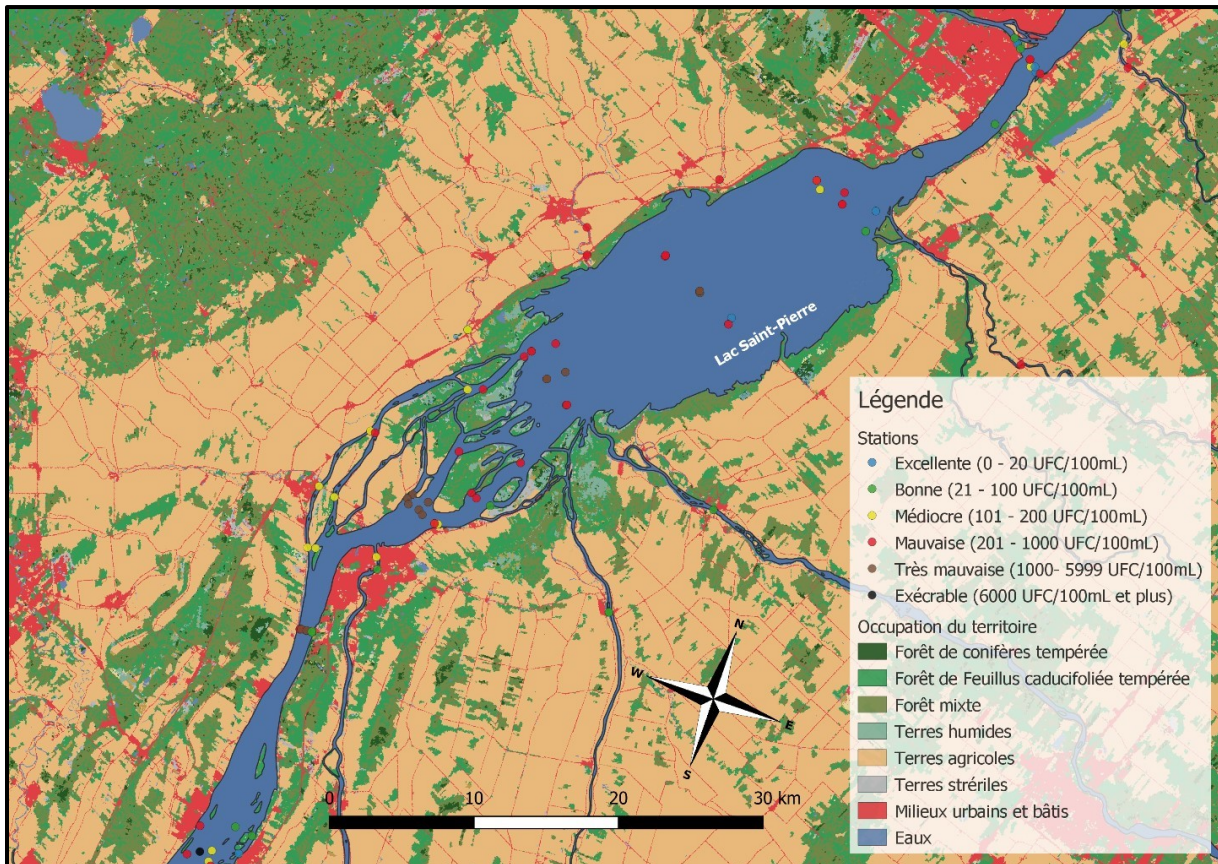


Figure 2.5 Carte de la distribution en *E. coli* en juillet 2017 et 2018 dans le secteur du lac Saint-Pierre
(couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

En effet, la concentration en amont de ce lac fluvial est de 1900 UFC/100 mL alors que celle en aval est de 830 UFC/100 mL, il s'agit d'une réduction de 1070 UFC/100 mL soit plus de la moitié de la concentration initiale. Cet archipel représente près de 50 % des milieux humides présents sur le tronçon fluvial du Saint-Laurent. Ces écosystèmes humides peuvent jouer un rôle de rétention de la bactérie *E. coli*. De plus, le lac Saint-Pierre dans son ensemble a un effet sur la réduction de la concentration en *E. coli*, car la qualité en amont est très mauvaise alors qu'en aval elle est mauvaise au centre du fleuve. Le lac Saint-Pierre permet de réduire la concentration en *E. coli* de 4410 UFC/100 mL.

2.3 Rôles hydrologiques de la distribution de la bactérie *E. coli* dans le fleuve

La distribution en *E. coli* varie beaucoup au fil du fleuve, à cause de la présence de sources et de puits de cette bactérie dans le milieu naturel. Cependant, le paysage fluvial influence la présence et la concentration des sources par la présence d'archipel, de lacs fluviaux et zone humide. De plus, l'effet des saisons peut influencer la concentration d'*E. coli* dans les cours d'eau, en raison des inondations et des fortes pluies. Enfin, l'occupation du territoire joue un rôle sur l'apport en *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent.

2.3.1 Paysage fluvial

Le tronçon fluvial comprend plusieurs secteurs à surveiller, qu'ils soient des sources ou des puits de la bactérie *E. coli*. De plus, certains secteurs peuvent être des sites de références tels que les lacs fluviaux en amont de Montréal. D'autres secteurs peuvent être des sources importantes de contamination par l'*E. coli*, comme les zones urbaines de grandes amplitudes. Plusieurs petits archipels bordent les rives du fleuve, celles-ci peuvent agir comme puits d'*E. coli*. À l'entrée du lac Saint-Pierre, l'eau est accueillie par l'archipel des îles de Sorel, il abrite également plusieurs milieux humides. Puis, le lac Saint-Pierre, en soi, héberge une série de petits sites pouvant être des puits captant la bactérie *E. coli* et plusieurs autres polluants.

De l'amont à l'aval, le tronçon fluvial compte plusieurs écosystèmes, influençant la concentration en *E. coli*. L'eau provenant des Grands Lacs se rend dans le lac Saint-François, ce lac fluvial le plus à l'ouest du fleuve Saint-Laurent. La superficie de ce lac est partagée entre la province de l'Ontario et du Québec (Environnement et Changement climatique Canada [ECCC], 2012). Une portion des rives de ce lac est une réserve nationale de la Faune, afin de protéger les marais et les zones humides en vertu de la convention Ramsar (ECCC, 2011). Sur les rives de ce lac, aucune activité industrielle majeure n'affecte la qualité de l'eau. Cependant à Cornwall et Massena, les activités industrielles peuvent altérer la qualité de l'eau. Cet élargissement du fleuve Saint-Laurent est d'une largeur de 4,7 km et d'une longueur de 50 km et sa profondeur d'environ 6 m. Bien que ce secteur ait les dimensions d'un lac, il possède des caractéristiques fluviales telles que le débit d'une moyenne de 7 500 m³/s (ECCC, 2012). Le débit est contrôlé par le barrage Moses-Saunders déterminant le niveau d'eau du lac Ontario, réduisant la variation interannuelle. Toutefois, ce fort débit provient majoritairement des Grands Lacs, et favorise le déplacement rapide de l'eau dans ce lac. En effet, le temps de résidence de l'eau est de 36 heures lorsqu'il suit le chenal de navigation et de 12 jours lorsque l'eau suit les rives. Ces temps de résidence dans le lac Saint-François ne permettent pas de faire de stratification favorisant la décantation de polluant pouvant être présent dans la masse d'eau (La Violette, 2004). Cependant, les données analysées dans le cadre de cet essai démontrent que la concentration en *E. coli* est majoritairement sous la norme provinciale permettant la baignade. C'est peut-être pour cette raison que le lac compte de nombreux bateaux de plaisance, en comparaison aux autres lacs fluviaux du fleuve Saint-Laurent (Bleau, Lefebvre, Germain, Leclerc, et Archambault, 2016). À

la figure 2.6, il est possible de constater que la qualité bactériologique de ce secteur est classée de bonne à excellente.

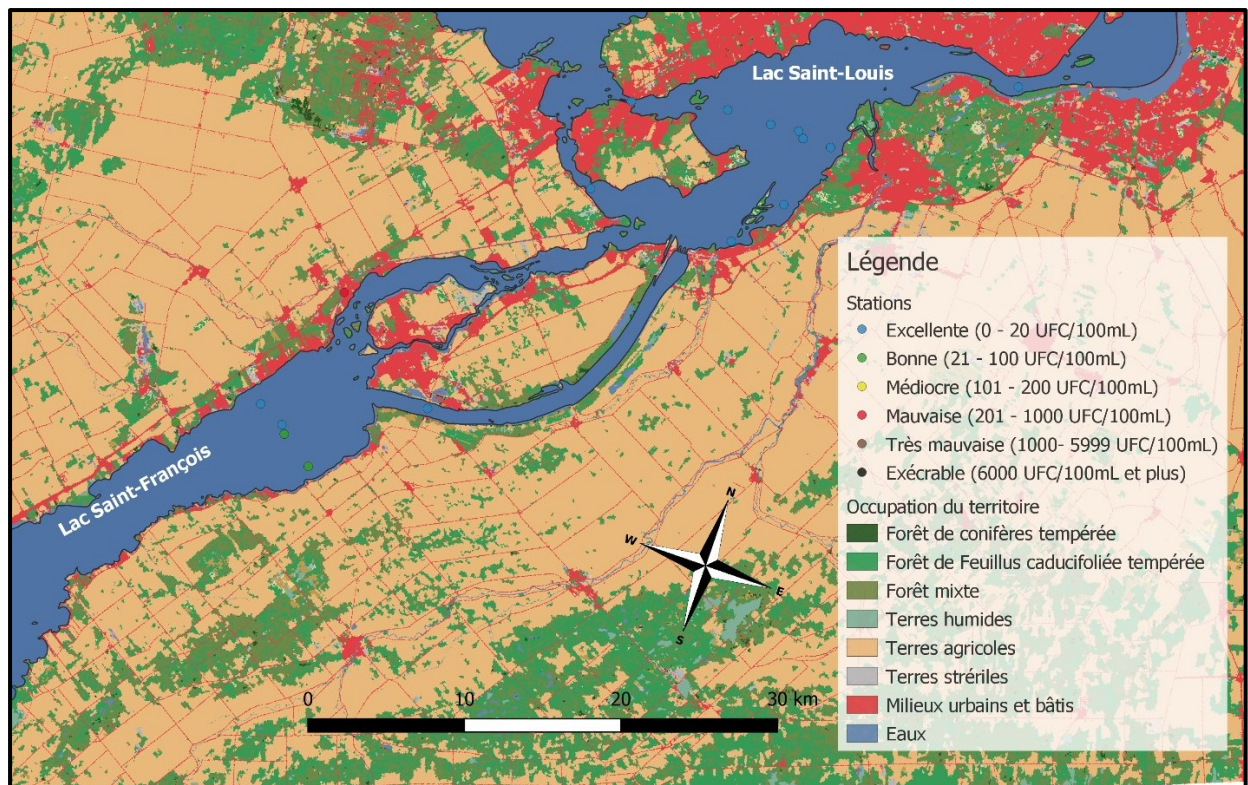


Figure 2.6 Carte de la distribution en *E. coli* en juillet 2017 et 2018 dans le secteur des lacs Saint-François et Saint-Louis (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

Après son passage dans le lac Saint-François, l'eau se dirige vers le lac Saint-Louis qui puise son eau des Grands Lacs ainsi que de la rivière des Outaouais. Cette dernière transporte une masse d'eau brune longeant la rive nord du lac. Ce lac mesure 6,5 km de large et 23 km de long, il est moins grand que le lac Saint-François (ECCC, 2012). La profondeur de ce lac varie à cause de la présence de fosses pouvant atteindre 27 m, le littoral a une profondeur moyenne de 3,4 m (Bouchard et Cantin, 2015). Généralement, la masse d'eau est dominée par l'eau issue des Grands Lacs, sauf en période de crue, où la rivière des Outaouais augmente l'amplitude d'eau d'en moyenne 0,8 m (ECCC, 2012). Le débit moyen de l'eau traversant ce lac fluvial est de 8 400 m³/s, ce débit est plus grand que celui du lac Saint-François qui n'est alimenté que par l'eau des Grands Lacs et quelques tributaires mineurs. Le temps de résidence de l'eau varie entre 12 et 48 heures selon le circuit de l'eau dans le lac.

Plusieurs infrastructures influencent le débit d'eau du lac Saint-Louis, notamment le canal de Beauharnois ainsi que des ouvrages hydroélectriques. C'est dans ce lac que les trois masses d'eau distinctes se forment et restent sensiblement la même tout au long du tronçon fluvial du Saint-Laurent. D'abord, la masse d'eau

brune provenant de la rivière des Outaouais longe la rive nord, c'est-à-dire l'île Perrot et l'île de Montréal. Au centre du lac, la masse d'eau est mixte, issue d'un mélange entre l'eau de la rivière des Outaouais et l'eau des Grands Lacs. Puis, la masse d'eau verte suivant la rive sud provient des Grands Lacs (La Violette, 2004). Ce secteur représente un échantillon non touché par les usines d'épuration de la ville de Montréal où la concentration en bactérie *E. coli* est sous les normes provinciales permettant la baignade, malgré la présence des trois masses d'eau. En effet, la figure 2.6 illustre que la qualité de l'eau dans ce lac est excellente, sur l'ensemble de sa largeur, n'indiquant que très peu de variation entre les masses d'eau.

L'eau longe ensuite l'île de Montréal, ce secteur du fleuve est caractérisé par plusieurs îles naturelles et construites, telles que l'île Notre-Dame aménagée dans le cadre de l'expo 67. La construction de ces îles modifie grandement le régime hydrologique et les patrons d'écoulements de ce secteur du fleuve (Bouchard et Cantin, 2015). Puis, l'eau se rend ensuite en aval de la ville de Montréal où l'usine d'épuration de cette ville rejette les eaux près de l'île aux Vaches. Il s'agit d'une source importante de bactérie *E. coli*, en particulier lorsqu'il y a de fortes pluies causant des débordements d'eau non traitée par l'usine. C'est dans ce secteur que les plus grandes concentrations en *E. coli* ont été dénombrées, pouvant atteindre jusqu'à 600 000 UFC/100 mL au point de rejet, donc 600 fois plus élevé que la norme provinciale de 1000 UFC/100 mL permettant des activités nautiques. La concentration en *E. coli* est concentrée dans la masse d'eau centrale, sur une longue distance. En effet, l'écoulement laminaire des différentes masses d'eau réduit les échanges entre celles-ci et favorise l'écoulement de l'eau vers l'aval (Ville de Montréal, 2019). La figure 2.2 démontre, à l'aide d'un agrandissement de l'image, ce secteur où la concentration en *E. coli* est plus élevée au centre du fleuve qu'au niveau des rives. En effet, la qualité bactériologique de ces sites au centre du fleuve est considérée comme exécrable.

Les répercussions du panache de l'usine de filtration des eaux usées de la ville de Montréal sont visibles jusqu'en aval du lac Saint-Pierre, le troisième lac fluvial du Saint-Laurent. Depuis Montréal, la masse d'eau traverse plusieurs petits archipels tels que celle de Contrecoeur, puis les archipels des îles de Sorel et des îles de Berthierville formant l'archipel du lac Saint-Pierre. Ce lac fluvial est le plus volumineux des trois présents dans le tronçon fluvial. De surcroît, l'augmentation de son volume en période de crue cause des plaines inondables au niveau des deux rives du lac Saint-Pierre (MDDEFP, 2013b). En effet, sa superficie est de près de 500 km² dont la longueur est de 35 km et la largeur est de 15 km (ECCC, 2012). La profondeur de ce lac est de 13,7 m dans le chenal de navigation et de 2,7 m sur le pourtour de celui-ci (Bouchard et Cantin, 2015). En période de crue, une superficie de quelques dizaines de kilomètres de plaines est inondée pendant 5 à 9 semaines selon l'ampleur des crues (MDDEFP, 2013b). En 2017, les crues annuelles ont été les plus grandes depuis les trente dernières années (Lebeuf, 2017, 13 mai). Les rives du lac Saint-Pierre sont caractérisées par des prairies humides, des marécages arbustifs et arborescents dominés par les érables argentés (*Acer saccharinum*) ainsi que par des zones agricoles. La vaste superficie de zone humide bordant le lac Saint-Pierre est la raison qu'il fait partie de la convention Ramsar pour les milieux humides d'importance internationale. Ce secteur possède la plus grande superficie

de milieux humides du tronçon fluvial. Cependant, plusieurs zones de prairies humides ont été remplacées par des zones agricoles, pouvant être une source de contamination en *E. coli* (MDDEFP, 2013b). Toutefois, la superficie du lac Saint-Pierre et ses rives inondables restent naturelles à 90 % (ECCC, 2012). Malgré la grande superficie du lac Saint-Pierre et ses milieux humides, le débit est de 1000 m³/s. Le débit du fleuve en amont explique en majorité la vitesse de déplacement de l'eau. De plus, les tributaires présents dans le lac Saint-Pierre sont responsables d'une augmentation de 8 % du débit de l'eau. Le temps de résidence de l'eau dans ce secteur varie de 20 à 72 heures, le chenal de navigation favorise le transit rapide de l'amont à l'aval du lac Saint-Pierre (La Violette, 2004). Ce temps de débit et ses rives inondables naturelles permettent ainsi de capter une certaine quantité d'*E. coli*, comme le démontre la figure 2.5.

2.3.2 Effets des saisons

L'hydrologie du paysage fluvial varie selon les saisons et influence la concentration en *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent. Les inondations saisonnières ainsi que les fortes pluies modifient le débit de l'eau pouvant transporter une grande quantité de bactéries *E. coli* ou avoir un effet de dilution lorsque la qualité de l'eau est bonne.

Au Québec, les périodes d'inondations saisonnières sont majoritairement observées au printemps et varient d'une année à l'autre avec des récurrences annuelles, bisannuelles, aux 20 ou aux 100 ans. Ces récurrences ne sont qu'une estimation de la fréquence d'inondation d'une amplitude prédéterminée, elles peuvent être plus ou moins précises. Les inondations de grandes amplitudes sont moins fréquentes que les inondations annuelles ou bisannuelles (Lapointe, 2019, 10 mai). Cependant au cours de ces dernières années plusieurs inondations de grandes amplitudes ont eu lieu en très peu de temps. En effet, 2017 et 2019 ont été deux années où les inondations ont été exceptionnelles (Lapointe, 2019, 10 mai; Lebeuf, 2017, 13 mai). Plusieurs secteurs sont particulièrement touchés par les inondations printanières, particulièrement au niveau de la région de Montréal près des rivières des Outaouais, des Mille Îles, dans le tronçon fluvial à la hauteur de Repentigny et du lac Saint-Pierre (Létourneau, 2017; Lapointe, 2019, 10 mai). Parmi les données analysées dans le cadre de cet essai, la période printanière ne cause pas de changement majeur avec la période hivernale sur les sites analysés. Cependant, les sites analysés sont majoritairement en aval des tributaires, sans être directement dans le fleuve. Toutefois, il est également possible que la quantité d'eau reçue lors de ces inondations induise un effet de dilution des polluants présent dans l'eau y compris la concentration en *E. coli*. Plusieurs facteurs météorologiques amplifient les effets des inondations tels que la quantité de neige reçue pendant l'hiver, fondant pendant le printemps et la quantité de pluies reçue pendant cette période (Létourneau, 2017). La figure 2.7 illustre la variation en *E. coli* pendant ces deux périodes. Au printemps, il y a plusieurs données aberrantes dépassant la valeur de 2000 UFC/100 mL, alors qu'en hiver les données restent sous cette valeur. Malgré ces données aberrantes, les boîtes sont de taille similaire. La variance est légèrement plus importante aux printemps, mais il ne s'agit pas d'une différence significative.

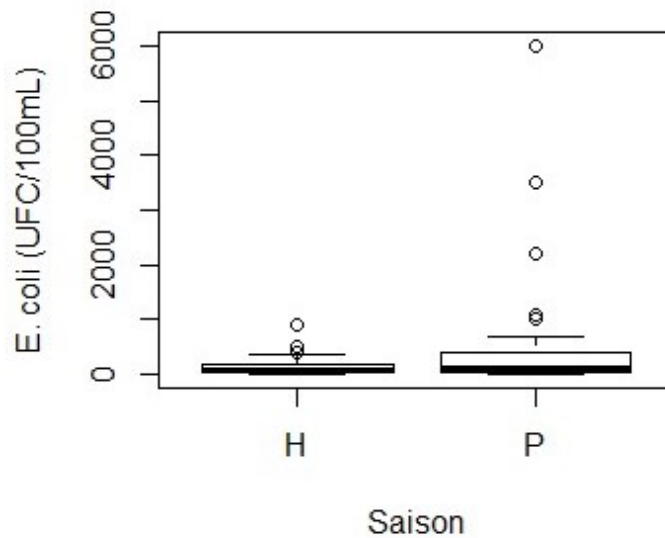


Figure 2.7 Diagramme de la variation de la concentration en *E. coli* en hiver (H) et au printemps (P)

En plus d'amplifier les effets des inondations, les coups d'eau causés par de fortes pluies peuvent également faire varier la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau de plusieurs manières. D'abord, les fortes pluies favorisent le débordement des réseaux d'égout entraînant de l'eau non traitée dans les cours d'eau naturels. Il s'agit d'une importante source urbaine de pollution en bactérie *E. coli* surtout lorsque les égouts ont un raccordement unitaire (Godmaire et Demers, 2009). De plus, les fortes pluies causent du ruissellement hydrique sur des sols agricoles pouvant être fertilisés par du fumier. L'eau de ruissellement est donc chargée de coliformes fécaux tels que l'*E. coli*. La première source agricole d'*E. coli* en milieu hydrique consiste au ruissellement de sol fertilisé à l'aide de fumier et de lisier (Miller et al., 2011). Les périodes de fortes pluies sont caractérisées par la quantité de pluie obtenue, le temps de la précipitation et la fréquence entre les précipitations. Lorsqu'une grande quantité de pluie tombe en peu de temps, les impacts sur la qualité de l'eau sont plus importants que si cette même quantité de pluie prend plus de temps à précipiter. En période de pluie abondante sur une petite période de temps, le sol est saturé en eau forçant le ruissellement de l'eau entraînant avec elle un sol parfois chargée de matières organiques et de polluants. La fréquence de pluie peut également favoriser le ruissellement lorsqu'il y a deux épisodes de pluie, à peu de temps d'intervalle. Puisque le sol peut être saturé d'eau à cause de la première pluie (Létourneau, 2017; Miller et al., 2011). Les épisodes de pluie ont un fort impact sur la concentration en *E. coli* dans le fleuve. En effet, les données analysées démontrent une corrélation positive entre la concentration en *E. coli* et les coups d'eau la veille ou la journée de l'échantillonnage. Le débit du fleuve peut être influencé par les fortes pluies, notamment par l'ouverture de certains barrages en amont afin de réduire les risques d'inondations (Létourneau, 2017).

Le débit de l'eau dans le fleuve Saint-Laurent varie de façon géographique selon l'hydrologie du milieu, mais également au fil des saisons. En effet, les périodes de crue, les événements de fortes pluies ainsi que la fonte de la neige au printemps augmentent le débit de l'eau (Létourneau, 2017). C'est pour cette raison que le débit peut être plus élevé en avril et en mai en l'absence de la régulation des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, ainsi que par le ruissellement de l'eau sur les sols gelés imperméables. Le débit des deux principales sources d'eau du fleuve Saint-Laurent varie à leurs manières. Effectivement, le débit de l'eau des Grands Lacs alterne entre 6 000 à 9 000 m³/s alors que la rivière des Outaouais a une variation de débit plus importante allant de 1000 à 8 000 m³/s. Toutefois, les ouvrages hydrologiques installés à divers endroits en amont du fleuve réduisent l'effet des inondations printanières, bien qu'une variation de débit puisse être visible selon les années. En janvier, cependant, il y a souvent une réduction du débit fluvial à cause de la présence de glace à la surface du fleuve et de ces tributaires. Lorsqu'une année subit moins de précipitation, il est difficile de conserver un fort débit pendant toute l'année, c'est ce qui est arrivé en 2010 et en 2012. Lors de ces deux années, une baisse de débit a été observée au cours de l'année, principalement lors de l'étiage, en fin d'été ou au début de l'automne (Bouchard et Cantin, 2015). Les forts débits favorisent la dispersion de la bactérie *E. coli* sur de grandes distances. Par exemple, le panache de contamination issu de l'usine d'épuration de la ville de Montréal peut produire un panache plus volumineux lorsque le débit est fort. Cependant, ces forts débits semblent centrer le panache dans la masse d'eau centrale, car les tributaires à proximité de Montréal ont également un débit élevé favorisant l'écoulement laminaire des masses d'eau (Ville de Montréal, 2019).

2.3.3 Occupations du territoire

En plus d'être influencée par la variation saisonnière, l'hydrologie varie selon l'occupation territoriale du bassin versant du fleuve Saint-Laurent et ses tributaires, car la qualité bactériologique de celui-ci dépend en partie de l'occupation du territoire de ses rives, de ses îles ainsi que de ses tributaires. En effet, plusieurs rives fluviales sont agricoles notamment au niveau du lac Saint-Pierre. Les basses terres du Saint-Laurent sont des zones agricoles très fertiles, c'est pourquoi la majorité de la population du Québec y habite (Elson, 2015). Bien que plusieurs zones agricoles soient remplacées par des zones résidentielles ou industrielles, il y a tout de même la création de nouvelles superficies agricoles prenant la place de plusieurs milieux humides, entre autres sur les rives du Lac Saint-Pierre (Groupe de travail Suivi de l'état du Saint-Laurent, 2014). Les territoires agricoles sur les rives du Saint-Laurent peuvent être inondés par les inondations saisonnières qui transportent avec elles des nutriments du sol favorisant la turbidité de l'eau et la présence de bactérie *E. coli* (MDDEFP, 2013b; Rochelle-Newall et al., 2016).

De plus, le territoire urbain est également présent sur les rives ainsi que les îles du fleuve. Les villes de Montréal et Laval sont situées sur des îles à proximité de rives fortement urbanisées, leurs populations sont respectivement aux premiers et troisièmes rangs sur le plan de la taille dans la province (Institut de la Statistique du Québec, 2017). La ville de Montréal suit attentivement les effets de leur usine d'épuration sur la qualité de l'eau du fleuve Saint-Laurent, car il s'agit d'un secteur où la concentration bactérienne est la

plus élevée (Ville de Montréal, 2019). D'autres villes telles que Longueuil et Trois-Rivières se situent sur les rives fluviales et sont parmi les dix plus grandes villes du Québec, en matière de la population (Institut de la Statistique du Québec, 2017). Longueuil a été nommée parmi les villes qui ont fait le plus grand nombre de surverses d'eaux usées non traitées dans les cours d'eau naturels, en 2017 (*Campagne contre les déversements d'eaux usées*, 2018, 26 novembre).

Le régime hydrique des rivières se jetant dans le fleuve modifie l'hydrologie du fleuve de manière différente. Certaines rivières amènent une grande quantité d'eau pouvant varier le débit de l'eau du fleuve telle que la rivière des Outaouais qui est la seconde source d'eau du fleuve Saint-Laurent (Marsh, 2015). D'autres rivières ont une moins grande influence sur le débit fluvial, tout en ayant un grand apport en *E. coli* dans l'écosystème aquatique. Les rivières ayant une forte emprise agricole entraînent avec elles une concentration plus élevée en *E. coli* que l'eau du fleuve lorsqu'elles se rejoignent. Ce transport d'*E. coli* en milieux hydriques est amplifié par les épisodes de pluies qui favorisent le ruissellement de fumier et lisier présent dans les champs (Miller et al., 2011; Wu, Rees, et Dorner, 2011). L'occupation urbaine du territoire influence également la concentration en *E. coli* dans le fleuve, par la gestion des eaux usées. L'eau provenant des tributaires suit la masse d'eau fluviale longeant leur rive, car les masses d'eau fluviale n'ont pas tendance à se mélanger dans le tronçon fluvial. Les tributaires de la rive nord alimentent donc la masse d'eau brune tels que les rivières Assomption, Maskinongé, Yamachiche et Saint-Maurice, Sainte-Anne et Batiscaan. Les tributaires de la rive sud rejoignent la masse d'eau verte, bien que la qualité de l'eau de celles-ci soit de moins bonne qualité que cette masse d'eau fluviale. Sur cette rive, les rivières Richelieu, Saint-François, Nicolet et Yamaska se jettent dans le fleuve Saint-Laurent (MDDEFP, 2013b). Chacun des tributaires du Fleuve Saint-Laurent a un impact sur la concentration en *E. coli* présents dans les différentes masses d'eau.

3. RÔLES DES RIVIÈRES ET DES SAISONS DANS LA DISTRIBUTION DES *E. COLI* EN MILIEU FLUVIAL

Bien que l'hydrologie du fleuve Saint-Laurent influence la distribution en *E. coli* le long de cette masse d'eau, l'apport des rivières et l'effet des saisons affectent la présence de cette bactérie. De plus, les variations saisonnières modifient le débit ainsi que la quantité en polluants dans les différents cours d'eau.

3.1 Charge d'*E. coli* des différents cours d'eau

Chacune des rivières étudiées apporte une quantité d'eau et de polluant unique variant selon son bassin versant et les activités anthropiques se produisant à l'intérieur de ses limites. Les rivières étudiées font partie du réseau-rivières et ont généralement été analysées mensuellement. L'occupation du territoire des différentes rivières peut expliquer en partie la concentration en *E. coli* largué dans le fleuve Saint-Laurent (Miller et al., 2011). Puis, les masses d'eau riveraine sont intégrées dans le fleuve Saint-Laurent de diverse manière.

3.1.1 Effets de l'occupation du territoire sur la concentration en *E. coli*

La figure 3.1 illustre les rivières présentées précédemment et le nombre d'échantillons présent dans chacun des barèmes provinciaux de la qualité bactériologique servant à la protection des activités nautiques (MELCC, s. d.b).

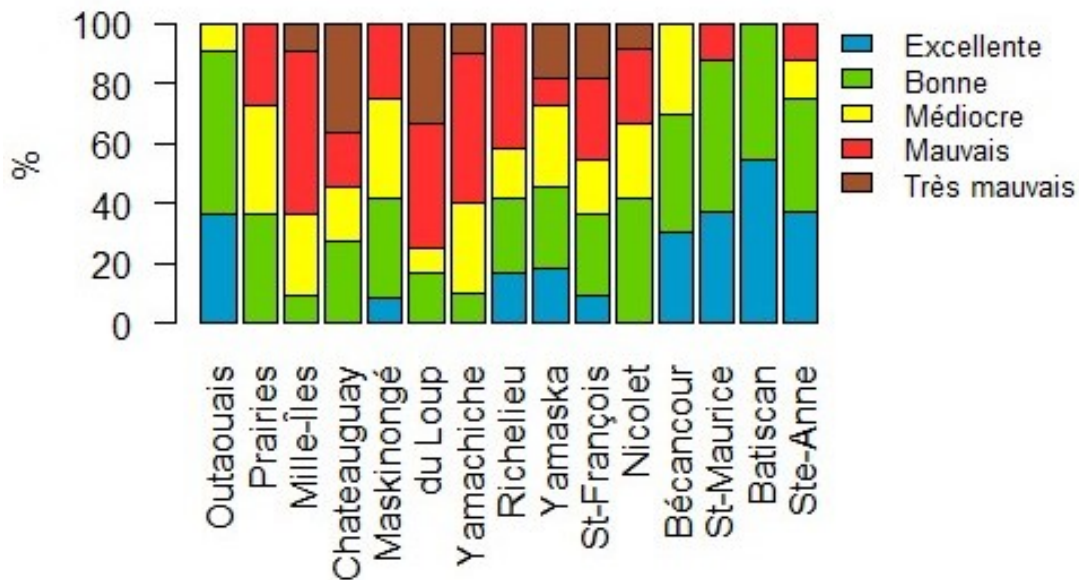


Figure 3.1 Diagramme de la distribution de la qualité bactériologique (*E. coli*) des 15 rivières à l'étude, ayant entre 9 et 12 échantillons par rivières (Données tirées du MELCC s. d.a)

En amont de la ville de Montréal, la rivière des Outaouais représente le tributaire le plus important de la rive nord. Le bassin versant de cette rivière est dominé par les milieux forestiers alors que l'agriculture ne représente que 15 % du bassin versant. Les zones urbaines ne représentent que 1 % du territoire soit les

villes de Gatineau et d'Ottawa (MDDELCC, 2015). Les résultats mensuels en *E. coli* indiquent que tout au long de l'année, les normes provinciales en *E. coli* sont respectées, indiquant que bien que cette rivière apporte beaucoup d'eau au fleuve, elle ne contribue que très peu à sa contamination en *E. coli*. En effet, la figure 3.1 illustre que la qualité bactériologique varie entre les catégories excellente et médiocre. Il s'agit d'une des rares rivières ayant une aussi faible concentration en *E. coli*.

À proximité de Montréal, la rivière des Prairies est confinée entre les îles de Montréal et Laval, la qualité bactériologique de cette rivière est généralement bonne telle qu'illustrée à la figure 3.1. En effet, seuls trois échantillons sont supérieurs à la norme provinciale déconseillant la baignade. La qualité bactériologique de la rivière des Prairies varie entre bonne et mauvaise, dont 40 % des échantillons sont inférieurs à 100 UFC/100 mL. Ensuite, la rivière des Mille Îles est située entre l'île de Laval et la rive nord du fleuve. Près de la moitié du bassin versant de cette rivière est couverte par l'agriculture, les zones urbaines couvrent 20 % du territoire et les zones boisées fortement fragmentées occupent quant à elle 28 % du bassin versant de cette rivière (Tremblay et al., 2015). Pour ce qui est des données issues de la rivière des Mille Îles, la concentration en *E. coli* dépasse la norme provinciale de baignade pendant les mois de juin et juillet 2017 sur l'ensemble des points échantillonnés de la rivière. Au mois d'août 2017, seule la station en aval de la rivière a une concentration plus grande que les normes provinciales de baignade, alors que celle en amont démontre une excellente qualité. La figure 3.1 illustre la distribution sous forme de pourcentage d'échantillons dans chacune des catégories de la qualité bactériologique. Sur la rive sud, à proximité de la ville de Montréal, la rivière Châteauguay rejette son eau dans le lac Saint-Louis. Cette rivière est dominée par l'agriculture couvrant plus de la moitié du territoire du bassin versant (Audet et al., 2015). Au courant de l'année 2017, la concentration en *E. coli* a dépassé la norme provinciale d'activité nautique en période estivale, c'est-à-dire entre juin et août inclusivement ainsi qu'en novembre. De plus, en février et en mai, la concentration a dépassé la norme provinciale de baignade. Les concentrations mesurées en période estivale sont plus importantes en aval, près d'une zone urbaine. La figure 3.1 démontre que la rivière Châteauguay est parmi les rivières ayant le plus d'échantillons de qualité très mauvaise.

La rive nord du lac Saint-Pierre subit la pression de trois grandes rivières fortement agricoles près de leurs rives ainsi que leurs embouchures. La rivière Maskinongé est dominée par les forêts, cependant à proximité des rives de la rivière et près du fleuve, c'est l'agriculture qui est dominante (Agir Maskinongé, 2019). En 2017, la concentration en *E. coli* a été mesurée à des niveaux plus élevés que les normes provinciales pour la baignade, à trois reprises, en avril, en juillet et en octobre, comme qu'illustrés à la figure 3.1. Contrairement à la rivière Châteauguay, il ne semble pas avoir un effet saisonnier sur cette rivière puisque les dépassements se font lors de trois saisons distinctes. La seconde rivière sur la rive nord du lac Saint-Pierre est la rivière du Loup. La station de qualité de l'eau en aval de la rivière du Loup a mesuré des concentrations supérieures à la norme provinciale de baignade sur neuf des onze échantillons. De plus, quatre des neuf échantillons avaient une concentration supérieure à 1000 UFC/100 mL soit la norme provinciale d'activité nautique; il s'agit d'échantillons prélevés en juin, septembre, octobre et novembre. À

la figure 3.1, la rivière du Loup est la rivière ayant la plus grande concentration en *E. coli*. En effet, près de 80 % des échantillons sont de catégorie mauvaise et très mauvaise, dépassant les normes provinciales déconseillant la baignade et les activités nautiques. Il est possible que les territoires agricoles de la rivière du Loup expliquent ces résultats. Puis, la station de la rivière Yamachiche a mesuré six fois sur les onze échantillons des concentrations supérieures à 200 UFC/100 mL soit la norme provinciale de baignade. Seul un échantillon excède la norme provinciale d'activité nautique, il s'agit de l'échantillon du mois d'août. Les mois où la concentration en *E. coli* est la plus élevée représentent la période automnale lorsque le sol est à nu et susceptible à l'érosion, après les récoltes (Miller et al., 2011).

Sur la rive sud du lac Saint-Pierre, il y a les rivières Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet. Chacune d'entre elles occupe un bassin versant de taille et d'occupation différentes. La rivière Richelieu est dominée par l'agriculture à plus du 2/3 de la superficie du bassin versant (COVABAR, s. d.). En 2017, la concentration en *E. coli* est supérieure à la norme provinciale pour la baignade pour cinq des douze échantillons. Il s'agit des mois de janvier, avril, mai, juin et novembre, où le dépassement le plus important est en mai, en période de crue. Il est possible que la crue printanière ait charrié des sédiments issus des territoires agricoles chargés en coliforme fécal, et plus précisément en *E. coli* (Lyautey et al., 2010). La rivière Yamaska est dominée par l'agriculture principalement en aval du bassin versant (OBV YAMASKA). En 2017, les données recueillies par le réseau-rivières indiquent que trois des neuf mois échantillonnés ont une valeur supérieure à 200 UFC/100 mL soit la norme provinciale de baignade. Deux de ces trois valeurs dépassent même la norme provinciale d'activité nautique, soit en novembre et décembre. De surcroît, seulement 40 % des échantillons de la rivière Yamaska ont une qualité bactériologique permettant la baignade selon les normes provinciales, tel qu'illustré à la figure 3.1. La rivière Saint-François quant à elle est dominée par l'écosystème forestier. Le bassin versant de cette rivière est reconnu comme la région produisant la plus grande production bovine de la région (COGESAF, 2006). En 2017, les échantillons mensuels indiquent que cinq des onze données sont supérieures à la norme provinciale de baignade. Parmi ces données, deux excèdent également la norme d'activité nautique, soit en avril et novembre. Il s'agit de deux périodes où les sols agricoles sont susceptibles d'être à nu et où les précipitations sont abondantes favorisant l'érosion des sols (Miller et al., 2011). Le bassin versant de la rivière Nicolet est dominé par les écosystèmes forestiers et agricoles. L'agriculture est concentrée en aval du bassin versant soit près du lac Saint-Pierre (COPERNIC, 2015). Les échantillons du réseau-rivières de 2017 indiquent qu'un mois sur 2 la concentration en *E. coli* est supérieure à la norme provinciale pour la baignade. Seul l'échantillon du mois de novembre a une concentration supérieure à la norme provinciale pour les activités nautiques. Il est possible que l'érosion des sols agricoles à nu près en aval du bassin versant favorise le transport de bactérie *E. coli* (Miller et al., 2011). La rivière Bécancour est la dernière rivière de la rive sud ayant été étudiée dans le cadre de cet essai. En 2017, les données recueillies en aval de cette rivière démontrent que la concentration en *E. coli* reste inférieure aux normes de baignade, lors de tous les échantillons mensuels. Dans la figure 3.1, la rivière Bécancour est parmi les rivières les moins polluées en *E. coli* ayant des échantillons de catégorie excellente à médiocre.

Le bassin versant de la rivière Saint-Maurice est couvert à près de 70 % par l'écosystème forestier (BVSM, 2014). En 2017, seul l'échantillon d'avril a une concentration supérieure à la norme provinciale de baignade à l'embouchure de cette rivière. Cette période coïncide avec une période de crue exceptionnelle, il est possible que les usines d'épuration aient dû effectuer des surverses d'eau sans l'avoir préalablement traité (Lebeuf, 2017, 13 mai). En la comparant avec les autres rivières, l'eau de la rivière Saint-Maurice est de bonne qualité. Le bassin versant de la rivière Batiscan est également dominé par l'écosystème forestier (SAMBBA, 2015). La figure 3.1 illustre que la concentration d'*E. coli* n'a jamais excédé la norme provinciale de baignade, lors de l'échantillonnage mensuel du réseau-rivières. Le couvert forestier couvre près de 80 % du bassin versant de la rivière Sainte-Anne (CAPSA, 2014). La figure 3.1 démontre que la concentration en *E. coli* mesuré a été supérieure à la norme provinciale de baignade. Il s'agit du seul mois de cette année ayant une valeur supérieure à la norme de 200 UFC/100 mL.

Bref, chacun des bassins versants décrits modifie la masse d'eau du Saint-Laurent à des périodes différentes et de manière unique. En effet, certaines rivières transportent une grande quantité d'eau telles que la rivière des Outaouais et la rivière Saint-Maurice. Alors que d'autres rivières amènent vers le fleuve Saint-Laurent de grande concentration de bactéries *E. coli*. C'est notamment le cas pour les rivières Châteauguay et du Loup qui ont le plus grand nombre de dépassements de la norme provinciale pour les activités nautiques, classé comme très mauvais. Les valeurs en brun indiquant une très mauvaise qualité ont été observées au moins une fois sur sept des quinze rivières présentées dans ce chapitre. Ces rivières sont à surveiller, car elles peuvent altérer la qualité du fleuve si la concentration est assez forte et sur une longue période. Les valeurs en rouges signifient un dépassement de la norme provinciale de baignade, l'eau est donc de mauvaise qualité. Parmi les 15 rivières à l'étude, 12 d'entre elles ont au moins un échantillon dans cette catégorie. Pour plusieurs rivières, les dépassements des normes provinciales sont fréquents pouvant être observés dans près de la moitié des échantillons. C'est notamment le cas de la rivière des Mille Iles, de la rivière Châteauguay, de la rivière du Loup (en Mauricie) et de la rivière Yamachiche. Plusieurs de ces rivières ont également des échantillons de très mauvaise qualité. Il s'agit de sept rivières ayant toutes des dépassements des normes provinciales de baignades ainsi que d'activités nautiques. Ces zones de dépassements fréquents sont à surveiller de même que les secteurs ayant des échantillons dans la catégorie très mauvaise.

3.1.2 Effets des tributaires sur les masses d'eau fluviales

L'influence des tributaires sur le fleuve Saint-Laurent varie selon le débit de ceux-ci. De plus, l'apport en bactéries *E. coli* dans le fleuve par les rivières varie en fonction de l'occupation du territoire dans leur bassin versant. Il est donc utile de connaître les activités du bassin versant afin de pouvoir cibler l'origine et les périodes de relargage des bactéries telles que l'*E. coli*. La distribution des masses d'eau est illustrée à la figure 3.2 indiquant également les principales rivières de la zone d'étude. Les trois masses d'eau du fleuve Saint-Laurent sont décrites à la section 1.4 de cet essai.

L'eau provenant de la rivière des Outaouais alimente la masse d'eau du nord du fleuve. Cette masse d'eau fluviale est également alimentée par les autres tributaires de la rive nord du Saint-Laurent qui se mélangent facilement avec cette masse d'eau (La Violette, 2004). D'abord, la rivière des Mille-Iles, des Prairies ainsi que de l'Assomption alimentent la masse d'eau brune et contribuent à empêcher l'eau issue de la station d'épuration de Montréal à se rendre sur la rive nord (Ville de Montréal, 2019). Au fur et à mesure que la masse d'eau croise des tributaires, elle est alimentée par ceux-ci. L'eau de ces tributaires reste tout de même près des rives jusqu'à l'embouchure d'une seconde rivière. À la hauteur du lac Saint-Pierre, les rivières Maskinongé, du Loup et Yamachiche apportent une grande quantité de nutriment dans les secteurs moins profonds de la rive nord (de La Chenelière, Brodeur, et Mingelbier, 2014). À cet endroit du fleuve, les eaux près de la rive ont des caractéristiques semblables à ces rivières indiquant leur importance dans cet écosystème. La masse d'eau présente au nord de ce lac fluvial provient à 20 % de la rivière des Outaouais, les rivières Assomption, Maskinongé, du Loup et Yamachiche fournit la majeure partie restante du volume. Bien que les bassins versants des tributaires de la rive nord du lac Saint-Pierre soient majoritairement forestiers, les secteurs agricoles sont principalement près des rives fluviales causant une pression anthropique importante sur ce secteur du fleuve Saint-Laurent (MDDEFP, 2013b). En aval du lac Saint-Pierre, trois autres tributaires de la rive nord apportent une certaine quantité d'eau à la masse d'eau brune. D'abord, l'eau de la rivière Saint-Maurice contribue à 6 % de l'apport en eau dans le fleuve, en temps normal, et peut atteindre 15 % lors des crues printanières (BVSM, 2014). Les rivières Batiscan et Sainte-Anne longent également la rive nord restant dans les secteurs les moins profonds comme les masses d'eau de la plupart des tributaires. Le secteur de l'embouchure de la rivière Batiscan est recouvert à 16 % de milieux humides où l'eau réside un certain temps avant de se rendre dans les masses d'eau fluviales (SAMBBA, 2015).

Pour ce qui est des différentes rivières de la rive sud, elles ont également tendance à suivre la rive à proximité de leurs embouchures. La rivière Châteauguay se jette dans le fleuve à la hauteur du lac Saint-Louis. À cet endroit du fleuve, il y a eu plusieurs modifications hydrologiques du fleuve Saint-Laurent tel que les canaux de Beauharnois et Saint-Louis (Audet et al., 2015). L'eau provenant de cette rivière reste séquestrée sur les rives du lac Saint-Louis, sans toutefois se mélanger complètement avec la masse d'eau verte provenant des Grands Lacs. Cette masse d'eau ne possède pas les mêmes caractéristiques que les tributaires de la rive sud. Ce n'est que dans le lac Saint-Pierre qu'il y a un certain mélange entre les eaux vertes et les eaux des différents tributaires de la rive sud, comme illustré à la figure 3.2 (Ville de Montréal, 2019). La rive sud du lac Saint-Pierre est majoritairement formée par les grands tributaires tels que la rivière Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet selon l'ordre d'importance (MDDEFP, 2013b). La masse d'eau verte provenant des Grands Lacs est davantage au centre du fleuve, mais frôle tout de même la berge de la rive sud dans le secteur de Contrecoeur (Ville de Montréal, 2019). Les caractéristiques de l'eau au niveau de la rive sud du lac Saint-Pierre sont similaires à celles des tributaires, puisque ces tributaires ont une grande occupation agricole à proximité du fleuve Saint-Laurent. La concentration en *E. coli* varie d'un tributaire à l'autre, alors que la plupart des tributaires ont des dépassements des normes provinciales

de baignades ou d'activités nautiques au printemps ou en automne. Ces tributaires sont donc à suivre afin de pouvoir mesurer la qualité de l'eau près des rives du lac Saint-Pierre. Comparable à l'eau de la rivière Châteauguay, les masses d'eau des tributaires se jetant dans le lac Saint-Pierre semblent restées coincées au niveau de la rive sud du lac et seule une faible quantité d'eau suit le cours du fleuve entre la rive sud et la masse d'eau provenant des Grands Lacs. Puis en aval du lac Saint-Pierre, la rivière Bécancour est la dernière rivière de la rive sud ayant été analysée dans le cadre de cet essai. À l'embouchure de cette rivière, la masse d'eau semble également suivre le flot laminaire fluvial la forçant à suivre la rive sud du Saint-Laurent.

L'eau provenant de l'ensemble des tributaires suit les rives du fleuve d'où elles proviennent. La qualité de l'eau riveraine du fleuve dépend donc en partie de celles des différentes rivières. Le bassin versant de chacune des rivières analysées est différent que ce soit par la taille, par l'occupation du territoire ainsi que par le débit de l'eau des rivières. Certaines rivières influencent davantage la qualité de l'eau fluviale au niveau des rives, car leur débit est important. Sur la rive nord, c'est le cas pour la rivière des Outaouais et la rivière Saint-Maurice. Alors que la rive sud, c'est la rivière Richelieu qui a un débit plus important (Marsh, 2015). Les rives du fleuve sont propices à plusieurs activités telles que la baignade lorsqu'il y a des plages. La mauvaise qualité de l'eau issue des tributaires peut empêcher le développement de plage, car la norme provinciale pour la baignade de 200 UFC/100 mL doit être respectée (MELCC., 2019).

De plus, les activités nautiques ne sont plus permises, à certains moments et endroits, car la concentration en coliforme fécal dépasse 1000 UFC/100 mL. Bien que les activités nautiques puissent se faire sur l'ensemble du fleuve, il y a tout de même certaines embarcations qui restent près des rives. Les activités de navigations ainsi que la pêche sont alors déconseillées afin de limiter l'exposition des gens à ces bactéries potentiellement pathogènes (MELCC, s. d.b).

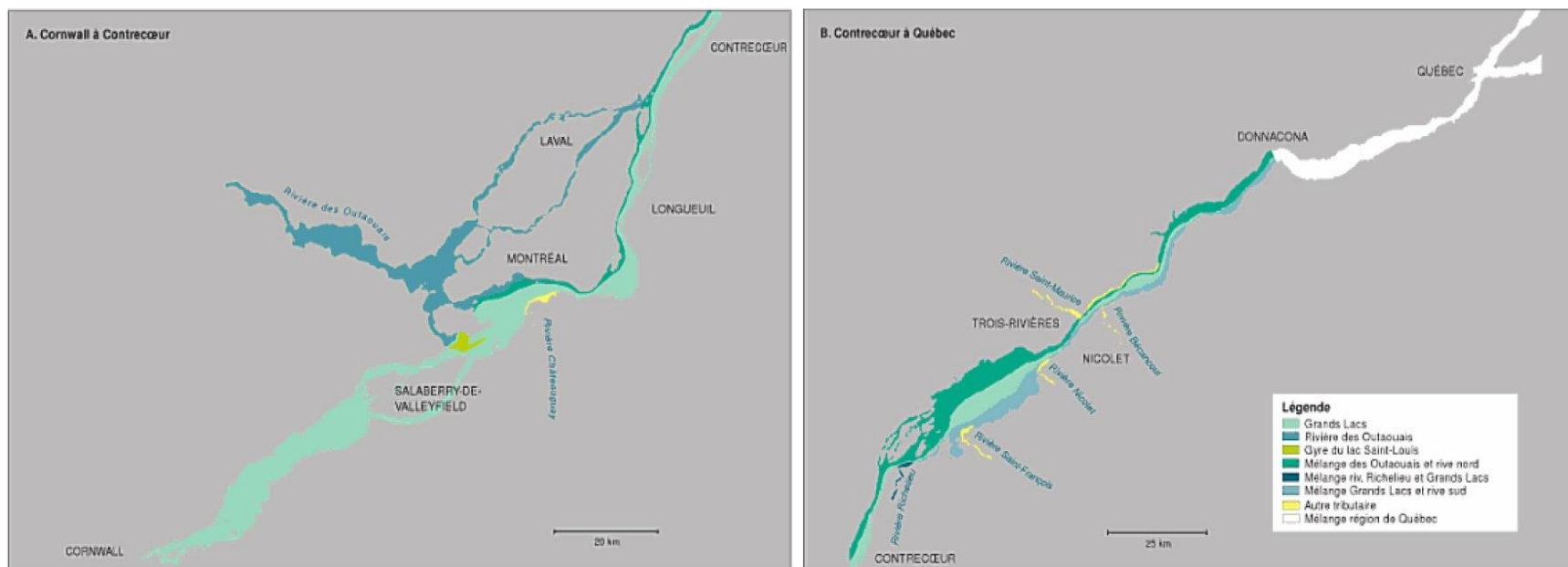


Figure 3.2 Carte de distribution des masses d'eau dans la zone d'étude. A. Secteur de Cornwall à Contrecoeur B. Secteur de Contrecoeur à Québec (tiré de Ville de Montréal, 2019).

3.2 Facteurs territoriaux et météorologiques influençant les *E. coli*

L'utilisation du territoire, notamment dans les bassins versants des rivières présentes dans la zone d'étude, peut expliquer en partie l'apport en *E. coli* provenant d'un tributaire. En effet, certaines activités anthropiques altèrent la qualité de l'eau introduisant dans le milieu hydrique des coliformes fécaux, tels que des *E. coli*. Les facteurs météorologiques ont également un impact sur la concentration en *E. coli* présents dans les cours d'eau.

3.2.1 Facteurs territoriaux influençant les tributaires

Afin de pouvoir déterminer si les activités humaines sur un territoire influencent la concentration en *E. coli*, une série d'analyses a été entreprise. L'analyse de composantes principales (ACP) ainsi que l'analyse PLS (partial least square) permettent de déterminer les corrélations existantes entre variables ou encore de prédire certaines variables d'intérêt (ex. concentration en *E. coli*) à l'aide de variables environnementales. La PLS permet de cibler une variable en particulier afin de comprendre l'interaction avec les autres (James, Witten, Hastie, et Tibshirani, 2013). Cependant, ces deux analyses n'ont pas été retenues, car la variable *E. coli* était très peu corrélée avec les variables territoriales. Ensuite, une seconde série de quatre PLS a été produite, chacune d'entre elles représente les saisons de l'année 2017. Encore une fois, ces analyses ne sont pas concluantes, bien qu'il y ait une faible corrélation entre l'*E. coli* et le territoire agricole au printemps et en automne. Il se peut que cette corrélation soit due aux périodes d'épandage de lisier et de fumier ainsi qu'à l'augmentation de la superficie de sol à nu susceptible d'être lessivé et transporté en milieu hydrique. Bien que cette tendance soit possible, elle n'est pas significative, car la corrélation n'explique qu'au maximum 3 % de la variation en *E. coli*.

Une série de PLS saisonnière a été produite avec les variables territoriales, les variables météorologiques, ainsi que les données physicochimiques de l'eau. Cette analyse est plus concluante que les précédentes, notamment pour les périodes hivernales et estivales où les corrélations sont expliquées à 27 % et 13 % respectivement. Bien que ces valeurs soient faibles et non significatives, il est tout de même possible d'établir des corrélations entre la concentration en *E. coli* et les autres variables étudiées dans le cadre de cette analyse. La figure 3.3 illustre les résultats de l'analyse PLS, la ligne orange représente la concentration en *E. coli* alors que les lignes bleues sont les autres variables utilisées dans le cadre de cette analyse. Les vecteurs sont présentés par un mot, une abréviation ou des lettres. D'abord, les variables de l'occupation du territoire sont représentées par un mot, ainsi le mot *forêt* correspond à l'écosystème forestier, *agricole* représente les zones agricoles, le mot *urbain* est associé aux zones urbaines des bassins versants et le mot *hydrique* correspond aux milieux hydriques. Pour ce qui est des variables physicochimiques l'abréviation *Cond* représente la conductivité de l'eau, la température de l'eau est traduite par la lettre *t* et le *pH* représente le potentiel hydrogène aussi appelé pH. Puis, les variables météorologiques sont présentées à l'aide de lettres: *M* correspond à la température enregistrée, *P* signifie quant à elle la quantité de précipitations alors que les lettres *V* et *J* représentent la veille et le jour de l'échantillonnage

respectivement. La longueur des vecteurs démontre l'influence de ses variables par rapport aux dimensions de la PLS, les vecteurs dans le même sens sont corrélés de façon positive. La figure ci-dessus représente les PLS des variables en période hivernale et estivale. La figure 3.3 A, illustrant les données hivernales, démontre une relation entre la concentration en *E. coli* et la température de l'eau représentée par *t* sur la figure. Il n'y a pas d'autre tendance aussi marquée avec la bactérie *E. coli*, lors de cette saison. Pour ce qui est de la figure 3.3 B., le vecteur de la bactérie *E. coli* est plus court qu'à l'image en A., signifiant que la variable de la concentration en *E. coli* est moins bien expliquée par les axes présentant les données en été qu'en hiver. L'aspect le plus notable de ce graphique est le fait que le vecteur de l'*E. coli*, en orange, suit une direction semblable au vecteur de l'occupation du territoire agricole. De plus, le vecteur de l'occupation urbaine est inversement corrélé à celui de la bactérie *E. coli*. Il y a un second vecteur complètement à l'opposé du vecteur de la bactérie *E. coli*, il s'agit du vecteur de l'occupation hydrique sur le territoire, signifiant que plus il y a de cours d'eau et moins la concentration en *E. coli* est importante. Contrairement à ce qui a été observé dans le texte de Miller et ses collaborateurs (2011), la bactérie *E. coli* est directement corrélée par l'occupation agricole et inversement par l'occupation urbaine. Bien que ces graphiques illustrent des tendances, celle-ci n'est pas révélatrice, car les corrélations des analyses sont moins de 50 %.

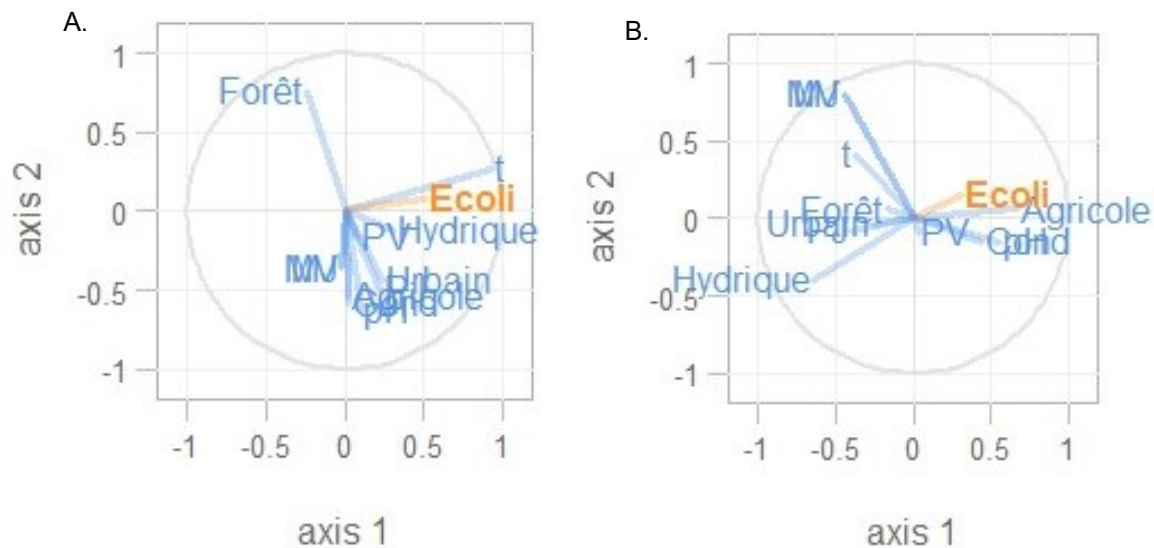


Figure 3.3 PLS saisonnière des variables territoriales, physicochimiques et météorologiques étudiées tentant de prédire la concentration en *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent
A. Hiver B. Été (Données tirées du MELCC s. d.a)

Les résultats obtenus à la figure 3.3 illustrent que la concentration en *E. coli* est influencée par la température de l'eau en hiver. Ce résultat est cohérent, car en période hivernale la température de l'eau s'approche généralement du point de congélation, alors que la température optimale pour la bactérie *E. coli* est de 37 °C soit la température corporelle moyenne d'un mammifère. La température de l'eau est donc un élément limitant dans la prolifération et la survie de la bactérie *E. coli* en milieu hydrique pendant la période

hivernale. Cette conclusion est la même que celle présentée par Stanford et ces collaborateurs en 2016. Pour ce qui est de la figure en B., les résultats obtenus ne correspondent pas aux résultats attendus. La concentration en *E. coli* lors que la période estivale est influencée par l'occupation agricole dans les bassins versants des rivières. Bien que l'agriculture soit une source d'*E. coli* par le bétail et l'épandage de lisier et fumier, il est surprenant que ce soit ce type d'occupation du territoire qui est lié à la bactérie. L'agriculture occupe une place importante dans les bassins versants étudiés, alors que les secteurs urbains représentent moins de 10 % du territoire des bassins versants, à l'exception de la rivière des Mille-Iles où les zones urbaines occupent 20 % du bassin versant. Il est donc possible que l'impact des territoires urbains soit sous-évalué dans le cadre de cette analyse. De plus, la période d'été estivale peut également concentrer la quantité de bactéries dans les cours d'eau. Ainsi, lors de précipitation, la bactérie *E. coli* est lessivée des sols agricoles et persiste dans les cours d'eau (Tornevi et al., 2014).

3.2.2 Facteurs météorologiques sur l'ensemble du territoire

De plus, les conditions météorologiques peuvent avoir un impact sur la présence de bactérie *E. coli* à travers le fleuve. La quantité de précipitation obtenue ainsi que la température ambiante sont des éléments pouvant favoriser l'apport ainsi que la survie des *E. coli* en milieux hydriques. En effectuant des analyses de composantes principales (ACP), il est possible d'observer la tendance des données selon les composantes analysées. De plus, les ellipses illustrent les données saisonnières présentées sur les graphiques par la première lettre du mot. Les axes représentent les dimensions expliquant la variation des composantes et le pourcentage signifie l'importance de celle-ci permettant d'expliquer la variation des données.

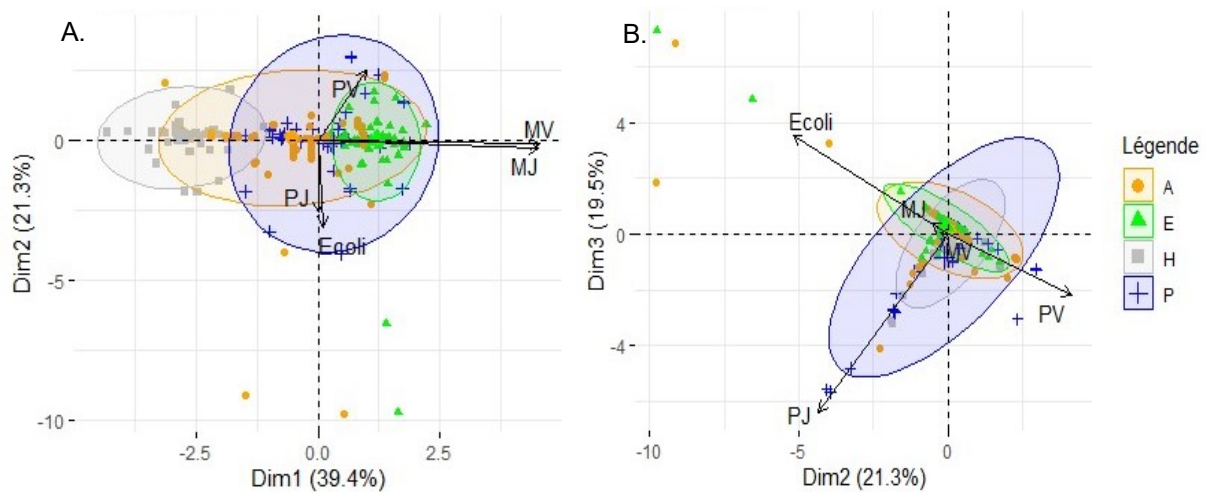


Figure 3.4 ACP illustrant les composantes météorologiques sur l'ensemble des données A. représentant les composantes 1 et 2 du modèle B. représentant les composantes 2 et 3 du modèle (Données tirées du MELCC s. d.a, UQTR sous presse, zone d'intervention prioritaire les Deux Rives sous presse)

En observant la figure 3.4 A., il y a une forte relation entre la concentration en *E. coli* et la quantité de précipitation obtenue la journée de l'échantillonnage. L'ellipse verte illustrant la variation estivale est décalée du centre, car l'axe de composante est influencé par la température ambiante. Pendant cette saison, il y a donc une variation des *E. coli* en fonction de la quantité de précipitation. La figure 3.4 B. montre que le vecteur de la bactérie *E. coli* est très long, signifiant qu'une grande partie de la variation des données est expliquée par les dimensions 2 et 3. De plus, la température ambiante de la journée, représentée par *MJ* sur le graphique, pointe dans le même sens que la bactérie *E. coli*. Bien que la taille de ce vecteur *MJ* soit petite et explique peu la distribution en *E. coli*, il y a tout de même une corrélation positive entre ses deux composantes. Il est également possible d'observer des données hors des ellipses dans le sens du vecteur *E. coli*, il s'agit de données estivales et automnales. Une seconde corrélation peut être observée entre le vecteur *E. coli* et le vecteur *PV* représentant la quantité de précipitation de la veille de l'échantillonnage de la bactérie. Il s'agit d'une corrélation négative, lorsqu'il y a une grande quantité de précipitation la veille de l'échantillonnage, la concentration en *E. coli* dans l'eau est moins importante. Cette corrélation correspond à l'inverse de ce qui est observé en A avec la quantité de précipitation de la journée de l'échantillonnage. Il est possible que la quantité de précipitation, obtenue la veille de l'échantillonnage, agisse comme diluant dans l'eau déplaçant rapidement la bactérie *E. coli* et réduisant sa concentration. Les trois dimensions présentées dans cette analyse expliquent 80 % de la variation des données, prouvant que cette analyse offre des résultats fiables pouvant être prédictibles.

3.3 Influence de la saisonnalité dans les dynamiques de l'*E. coli*

En plus de la relation entre la concentration en *E. coli* et le débit des différents tributaires, les effets saisonniers influencent également l'abondance de cette bactérie. Afin d'avoir un nombre similaire de données selon les saisons, seules les données du réseau-rivières ainsi que du réseau-fleuve sont utilisées. Il s'agit de données mensuelles recueillies au cours de l'année 2017, près de l'embouchure des tributaires et directement sur le fleuve Saint-Laurent. De plus, ces deux jeux de données ont un maximum de détection à 6000 UFC/100 mL. Afin de pouvoir visionner la variation en *E. coli* selon les secteurs, la série de figures dans ce sous-chapitre illustre d'abord l'ensemble des données alors que *B C* et *D* représentent respectivement Montréal et les environs, le secteur du lac Saint-Pierre rive nord et rive sud.

Afin de mieux comprendre cette variation annuelle, chaque saison est analysée mensuellement afin de noter les périodes critiques où la concentration en *E. coli* est au maximum. En ciblant ces périodes et les secteurs où la concentration bactérienne étudiée dépasse les normes provinciales de baignades ainsi que d'activités nautiques, il est possible d'émettre des hypothèses expliquant ces concentrations élevées.

3.3.1 Période hivernale

La saison hivernale est une période où les conditions environnementales sont particulièrement défavorables pour la prolifération bactérienne telle que l'*E. coli*. Cependant, la quantité d'*E. coli* peut tout de même excéder la norme provinciale de baignade de 200 UFC/100 mL. Bien que le fleuve Saint-Laurent et plusieurs

rièrres ne soient pas complètement couverts par une couche de glace, les rives fluviales ainsi que les petites rivières sont couvertes de glace, protégeant les bactéries *E. coli* des rayons UV (Whitman, Przybyla-Kelly, Shively, Nevers, et Byappanahalli, 2007). Selon van Elsas et ses collaborateurs (2011), cette saison est la période de l'année où la concentration en *E. coli* est la moins importante, il est donc possible que les valeurs extrêmes ne soient qu'un cas isolé sans toutefois présenter une tendance. La température de l'eau à cette période de l'année est très froide variant de 0 à 4 °C (MELCC, s. d.a). En eaux froides, la survie des bactéries *E. coli* est réduite, puisqu'il s'agit d'une bactérie habituée à vivre dans les intestins d'animaux à sang chaud (Balière, 2017; van Elsas et al., 2011).

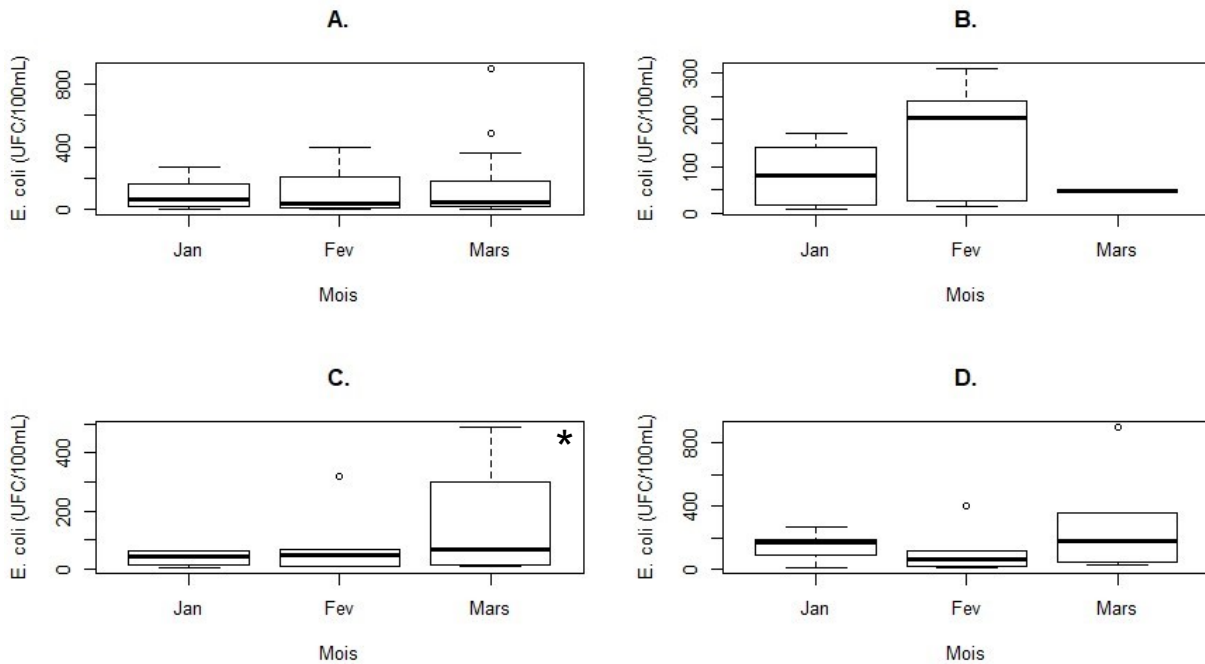


Figure 3.5 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* pendant la période hivernale 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud (Données tirées du MELCC s. d.a)

La figure 3.5 illustre la variation hivernale mensuelle en *E. coli* sur l'ensemble du territoire ainsi que selon leur emplacement géographique. Ces graphiques illustrent qu'il y a très peu de données aberrantes. La moyenne saisonnière est de 163 UFC/100 mL, considérée comme médiocre par le gouvernement provincial (MELCC, s. d.b). La moyenne est donc en dessous de la norme provinciale interdisant la baignade. Dans le secteur de Montréal, la valeur maximale est de 310 UFC/100 mL, mesurée au mois de février. La médiane mensuelle de ce mois est de 200 UFC/100mL soit la norme provinciale pour la baignade. La rive nord du lac Saint-Pierre atteint son maximum hivernal en mars d'une valeur de 490 UFC/100 mL. La situation est similaire sur la rive sud où le maximum hivernal est observé montant jusqu'à 900 UFC/100 mL. De plus, dans la rive nord du lac Saint-Pierre, la différence entre les moyennes est significative, c'est

pourquoi il y a une étoile dans le coin supérieur de ce graphique. Cette différence significative est causée par les données du mois de mars où la boîte est nettement plus grande que les mois de janvier et février indiquant que les données du dernier mois hivernal possèdent une grande variance. Ce mois détient des caractéristiques hivernales telles que la présence d'un couvert glaciaire protégeant des rayons UV. De plus, le mois de mars est également caractérisé par des variables météorologiques printanières telles que la température plus clémente. Ces caractéristiques hivernales et printanières peuvent ensemble favoriser la présence d'*E. coli* en milieu fluvial (Tornevi et al., 2014).

3.3.2 Période printanière

En 2017, le printemps a été marqué par une crue exceptionnelle causant de nombreuses inondations à proximité des cours d'eau. En effet, il s'agit de la pire période d'inondation importante ou extrême dans 90 municipalités, au cours des 30 dernières années. Dans la zone d'étude, les endroits principalement touchés sont sur la rive nord du lac Saint-Pierre ainsi qu'à proximité de Montréal. La rivière du Loup en Mauricie a notamment connu des inondations particulièrement importantes, de même que la rivière L'Assomption près de Repentigny (Lebeuf, 2017, 13 mai).

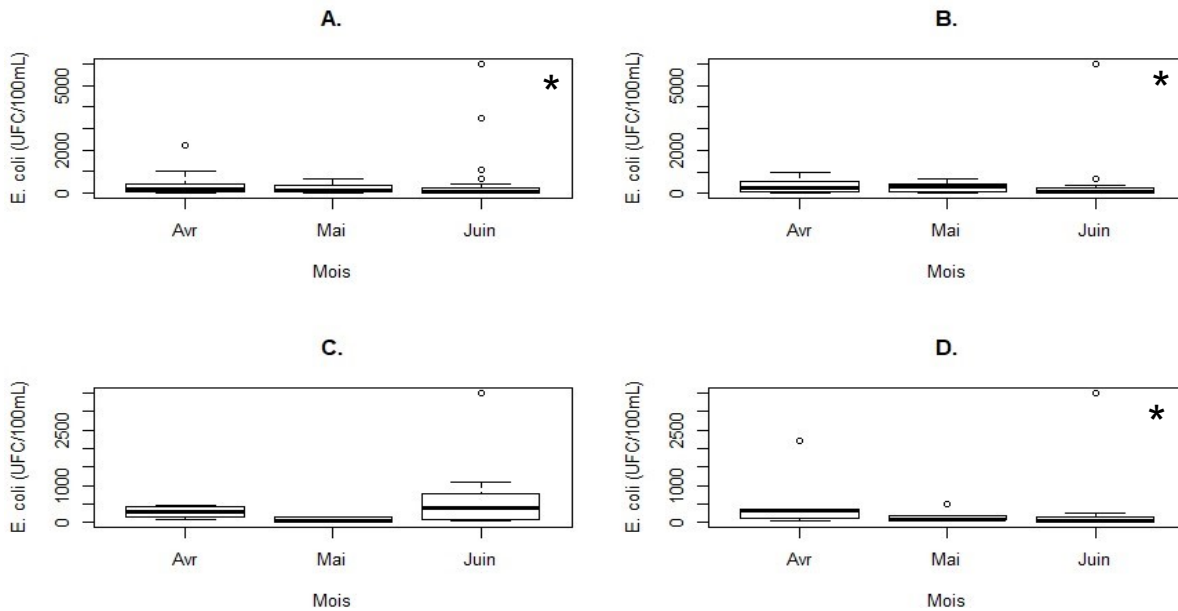


Figure 3.6 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* pendant la période printanière 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud (Données tirées du MELCC s. d.a)

Les inondations printanières peuvent créer un effet de dilution réduisant ainsi la quantité d'*E. coli* dans les cours d'eau. Il est également possible que ces inondations érodent les sols transportant une grande quantité de matière organique et bactérienne (Campos et al., 2013). Les inondations augmentent le débit de l'eau

remettant en suspension la matière organique et les bactéries en dormance dans les sédiments (Passerat et al., 2011).

Les données printanières de 2017 sont illustrées à la figure 3.6 où la concentration en *E. coli* légèrement plus importante et les points hors des boîtes du diagramme sont également plus nombreux qu'en hiver. Ces données peuvent être aberrantes, cependant dans ce cas-ci il est possible que ces données correspondent à des périodes de surverse des usines d'épuration des eaux usées. La majorité de ces données sont au mois de juin, alors que les données des autres mois sont majoritairement au-dessous de la norme provinciale d'activités nautiques de 1000 UFC/100 mL. La moyenne printanière est de 325 UFC/100mL dépassant la norme provinciale compromettant la baignade. Trois des quatre graphiques présentés à la figure 3.6 illustrent une différence significative entre les mois. Ces différences entre les mois sont causées par le nombre de valeurs hors des boîtes en juin. La valeur maximale printanière se situe à proximité de Montréal, en juin, atteignant 6000 UFC/100 mL, soit au minimum six fois la norme provinciale permettant les activités nautiques. Selon les historiques du climat, en juin, plusieurs endroits ont reçu une grande quantité de pluies pouvant augmenter la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau tout en ayant des températures plus chaudes que les derniers mois (ECCC, 2019). En effet, l'adoucissement des températures permet un meilleur taux de survie des bactéries *E. coli* en milieu hydrique. De plus, les possibles remises en suspension des bactéries ayant été en dormance dans les sédiments lorsque le milieu hydrique n'est pas favorable peuvent expliquer les données élevées de cette saison (Campos et al., 2013; Passerat et al., 2011).

3.3.3 Période estivale

Pendant l'été, le fleuve Saint-Laurent et ses tributaires sont utilisés à des fins récréatives tels que la baignade ainsi que les activités nautiques. C'est à cette période que les normes provinciales sont pertinentes, car c'est seulement l'été que ces activités sont pratiquées. En été, la température de l'eau favorise la survie de la bactérie *E. coli*, bien que l'exposition aux rayons UV est également à son maximum annuel (van Elsas et al., 201; Whitman et al., 2007). Malgré ce fort rayonnement, les bactéries *E. coli* peuvent s'en protéger par la turbidité de l'eau ou par la matière en suspension captant les rayons UV (Häder et al., 2015). Selon la documentation, c'est pendant la période estivale que la concentration en *E. coli* est la plus élevée (van Elsas et al., 201; Watad et al., 2017).

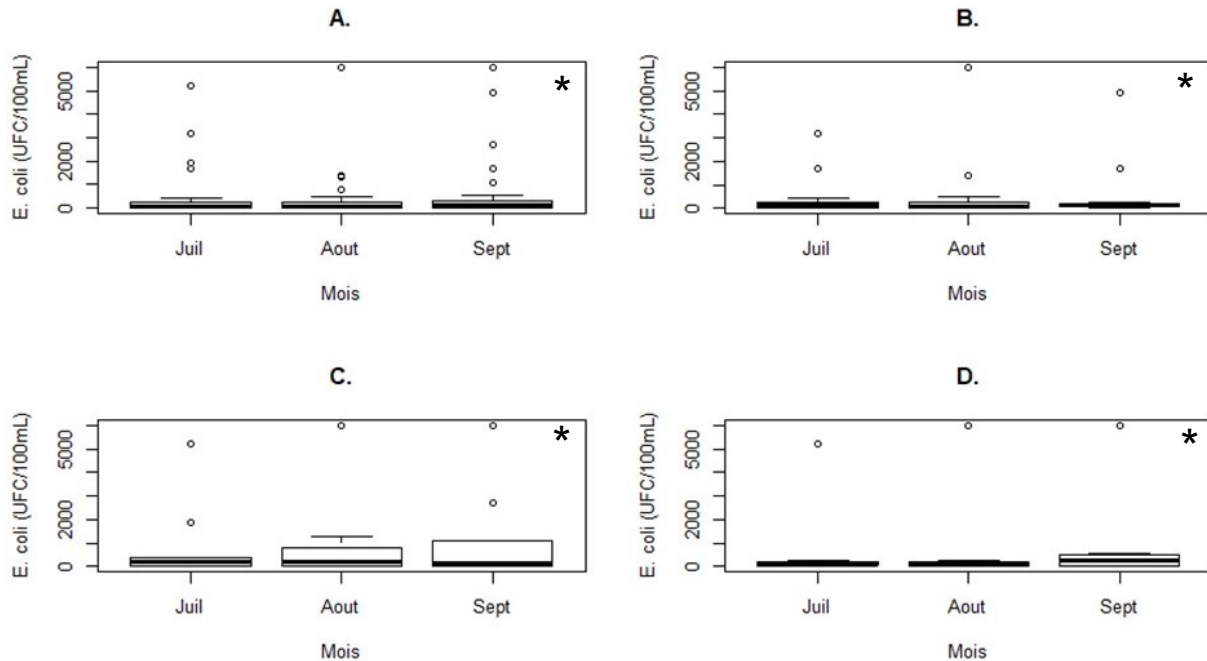


Figure 3.7 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* pendant la période estivale 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud (Données tirées du MELCC s. d.a)

Les échantillons recueillis pendant la période estivale de 2017 ont plusieurs données hors des boîtes de l'ordre de la limite de détection de 6000 UFC/100 mL pendant les mois d'août et septembre, pour l'ensemble des secteurs tels que présentés à la figure 3.7. Le navire le Lampsilis a également recueilli des échantillons lors de la période estivale, ces données n'ont pas de plafond à 6000 UFC/100 mL. La valeur maximale observée en juillet 2017 est de 296 000 UFC/100 mL au centre du fleuve à la hauteur de Repentigny. Il est donc possible que les points équivalents à 6000 UFC/100 mL soient significativement plus haut que cette valeur. La plupart de données hors des boîtes ont été échantillonnées au centre du fleuve, il est donc possible que ces stations soient affectées par l'usine d'épuration de la ville de Montréal où le panache suit de manière laminaire le centre du cours d'eau (Ville de Montréal, 2019). Certains secteurs sont constamment supérieurs aux différentes normes provinciales, alors que d'autres secteurs sont constamment sous la norme provinciale de baignade. Quant au mois de juillet, le maximum est également plus élevé que la norme provinciale d'activité nautique atteignant 5200 UFC/100 mL. La moyenne estivale est de 491 UFC/100 mL, supérieurs à la norme provinciale de baignade. Cette moyenne est également supérieure à la moyenne printanière. De plus, la variance entre les moyennes mensuelles est significative pour tous les secteurs à l'étude. En plus de la température clémente pour les bactéries et la réduction du débit, l'effet de dilution augmente ainsi la concentration en *E. coli*. Cependant, il est possible que certains épisodes de pluie puissent transporter une grande charge des polluants ou favoriser les épisodes de surverses des usines d'épuration de plusieurs villes et municipalités.

3.3.4 Période automnale

La dernière saison de l'année correspond à un refroidissement des températures ainsi qu'une période plutôt pluvieuse (Tornevi et al., 2014).

La fin des récoltes est une activité agricole typique de la saison automnale, causant la mise à nu de terre. En effet, plusieurs agriculteurs épandent leur lisier en automne selon des normes précises et préparées par un agronome (Robert, 2014). De plus, les périodes de pluie favorisent les épisodes de surverses des usines d'épuration de municipalités et de villes.

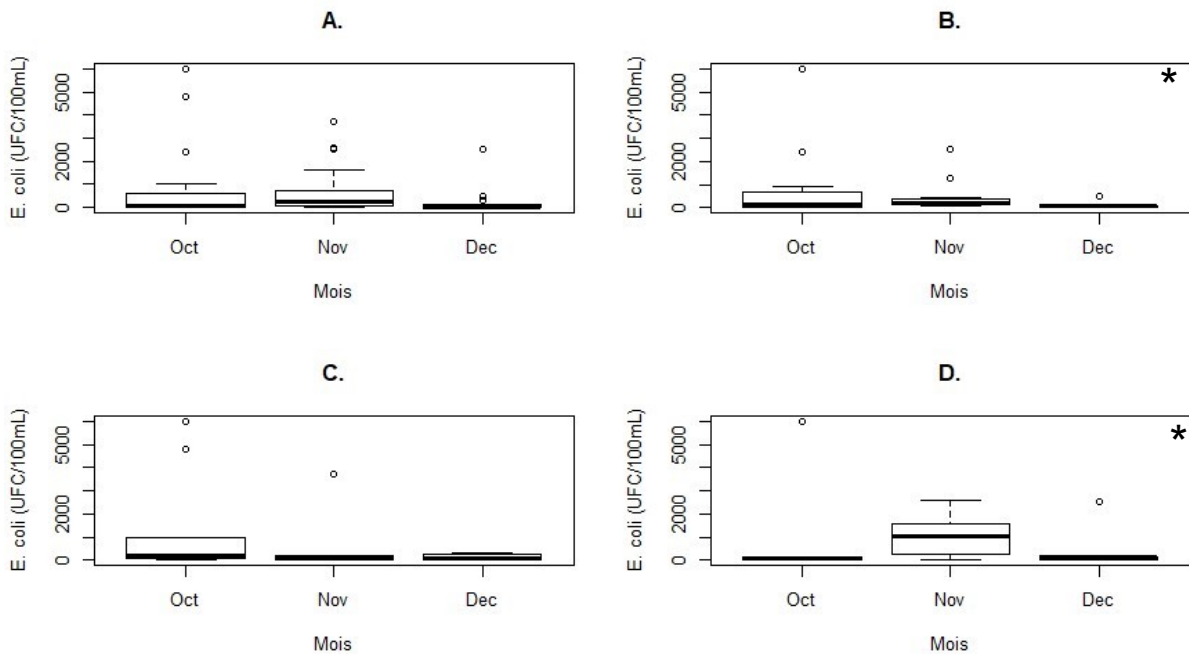


Figure 3.8 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* pendant la période automnale 2017 A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud (Données tirées du MELCC s. d.a)

L'automne 2017 est caractérisé par des températures clémentes, particulièrement au mois d'octobre où la température moyenne dans le secteur est de 13,1 °C avec un maximum de 25 °C (ECCC, 2019). Les données recueillies lors de ce premier mois illustrent la présence de plusieurs données aberrante telle qu'illustrée à la figure 3.8. De plus, les trois secteurs étudiés présentent des données ayant atteint le seuil de détection de 6000 UFC/100mL. Il s'agit de données présentes au centre du fleuve Saint-Laurent et suivant le panache de contamination de l'usine d'épuration de la ville de Montréal. Pour les deux mois suivants, la concentration en *E. coli* est moins importante. Il y a toutefois plusieurs données aberrantes dans les secteurs de Montréal ainsi que de la rive nord du lac Saint-Pierre. En novembre, dans le secteur de la rive sud du lac Saint-Pierre, la variance est plus grande, indiquant une médiane à 1000 UFC/100 mL. En

effet, trois des quatre rivières de la rive sud ont une concentration supérieure à la norme provinciale pour les activités nautiques formant une tendance marquée de dépassement dans ce secteur. Cette période coïncide à une période où les sols agricoles sont à nu. De plus, l'épandage automnal est courant dans cette région, car il y a une grande quantité d'animaux dans ce secteur. Tornevi et ses collaborateurs (2014) ont observé que la période estivale possède la plus grande concentration en *E. coli*. Cependant, les données présentées démontrent que l'automne est la période où la contamination en *E. coli* est la plus importante avec une concentration moyenne de 591 UFC/100 mL dans la zone du fleuve Saint-Laurent entre le lac Saint-François et Portneuf. Il est possible que cette valeur élevée d'*E. coli* en automne soit causée par une température élevée et des précipitations causant des épisodes de surverses par les centres urbains. Il est également possible que les coups d'eau automnales transportent du fumier et du lisier épandu en automne avant les premières neiges.

3.3.5 Données saisonnières sur l'ensemble de l'année 2017

Au fil de l'année 2017, plusieurs variations ont été observées entre les saisons, la figure 3,9 illustre ces variations entre les saisons sur l'ensemble du territoire ainsi qu'au niveau des secteurs précis présentés dans cette section.

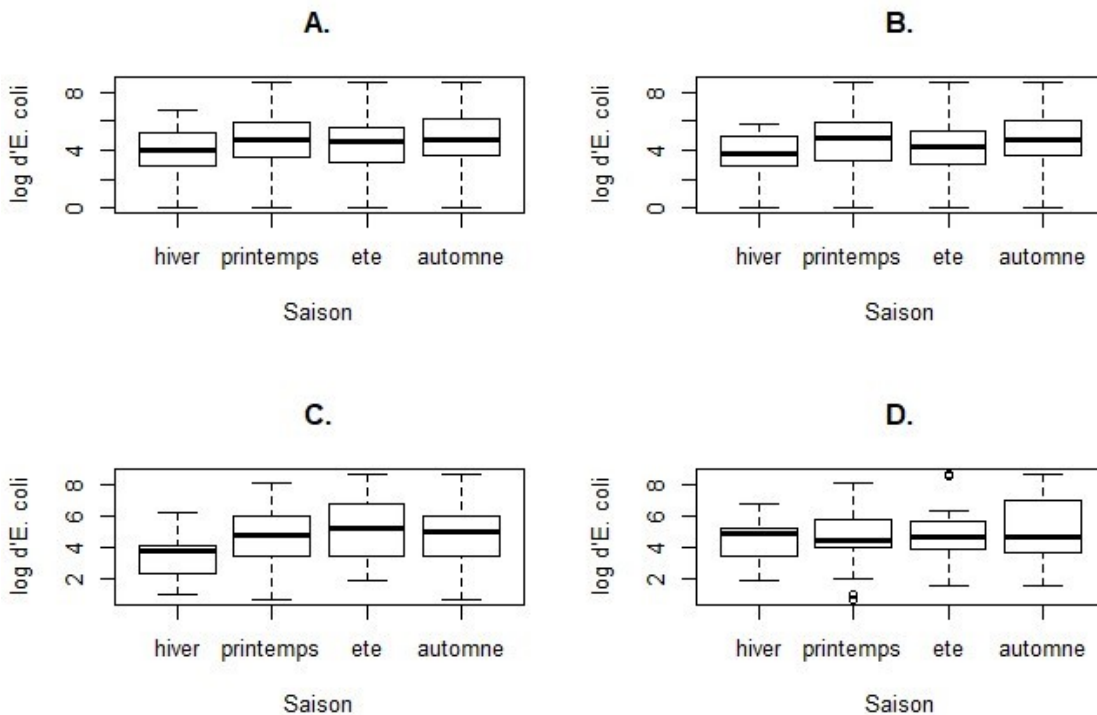


Figure 3.9 Diagrammes de la variation de la concentration en *E. coli* en fonction des saisons A. ensemble de la zone d'étude B. Montréal et ses environs C. Lac Saint-Pierre rive nord D. Lac Saint-Pierre rive sud (Données tirées du MELCC s. d.a)

La figure 3.9 illustre la variation saisonnière en *E. coli* sous forme de diagramme à moustache, les données sur l'axe des y ont été transformées à l'aide de la fonction log afin de mieux observer la variation des données. En période hivernale, la concentration en *E. coli* possède une moins grande variance et les maximums sont inférieurs aux autres saisons dans tous les graphiques. Au printemps, la variance est légèrement plus grande qu'en hiver. Le maximum printanier le plus élevé est dans la région de Montréal et atteinte 6000 UFC/100 mL soit le maximum de détection. Le nombre de données aberrantes indiquant des données anormales est moins nombreux qu'en été ou en automne. La variance de cette saison est plus grande sur la rive nord du lac Saint-Pierre indiquant que la plupart des valeurs se situent dans un intervalle approximatif de 0 et 1000 UFC/100 mL. En automne, une variance similaire est observée cette fois-ci dans le secteur de la rive sud du lac Saint-Pierre.

3.4 Retour sur les résultats

Au cours des deux derniers chapitres, plusieurs résultats ont été présentés concernant l'hydrologie du fleuve, de l'occupation du territoire ou des effets saisonniers.

Les cartes produites dans le cadre de cet essai ont démontré des sites où la pollution en bactérie *E. coli* est importante, c'est le cas en aval de l'usine d'épuration de la ville Montréal. Les concentrations en *E. coli* les plus élevées se situent toutes à proximité de l'exutoire de cette usine d'épuration des eaux usées. Les effets de cette usine sur la masse d'eau centrale du fleuve sont visibles jusqu'en aval du lac Saint-Pierre. De plus, les îles de Sorel ainsi que le lac Saint-Pierre présentent une résilience à l'*E. coli* réduisant la concentration de cette bactérie dans l'eau. Ces écosystèmes agissent comme étang d'aération et de biorétention naturel (MDDEFP, 2013b). De plus, il existe plusieurs aménagements et processus pouvant être utilisés par les usines de filtration afin de réduire le déversement de bactérie *E. coli* dans les milieux hydriques.

Pour ce qui est de l'occupation du territoire des rivières se jetant dans le tronçon fluvial, c'est l'occupation agricole qui influence le plus la concentration en *E. coli*. Les rivières fortement agricoles transportent une plus grande charge de bactéries que les rivières urbaines ou forestières. Cette constatation est contradictoire avec ce qui est observé avec l'île de Montréal et son usine d'épuration des eaux usées. Il est possible que les zones urbaines soient sous-évaluées ou que ce ne soit pas la superficie urbaine qui affecte la concentration en *E. coli*, mais plutôt la densité de population. En effet, Montréal est une ville très dense comparée à la plupart des autres villes du Québec (Institut de la Statistique du Québec, 2017). Afin de déterminer si les milieux urbains denses influencent la présence de la bactérie *E. coli* dans les cours d'eau, il est possible d'inclure ce facteur dans les prochaines analyses d'occupations du territoire.

La concentration en *E. coli* varie également selon les saisons et la météo. En hiver, la bactérie *E. coli* est plus faible que les autres saisons, car la présence de la bactérie est directement liée avec la température de l'eau. De plus, la quantité de pluie obtenue lors de la journée d'échantillonnage de la bactérie influence

directement la concentration en *E. coli*. Cette variable est donc synonyme d'épisode de surverse des usines de filtration des eaux usées ainsi que de lessivages des sols agricoles. Bien que la quantité de pluie ne puisse pas être contrôlée par l'humain, il est tout de même possible de réduire les effets des précipitations en installant des ouvrages de rétentions et en aménageant des bandes riveraines en milieux agricoles.

4. RECOMMANDATIONS

À la suite de l'analyse, plusieurs secteurs où la concentration en *E. coli* excède les normes provinciales de baignade et d'activités nautiques ont été présentés. Ces analyses permettent de cibler les secteurs et les moments problématiques afin de faire des recommandations pour l'amélioration de la qualité bactériologique de l'eau. De plus, à l'aide de la documentation sur ce sujet, plusieurs sites, puits et sources de la bactérie *E. coli* permettent également d'orienter les recommandations en fonction de l'origine de l'*E. coli*, soit les sources du milieu urbain ou agricole. Les recommandations peuvent être ciblées à un secteur du fleuve où la concentration en *E. coli* est supérieure aux normes provinciales de baignade et d'activités nautiques. Les recommandations ont pour but de réduire la concentration en *E. coli* surtout pour les saisons printanières, estivales et automnales, car la qualité bactériologique hivernale est rarement plus haute que médiocre. Cependant, la plupart des recommandations peuvent s'appliquer sur l'ensemble de la zone d'étude, car les sources de contaminations en *E. coli* ne sont pas précises, à part l'usine d'épuration de l'eau de la ville de Montréal. Les recommandations sont classées sous quatre catégories : recherche, urbaine, agricole et riveraine. Ces recommandations ont été proposées, car les principales sources d'*E. coli* sont l'usine d'épuration des eaux usées de la ville de Montréal et les milieux agricoles.

Les recommandations portant sur la recherche ont pour but d'augmenter la connaissance au sujet de l'étendue de la bactérie *E. coli* ainsi que de quantifier les effets de cette bactérie sur l'environnement. En effet, plusieurs connaissances sont manquantes et pourraient améliorer la gestion de la bactérie *E. coli*. Ces nouvelles connaissances peuvent cibler les secteurs à surveiller ainsi que trouver des recommandations ciblées aux différentes sources. La phase d'acquisition de connaissance permet de s'assurer que les recommandations sont efficaces, sans toutefois être irréalistes. Les recommandations de cette partie peuvent ensuite confirmer l'application des recommandations dans les sections suivantes, ainsi que l'élaborer des recommandations ciblées à un secteur en particulier. De plus, les données saisonnières de cet essai ne couvrent qu'une année caractérisée par des inondations printanières exceptionnelles. Ces données peuvent apporter un biais, car l'année 2017 n'est pas représentative d'une année typique dans le secteur du tronçon fluvial du Saint-Laurent.

- Étendre l'analyse saisonnière sur plusieurs années afin de réduire l'effet des variations interannuelles;
- Inclure une section sur la qualité bactériologique de l'eau des rivières dans chacun des plans directeurs de l'eau afin de connaître leurs apports en *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent;
- Cibler spécifiquement les sources de la bactérie *E. coli* à l'aide de traçage génétique sur l'ensemble du bassin versant du fleuve Saint-Laurent afin de pouvoir proposer des recommandations spécifiques aux différentes sources;
- Étudier les effets de la densité de la population dans les prochaines analyses de l'occupation du territoire afin d'avoir une idée plus juste des effets de l'occupation urbaine sur la bactérie *E. coli*;

- Analyser les taux d'absorption en *E. coli* dans les tissus des bivalves ou des poissons afin de mesurer les effets sur l'environnement et sur l'alimentation;
- Faire un suivi environnemental des habitats fauniques aquatiques aux secteurs où la concentration en *E. coli* est de catégorie très mauvaise et exécration;
- Analyser si la concentration de la bactérie *E. coli* est influencée de la faune sauvage telle que les oiseaux migrateurs et les colonies nichant sur les îles.

Les recommandations orientées vers le milieu urbain portent sur la gestion des eaux usées, ainsi que la gestion des eaux de pluie. En effet, il a été démontré que la quantité de pluie influencent positivement la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau. Le but de ces recommandations est de réduire les épisodes de surverse des usines d'épuration d'eaux usées des villes et municipalités du Québec. Les grands centres urbains ainsi que plusieurs municipalités rejettent une quantité importante de bactéries *E. coli*, car les fortes précipitations créent des épisodes de surverse. Plusieurs recommandations ciblent la communauté métropolitaine de Montréal, car l'usine d'épuration de cette ville est à l'origine de la contamination de la masse d'eau centrale du fleuve Saint-Laurent. Il s'agit d'une source importante d'*E. coli* affectant une grande partie de la masse centrale du tronçon fluvial. Toutefois, ces recommandations peuvent être proposées à d'autres villes et municipalités rejetant une quantité importante d'*E. coli* dans les milieux hydriques.

- Moderniser les usines d'épuration d'eaux usées en s'assurant qu'elles soient capables de supporter la densification de la population et ajouter le traitement secondaire ou tertiaire tel que l'ozonation, les étangs aérés ou les traitements UV pour les usines présentes dans les grandes villes;
- Moderniser le réseau d'égout unitaire vers un réseau d'égouts séparatif, principalement dans la ville de Montréal;
- Cibler les secteurs où les raccordements aux égouts séparatifs sont rattachés à l'inverse et faire un plan permettant les raccordements adéquats;
- S'assurer que les nouvelles constructions soient convenablement rattachées à un réseau d'égout séparatif;
- Éviter les superficies imperméables en réduisant l'apport d'eau de pluie en créant des ouvrages de rétention d'eau de pluie, tels que les bassins de biorétention, les bandes de végétalisation filtrante ou d'autres méthodes présentées par le MDDEFP et le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire [MAMROT] (s. d.).

Les recommandations d'ordres agricoles servent quant à elle à réduire les effets des sols à nu ou fertilisés par le fumier et le lisier agricoles ainsi que l'effet des fosses septiques sur le réseau hydrique. Les rives du fleuve Saint-Laurent ainsi que plusieurs tributaires subissent de grandes pressions agricoles, notamment au niveau du lac Saint-Pierre. Le but de ces recommandations est donc de réduire l'effet de l'agriculture sur la concentration en *E. coli* dans les eaux fluviales. Ces recommandations peuvent être appliquées à

l'ensemble des milieux agricoles, puisque dans cet essai aucune discrimination au niveau des cultures n'a été faite lors des analyses. Ces recommandations sont donc vastes afin de pouvoir être appliqué dans la plupart des zones agricoles.

- Réduire les superficies de sol à nu dans les secteurs agricoles en pratiquant des cultures de couvertures ou toutes autres solutions efficaces;
- Réduire l'épandage de fumier et de lisier sur les sols à nu à proximité des cours d'eau pendant la période automnale;
- Faire un suivi au niveau des fosses septiques afin de s'assurer de leurs efficacités de rétention et informer les propriétaires sur l'entretien des fosses septiques.

Les recommandations au niveau des rives ont pour but de favoriser la naturalisation des berges afin de favoriser la rétention d'eau de pluie, limiter l'érosion, et créer des zones puits favorisant la dégradation de la bactérie *E. coli* de façon naturelle à l'aide de processus biogéochimique. Parmi ces recommandations, certaines sont ciblées à des secteurs précis tels que le lac Saint-Pierre. Les autres recommandations peuvent être appliquées sur plusieurs rives fluviales ainsi que sur les rives des rivières alimentant le Saint-Laurent.

- Poursuivre les efforts d'aménagements de bandes riveraines afin de réduire l'érosion des sols et le ruissellement d'eau de pluie;
- Étudier les effets des îles de Sorel et le lac Saint-Pierre sur la qualité bactériologique de l'eau fluviale, afin de comprendre la réduction en *E. coli* en aval du lac Saint-Pierre;
- Restaurer ou aménager des milieux humides dans les secteurs où la concentration en *E. coli* est supérieure aux normes provinciales, à proximité des rives;
- Informer et sensibiliser les citoyens des municipalités sur les secteurs où la concentration en *E. coli* est au-dessus des normes provinciales pour la baignade ou pour les activités nautiques, afin de réduire les risques d'exposition aux bactéries pathogènes.

CONCLUSION

Dans le cadre de cet essai, le portrait de la distribution de la bactérie *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent a été dressé dans le but de fournir des efforts de mitigation. Pour ce faire, les secteurs et les périodes où la concentration en *E. coli* est importante sont définis. Puis, la relation entre la distribution d'*E. coli*, les rôles de l'hydrologie et l'occupation du territoire explique une partie des tendances observées sur les eaux du fleuve Saint-Laurent. Finalement, une série de recommandations est proposée afin de réduire la concentration en *E. coli* sur l'ensemble de la zone d'étude. En effet, avant cet essai, la distribution en *E. coli* dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent était peu documentée.

D'abord, une description de la bactérie *E. coli* et de son cycle de vie indique les conditions optimales à la prolifération de cet organisme qui croit dans le système digestif des mammifères, de plusieurs reptiles et d'oiseaux. Cette bactérie vit également en milieu hydrique où elle peut infecter la population, elle agit aussi comme un indicateur pour d'autres bactéries infectieuses ou virus difficilement mesurables en milieux hydriques. Plusieurs souches d'*E. coli* sont pathogènes et peuvent affecter à différents niveaux la santé des gens qui les ingèrent. Bien que l'habitat principal de la bactérie *E. coli* soit le système digestif d'animaux à sang chaud, cette bactérie peut vivre et proliférer dans les cours d'eau, dans les sédiments ou dans le sol. En milieux hydriques, le taux de survie de la bactérie est moins grand dans le tube digestif des mammifères, car plusieurs variables biotiques et abiotiques nuisent à la prolifération bactérienne. Ces variables peuvent être la température de l'eau, la radiation solaire, la disponibilité en nutriments ainsi que la compétition et la prédation entre les autres organismes présents dans les cours d'eau.

L'acquisition de connaissance sur la bactérie *E. coli* a permis de démontrer que ce microorganisme est présent partout dans le monde. La gestion de cette bactérie varie d'un continent à l'autre, car l'origine de ce polluant, les usages des sources d'eau et les caractéristiques physicochimiques de l'eau sont différents. En Afrique, les normes de qualité de l'eau de consommation équivalent à la norme québécoise pour les activités nautiques, soit cinq fois plus élevées que la norme québécoise permettant la baignade. De plus, en Afrique, il y est possible que des rejets illégaux de matière fécale expliquent les valeurs élevées de bactérie *E. coli* dans les cours d'eau. Pour ce qui est de la situation européenne, le seuil de 500 UFC/100 mL détermine la qualité bactériologique des cours d'eau. Plusieurs secteurs étudient également l'accumulation de la bactérie *E. coli* dans les tissus des bivalves, car la consommation de ces invertébrés est compromise lorsque la concentration est trop élevée. Finalement, en Amérique et spécifiquement au Québec, les normes sur les coliformes fécaux sont plus sévères et classées selon deux catégories : la baignade (200 UFC/100 mL) et les activités de plaisance (1000 UFC/100 mL). Les études à travers le monde démontrent que les zones urbaines et agricoles ont des impacts sur les qualités bactériologiques de l'eau favorisant la présence de la bactérie *E. coli*. Le fleuve Saint-Laurent est un milieu particulièrement important pour la population québécoise, car la majorité des citoyens vivent à proximité des rives du fleuve ainsi que des rivières se jetant dans le fleuve. Cette grande concentration de personnes près des rives affecte la qualité bactériologique de l'eau.

Cet essai a montré que l'hydrologie du fleuve Saint-Laurent influence la concentration en *E. coli* démontrant une variation entre les masses d'eau fluviales et les secteurs de ce cours d'eau. En amont de l'île de Montréal, la concentration en *E. coli* est sous la norme provinciale autorisant la baignade. Dans ce secteur, la qualité bactérienne est classée entre excellente et bonne et correspond à la masse d'eau dominante provenant des Grands Lacs. La qualité de cette masse d'eau est très bonne, tout au long du tronçon fluvial suivant la rive sud. La pointe est de l'île de Montréal est un secteur où la concentration en *E. coli* est exécrable avec des comptes de la bactérie de près de 600 fois plus élevés que la norme provinciale permettant les activités nautiques. L'origine de cette concentration en *E. coli* est l'usine d'épuration de la ville de Montréal, le panache suit la masse d'eau centrale jusqu'au pont Laviolette entre les villes de Trois-Rivières et de Bécancour. La masse d'eau de la rive nord est alimentée en majorité par la rivière des Outaouais. Cette masse d'eau est généralement de moins bonne qualité pouvant atteindre régulièrement 200 UFC/100 mL. De plus, les tributaires se mélangent plus facilement avec cette masse d'eau que celle de la rive sud. En amont du lac Saint-Pierre, l'archipel des îles de Sorel et de Berthierville a la capacité de dégrader une certaine quantité de la bactérie *E. coli*. Le lac Saint-Pierre possède également cette capacité de dégradation, pouvant réduire considérablement la concentration en *E. coli*. C'est grâce à ces deux écosystèmes que les effets de l'usine d'épuration de la ville de Montréal ne sont presque pas perceptibles à la hauteur de la ville de Trois-Rivières.

Le fleuve Saint-Laurent possède plusieurs sources de la bactérie *E. coli* ainsi que plusieurs sites agissant comme puits de bactéries. Les sources de la bactérie *E. coli* proviennent du milieu urbain par les usines d'épuration des villes et municipalités qui déversent de l'eau non traitée dans les cours d'eau lors d'épisode de pluies. Une seconde source de la bactérie *E. coli* provient des milieux agricoles. Lorsque les sols à nu ou fertilisés sont érodés entraînant des coliformes fécaux dans les cours d'eau. En milieu naturel, la bactérie *E. coli* peut être dégradée ou elle peut entrer en dormance, sous certaines conditions. Certaines variables hydrologiques favorisent la dégradation d'*E. coli*, tels que les lacs fluviaux où la décantation de la matière organique peut favoriser la sédimentation. De plus, certaines études démontrent que les milieux humides réduisent la concentration en *E. coli* dans les cours d'eau. L'archipel des îles de Sorel est une structure hydrologique ayant une capacité de dégradation de la bactérie *E. coli*, bien que les effets de cet écosystème soient toutefois peu connus. Le lac Saint-Pierre et ses rives peuvent également avoir des propriétés de rétention de la bactérie *E. coli*. En plus de l'hydrologie fluviale, les tributaires apportent une certaine quantité d'eau et polluants affectant la qualité de l'eau du fleuve Saint-Laurent.

Dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent, plusieurs rivières se jettent dans le fleuve, chacune d'entre elles a un débit et une quantité d'*E. coli* unique. En effet, l'eau provenant des tributaires est influencée par le territoire. Notamment en été, où la concentration en *E. coli* est corrélée avec la superficie agricole. Il s'agit d'un résultat inattendu, car la concentration en *E. coli* est généralement corrélée aux milieux urbains. La pression agricole sur le fleuve Saint-Laurent est forte et elle est une cause de la présence en *E. coli* en milieux hydriques, notamment dans les tributaires et près des rives. De plus, quinze grandes rivières ont

été étudiées mensuellement, douze d'entre elles ont au moins un échantillon dans la catégorie mauvaise. De surcroît, sept rivières ont minimalement un échantillon dans la catégorie très mauvaise. L'eau rejetée par les tributaires suit les rives du fleuve Saint-Laurent, c'est pourquoi les tributaires influencent les secteurs où les citoyens se baignent. Les saisons modifient la corrélation entre l'*E. coli*, en hiver par exemple, la concentration en *E. coli* est influencée par la température de l'eau. Puis en été, la concentration de ce microorganisme varie selon l'occupation du territoire des bassins versants, principalement lorsque le milieu agricole est dominant. L'ensemble des données démontre une corrélation entre la concentration de la bactérie et la quantité de précipitation obtenue lors de la journée de l'échantillonnage. La température ambiante influence également la présence en *E. coli* en milieu hydrique. La variation saisonnière démontre que l'automne a la plus grande moyenne en *E. coli*, se retrouvant dans la catégorie mauvaise. La période estivale possède également une grande moyenne en *E. coli* classé également dans la catégorie mauvaise. Ces deux saisons comptent la plus grande quantité de valeurs aberrantes. L'hiver, quant à lui, est la saison où la concentration en *E. coli* est plus faible que la moyenne et où il y a le moins de données aberrantes. Les données saisonnières de l'année 2017 représentent une année exceptionnelle, car les crues printanières ont été particulièrement importantes. C'est pourquoi plusieurs analyses n'ont pas donné les résultats escomptés.

Cet essai a permis de dresser la distribution en *E. coli* sur le tronçon fluvial du Saint-Laurent en ciblant plusieurs secteurs problématiques où des actions de mitigation sont conseillées afin de réduire l'impact anthropique. Les résultats de ce texte permettent de suivre la distribution de l'*E. coli* pendant les années 2017, 2018 et 2019. Les résultats obtenus permettent de proposer des recommandations dans le but de réduire la concentration en *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent. En effet, en modernisant les usines d'épuration, en réduisant les superficies imperméables, en continuant les efforts d'aménagement de bande riveraine et en réduisant les superficies de sol agricole à nu, il est probable que la concentration en *E. coli* soit grandement diminuée. En continuant de suivre la concentration en *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent, l'efficacité de ces mesures mises en place peut ainsi être évaluée. Au besoin, d'autres recommandations peuvent être proposées si la concentration en *E. coli* n'est toujours pas sous la valeur de la norme provinciale permettant la baignade. Les effets de cette bactérie sur l'environnement sont très peu connus en milieux hydriques, mais les études actuelles suggèrent que la bactérie *E. coli* peut engendrer des conséquences encore inconnues sur les écosystèmes aquatiques. De plus, le milieu naturel peut avoir la capacité de dégrader la bactérie *E. coli*, des recherches peuvent définir les secteurs dégradant la bactérie ainsi que les facteurs favorisant la dégradation. Ce texte soulève donc des questionnements nécessitant davantage de recherches et d'analyses sur la bactérie *E. coli* dans le fleuve Saint-Laurent.

RÉFÉRENCES

- Agir Maskinongé. (2019). *Plan directeur de l'eau- Diagnostic* (Plan directeur de l'eau). Repéré à https://ea7f8614-c026-4e03-9f65-ecabcd051306.filesusr.com/ugd/9bd761_91c5a727c650495ea2386c6a3f848272.pdf
- Audet, G., Lapointe, M.-C., Boothroyd, K., De Mello, J., Jeanneau, S., et Blackburn, F. (2015). *Portrait de la zone Châteauguay : Document final*. (Plan directeur de l'eau) Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2480715>
- Balière, C. (2017). *Les Escherichia coli potentiellement pathogènes dans l'environnement littoral : Cas des STEC et des EPEC* (Microbiologie). (Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, Brest, Bretagne, France). Repéré à <https://archimer.ifremer.fr/doc/00312/42322/41653.pdf>
- Bassin versant Saint-Maurice (BVSM). (2014). *Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Saint-Maurice*. (Plan directeur de l'eau) . Repéré à https://f038f990-64eb-40d0-9b56-2b3076aaf8bb.filesusr.com/ugd/91abbd_cc72e5ba6d0a4fb98d363db0214db721.pdf
- Bleau, S., Lefebvre, P., Germain, K., Leclerc, V., et Archambault, M. (2016). *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : Volet nautisme et croisières-excursions* (Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada, au Gouvernement du Québec et à Ouranos) Repéré à https://veilletourisme.s3.amazonaws.com/2017/04/Nautisme_et_croisieres_Rapport_final_20161.pdf
- Bouchard, A., et Cantin, J.-F. (2015). Évolution des niveaux et débits du fleuve Saint-Laurent. *Ministre du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*. Repéré à http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1151/1/Cantin%20%26%20Bourchard_2015_Fiche-debits_niveaux_eau_SL_final_A.pdf
- Campagne contre les déversements d'eaux usées. (2018, 26 novembre). *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/environnement/pollution/201811/26/01-5205614-campagne-contre-les-deversements-deaux-usees.php>
- Campos, C. J., Kershaw, S. R., et Lee, R. J. (2013). Environmental influences on faecal indicator organisms in coastal waters and their accumulation in bivalve shellfish. *Estuaries and coasts, volume 36*. Repéré à <https://link.springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/pdf/10.1007/s12237-013-9599-y.pdf>
- Chahboune, M., Chahlaoui, A., et Zaid, A. (2014). Contribution à l'étude de la qualité bactériologique des eaux du barrage Hassan ii (province de Midelt, Maroc). *Les technologies de laboratoire, volume 8*. Repéré à <http://ezproxy.usherbrooke.ca/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=97910715&lang=fr&site=eds-live>
- Chandrasekaran, R., Hamilton, M. J., Wang, P., Staley, C., Matteson, S., Birr, A., et Sadowsky, M. J. (2015). Geographic isolation of *Escherichia coli* genotypes in sediments and water of the Seven Mile Creek—A constructed riverine watershed. *Science of the Total Environment volume 538*. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0048969715305179>
- Chevalier, P., et membres du Groupe scientifique sur l'eau de l'Institut national de santé publique du Québec. (2003). Coliformes fécaux. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/coliformes-fecaux>
- Chevremont, A.-C., Farnet, A.-M., Sergent, M., Coulomb, B., et Boudenne, J.-L. (2012). Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs. *Desalination, volume 285*. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0011916411008678>.

- Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu [COVABAR]. (s. d.). *Plan directeur de l'eau de la Rivière Richelieu [OBV]*. (Plan directeur de l'eau) Repéré à <https://covabar.qc.ca/plan-directeur-eau/>
- Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François [COGESAF]. (2006). *Analyse du bassin versant de la rivière Saint-François*. Rock Forest, QC : Comité de gestion du bassin versant de la rivière Saint-François.
- da Silveira, F. Z., Pich, C. T., Angioletto, E., et Bernardin, A. M. (2011). Ecotoxicological analysis of glasses obtained from industrial residues using *E. coli* and *S. aureus* as bioindicators. *Materials Science and Engineering, volume 31*. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0928493110002298>
- Dalla, A. V., Rigotto, C., Staggemeier, R., Soliman, M., de Souza Gil, F., Henzel, A., ... Spilki, F. (2015). Surface water quality in the Sinos River basin, in Southern Brazil : Tracking microbiological contamination and correlation with physicochemical parameters. *Environmental science and pollution research international, volume 22*. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/pdf/10.1007/s11356-015-4175-6.pdf>
- de La Chenelière, V., Brodeur, P., et Mingelbier, M. (2014). Restauration des habitats du lac Saint-Pierre : Un prérequis au rétablissement de la perchaude. *Le naturaliste canadien, volume 138*. Repéré à <https://www.erudit.org/en/journals/natcan/1900-v1-n1-natcan01407/1025070ar/abstract/>
- Dulude, A.-M. (2016a). *Déversement des eaux usées de la ville de Montréal portrait de la situation*. la coopérative de solidarité de la réserve de la biosphère du lac-saint-pierre. Repéré à http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1380/1/Dulude_eaux_us%C3%A9es_portrait_%202016_A.pdf
- Dulude, A.-M. (2016 b). *Impact de l'agriculture sur la qualité de l'eau au lac Saint-Pierre*. la coopérative de solidarité de la réserve de la biosphère du lac-saint-pierre. Repéré à http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1381/1/Dulude_agriculture_portrait_2016_A.pdf
- Elson, J. A. (2015). Basses terres du Saint-Laurent. Dans *L'Encyclopédie Canadienne*. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/basses-terres-du-saint-laurent>
- Environnement et Changement climatique Canada [ECCC]. (2012). Les lacs fluviaux du Saint-Laurent. *Gouvernement du Canada*. Repéré à <http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http%3A%2F%2Fec.gc.ca%2Fstl%2Fdefault.asp%3Flang%3DFr%26n%3D09C5A944-1%23stf>
- Environnement et Changement climatique Canada [ECCC]. (2011). Réserve nationale de faune du lac Saint-François. *Aem*. [description de programme; éducation et sensibilisation]. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/reserves-nationales-faune/existantes/lac-saint-francois.html>
- Environnement et Changement climatique Canada [ECCC]. (2019). Données historiques—Climat—Environnement et Changement climatique Canada. Repéré à https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html
- Frenette, J.-J., Massicotte, P., et Lapierre, J.-F. (2012). Colorful Niches of Phytoplankton Shaped by the Spatial Connectivity in a Large River Ecosystem : A Riverscape Perspective. *PLoS ONE, volume 7*. Repéré à <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035891>
- Fulazzaky, M. A., Seong, T. W., et Masirin, M. I. M. (2010). Assessment of water quality status for the Selangor River in Malaysia. *Water, Air, and Soil Pollution, volume 205*. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/article/10.1007/s11270-009-0056-2>
- Gemmell, M. E., et Schmidt, S. (2012). Microbiological assessment of river water used for the irrigation of fresh produce in a sub-urban community in Sobantu, South Africa. *Food Research International, volume 47*. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S096399691100456X>

- Giroux, I., Hébert, S., et Berryman, D. (2016). Qualité de l'eau du Saint-Laurent de 2000 à 2014 : Paramètres classiques, pesticides et contaminants émergents. *Le Naturaliste canadien, volume 140*. Repéré à <https://doi.org/10.7202/1036500ar>
- Godmaire, H, et Demers, A. (2009). *Eaux usées et Fleuve Saint-Laurent problèmes et solutions*. Union Saint-Laurent Grands Lacs et Eau Secours! Repéré à https://rqge.qc.ca/wp-content/uploads/2014/01/eaux_usees-brochure.pdf
- Grater, E. M. (2018). *Bacterial Metabolism across the St. Lawrence Riverscape*. [Research Proposal: Seminar 1], Trois-Rivières. Manuscrit soumis pour publication.
- Groupe de travail Suivi de l'état du Saint-Laurent. (2014). *Portrait global de l'état du Saint-Laurent 2014*. ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec, Parcs Canada, Pêches et Océans Canada et Stratégies Saint-Laurent.
- Groupe scientifique sur l'eau. (2017). *Escherichia coli. Fiche synthèse sur l'eau potable et la santé humaine*. [Institut national de santé publique du Québec (INSPQ)]. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/e-coli>
- Häder, D.-P., Williamson, C. E., Wängberg, S.-Å., Rautio, M., Rose, K. C., Gao, K., ... Worrest, R. (2015). Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. *Photochemical et Photobiological Sciences, volume 14*. Repéré à <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/pp/c4pp90035a>
- Hawley, H., et Bradford, M. D. (2019). *E. coli* infection. Dans *Magill's Medical Guide (Online Edition)*. Salem Press. Repéré à <http://ezproxy.usherbrooke.ca/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ersetAN=86194069&lang=frets&site=eds-live>
- Hébert, S. (2010). *Qualité bactériologique de sites potentiels de baignade dans le Saint-Laurent, été 2009*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/stlaurent/Plages2009.pdf>
- Hébert, S. (2016). *La qualité de l'eau du secteur fluvial : Paramètres physio-chimiques et bactériologiques*. (Rapport No. 4). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Repéré à http://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/weekly_acquisitions_list-ef/2016/16-38/publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En4-9-2016-fra.pdf
- Iguchi, A., Iyoda, S., Kikuchi, T., Ogura, Y., Katsura, K., Ohnishi, M., ... Thomson, N. R. (2014). A complete view of the genetic diversity of the *Escherichia coli* O-antigen biosynthesis gene cluster. *DNA Research, volume 22*(1). Repéré à <https://doi.org/10.1093/dnares/dsu043>
- Institut de la Statistique du Québec. (2017). Estimation de la population des municipalités du Québec de 15 000 habitants et plus au 1er juillet des années 1996, 2001, 2006 et 2011 à 2016. Repéré à https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/mun_15000.htm
- James, G., Witten, D., Hastie, T., et Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning*. Repéré à <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Kischel, M. (2018). *Les contaminations bactériologiques des eaux littorales du Morbihan*. (Rapport d'étude). Repéré à https://www.morbihan.fr/fileadmin/CSEM/csem_etudes/RapportCD56_KISCHEL_M_2018.pdf
- La Violette, N. (2004). Les lacs fluviaux du Saint-Laurent : Hydrologie et modifications humaines. *Le naturaliste canadien, volume 128*. Repéré à <http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/608/>
- Lapointe, M. (2019, 10 mai). Zonage des plaines d'inondation et changements climatiques. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/opinion/idees/553979/zonage-des-plaines-d-inondation-et-changements-climatiques>

- Lebel, A. (2013, 9 juillet). Dépaysement et détente dans les îles de Sorel. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/voyage/destinations/quebec/monteregie/201307/09/01-4669151-depaysement-et-detente-dans-les-iles-de-sorel.php>
- Lebeuf, S.-H. (2017, 13 mai). Où ont frappé les pires inondations au Québec? La réponse en carte, Inondations printemps 2017. *Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1032722/historique-inondations-quebec-portrait-carte>
- Létourneau, G. (2017). *Portrait des inondations printanières de 2017 sur le territoire métropolitain, du cadre légal et des règles applicables en matière d'aménagement de développement du territoire pour les plaines inondables*. (Suivi de l'occupation du sol le long du Saint-Laurent en 2015) Repéré à http://planstlaurent.qc.ca/fileadmin/publications/fiches_indicateurs/Francais/2019-occupationSol2015_FR.pdf
- Lyautey, E., Lu, Z., Lapen, D. R., Wilkes, G., Scott, A., Berkers, T., ... Topp, E. (2010). Distribution and Diversity of *Escherichia coli* Populations in the South Nation River Drainage Basin, Eastern Ontario, Canada. *Applied and Environmental Microbiology*, volume 76. Repéré à <https://doi.org/10.1128/AEM.02288-09>
- Maraccini, P. A., Mattioli, M. C. M., Sassoubre, L. M., Cao, Y., Griffith, J. F., Ervin, J. S., ... Boehm, A. B. (2016). Solar inactivation of enterococci and *Escherichia coli* in natural waters : Effects of water absorbance and depth. *Environmental science et technology*, volume 50. Repéré à <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00505>
- Marsh, J. H. (2015). Fleuve Saint-Laurent. Dans *L'Encyclopédie Canadienne*. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/fleuve-saint-laurent>
- Meng, Z., Chandrasena, G., Henry, R., Deletic, A., Kolotelo, P., et McCarthy, D. (2018). Stormwater constructed wetlands : A source or a sink of *Campylobacter* spp. *Water research*, volume 131. Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0043135417310400>
- Miller, J. D., Schoonover, J. E., Williard, K. W., et Hwang, C. R. (2011). Whole catchment land cover effects on water quality in the lower Kaskaskia River watershed. *Water, Air, et Soil Pollution*, volume 221. Repéré à <https://link-springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/article/10.1007/s11270-011-0794-9>
- Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques [MELCC]. (s. d.a). Atlas interactif de la qualité des eaux et des écosystèmes aquatiques-Coliformes fécaux -. Repéré à http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/Atlas_interactif/donnees_recentes/donnees_cf.asp#onglets
- Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques [MELCC]. (s. d.b). *La qualité de l'eau et les usages récréatifs*. (S.l.) : (s.n.). Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/recreative/qualite.htm>
- Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques [MELCC]. (s. d.c). Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec : Quelle est la situation et quelles sont les causes? Repéré à http://www.environnement.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation_Rivieres-Fleuve.htm#qualite_bacteriologique
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs [MDDEFP] (2013a). *Suivi de la qualité de l'eau des rivières du Québec*. (S.l.) : Réseau-rivières. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/reseau-riv/Reseau-rivieres.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs[MDDEFP]. (2013b). *Le lac Saint-Pierre—Un joyau à restaurer*. (S.l.) : Gouvernement du Québec. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/lac-st-pierre/doc-synthese.pdf>

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC]. (2015). *Portrait sommaire du bassin versant de la rivière des Outaouais*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/outaouais/portrait-sommaire.pdf>
- Morin, P., et Boulanger, F. (2005). *Portrait de l'environnement du bassin versant de la rivière Bécancour (Mise à jour par Paris, A. et L. Chauvette en 2008 et révisé en 2014)*. Plessisville, Québec, Canada, : Rapport produit par Envir-Action pour le Groupe de concertation du bassin de la rivière Bécancour (GROBEC),. Repéré à http://www.grobec.org/pdf/pde/GROBEC_Portrait_riv_Becancour.pdf
- Nougang, M. E., Nola, M., Ateba Bessa, H., Tamatcho Kweyang, B., Noah Ewoti, O., et MOUNGANG, L. M. (2011). Prevalence of pathogenic strains of *Escherichia coli* in urban streams in the equatorial region of Cameroon (Central Africa). *J Appl Biosci*, volume 48, Repéré à <http://m.elewa.org/JABS/2011/48/5.pdf>
- Organisme de bassin versant de la Yamaska [OBV YAMASKA]. (2014). *Plan directeur de l'eau de la rivière Yamaska* (Rapport No. 2). Repéré à https://drive.google.com/file/d/0B6llpmejajCWFFBYUo3MnBZVTQ/view?usp=sharing&usp=embed_facebook
- Organisme de bassin versant : Rivières Sainte-Anne, Portneuf et secteur La Chevrotière [CAPSA]. (2014). *Portrait, diagnostic et plan d'action des bassins versants de la rivière Sainte-Anne*. (Plan directeur de l'eau) Repéré à http://www.capsa-org.com/images/documents_pde/pdeprelim/capsa_pdepreliminaire_2ste_anne.pdf
- Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche [OBVRLY]. (2014). *Bassins versant de la zone du Loup-Yamachiche (Mauricie)*. (Plan directeur de l'eau). Repéré à https://2b9fe459-1e48-4132-ad69-855c6a49d7da.filesusr.com/ugd/0b7df5_0f577338a34041e5ae737b3d12bc30d5.pdf
- Organisme de concertation pour l'eau des bassins versant de la rivière Nicolet [COPERNIC]. (2015). *Plan directeur de l'eau (PDE) de la rivière Nicolet*. Repéré à https://www.copernicinfo.qc.ca/wp-content/uploads/2019/09/COPERNIC_Portrait_Final.pdf
- Pandey, P. K., Soupir, M. L., Haddad, M., et Rothwell, J. J. (2012). Assessing the impacts of watershed indexes and precipitation on spatial in-stream *E. coli* concentrations. *Ecological indicators*, volume 23. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S1470160X12002221>
- Passerat, J., Ouattara, N. K., Mouchel, J.-M., Rocher, V., et Servais, P. (2011). Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water research*, volume 45. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0043135410006780>
- Petit, K., et Teyssière, R. (2013). *Synthèse des connaissances sur la présence de substances médicamenteuses dans les milieux aquatiques : En France et dans quelques pays*. France : Office internationale de l'Eau. Repéré à <https://www.oieau.fr/eaudoc/system/files/33473.pdf>
- Poiré, A.-S. (2019, 18 mai). Un regard nouveau sur la santé du fleuve Saint-Laurent. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/non-classe/554415/saint-laurent-un-regard-nouveau-sur-le-sante-du-fleuve-saint-laurent>
- Ressources naturelles Canada. (2019). L'Atlas du Canada. La couverture terrestre au Canada [Raster]. Repéré à <https://atlas.gc.ca/lcct/fr/index.html>
- Robert, L. (2014). L'épandage de lisier en octobre, c'est encore possible. *MAPAQ*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole/octobre2014/Pages/epandageoctobre.aspx>
- Rochelle-Newall, E. J., Ribolzi, O., Viguier, M., Thammahacksa, C., Silvera, N., Latsachack, K., ... Soullieuth, B. (2016). Effect of land use and hydrological processes on *Escherichia coli*

- concentrations in streams of tropical, humid headwater catchments. *Scientific reports*, volume 6. Repéré à <https://www.ncbi-nlm-nih-gov.ezproxy.usherbrooke.ca/pmc/articles/PMC5015105/>
- Simoneau, M. (2017). *Qualité de l'eau des tributaires du lac Saint-Pierre : Évolution temporelle 1979-2014 et portrait récent 2012-2014*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Repéré à <http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1204/>
- Société d'aménagement et de mise en valeur du bassin de la Batiscan (SAMBBA). (2015). *Zone de gestion intégrée de l'eau Batiscan-Champlain. Plan directeur de l'eau : Portrait du bassin versant de la rivière Batiscan*. (Plan directeur de l'eau). Repéré à http://sambba.qc.ca/wp-content/uploads/2015/06/SAMBBA_BATISCAN_PDEfinal.pdf
- Stanford, K., Johnson, R. P., Alexander, T. W., McAllister, T. A., et Reuter, T. (2016). Influence of season and feedlot location on prevalence and virulence factors of seven serogroups of *Escherichia coli* in feces of western-Canadian slaughter cattle. *PLoS One*, volume 11. Repéré à <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0159866>
- Tanguay, F. (2020). *E. coli* Enumeration Protocol. Guillemette Lab Protocol 010 et Centre de Recherche sur les interactions bassins Versants - Écosystèmes Aquatiques (RIVE).
- Tardy, G. (2020, 1er juin). Juin, mois de l'eau : 7 municipalités sur 10 contaminent toujours les rivières. *Fondation Rivières*. Repéré à <https://fondationrivieres.org/juin-mois-de-leau-7-municipalites-sur-10-contaminent-toujours-les-rivieres/>
- Todd, E. C. d., et Baker, N. (2018). Infections à *E. coli* au Canada. Dans *L'Encyclopédie Canadienne*. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/hamburger-maladie-du>
- Tornevi, A., Bergstedt, O., et Forsberg, B. (2014). Precipitation effects on microbial pollution in a river : Lag structures and seasonal effect modification. *PloS one*, volume 9. Repéré à <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098546>
- Tremblay, L., Drolet, J., et Girard-Brisson, M. (2015). *Plan d'action 2015-2020 de la zone de gestion intégrée de l'eau par bassin versants du COBAMIL* (Plan directeur de l'eau Rapport No. 5). Conseil des bassins versant des Mille-Iles.
- Université du Québec à Trois-Rivières [UQTR] (sous presse). *Missions Lampsilis*. [Bases de données], Trois-Rivières. Manuscrit soumis pour publication.
- van Elsas, J. D., Semenov, A. V., Costa, R., et Trevors, J. T. (2011). Survival of *Escherichia coli* in the environment : Fundamental and public health aspects. *The ISME Journal*, volume 5. Repéré à <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.80>
- Verhougstraete, M. P., Martin, S. L., Kendall, A. D., Hyndman, D. W., et Rose, J. B. (2015). Linking fecal bacteria in rivers to landscape, geochemical, and hydrologic factors and sources at the basin scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volume 112. Repéré à <https://doi.org/10.1073/pnas.1415836112>
- Vermeulen, L. C., et Hofstra, N. (2014). Influence of climate variables on the concentration of *Escherichia coli* in the Rhine, Meuse, and Drentse Aa during 1985–2010. *Regional environmental change*, volume 14. Repéré à <https://link.springer-com.ezproxy.usherbrooke.ca/content/pdf/10.1007/s10113-013-0492-9.pdf>
- Ville de Montréal. (2018). *Portrait de la qualité des plans d'eau à Montréal*. Montréal. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/VDM_BILAN_RSMA_2018_VF.PDF
- Ville de Montréal. (2019). *Suivi de la qualité de l'eau en aval de l'effluent de la station d'épuration Jean-R. Marcotte, depuis son émissaire situé à l'île aux Vaches jusqu'au pont de Trois-Rivières* (Rapport 2017). Montréal. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/VDM-RSMA-RAPPORTCOURDO2017.PDF

- Ville de Shawinigan. (2011). Politique de gestion durable de l'eau de la ville de Shawinigan. *Ville de Shawinigan*. Repéré à <http://www.shawinigan.ca/Document/Fichiers%20PDF/Ville/Politiques/Politique%20de%20l'eau%202011.pdf>
- Watad, A., Azrielant, S., Bragazzi, N. L., Sharif, K., David, P., Katz, I., ... Adawi, M. (2017). Seasonality and autoimmune diseases : The contribution of the four seasons to the mosaic of autoimmunity. *Journal of autoimmunity*, volume 82. Repéré à <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S089684111730313X>
- Whitman, R. L., Przybyla-Kelly, K., Shively, D. A., Nevers, M. B., et Byappanahalli, M. N. (2007). Sunlight, season, snowmelt, storm, and source affect *E. coli* populations in an artificially ponded stream. *Science of The Total Environment*, volume 390. Repéré à <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.014>
- Wu, J., Rees, P., et Dorner, S. (2011). Variability of *E. coli* density and sources in an urban watershed. *Journal of Water and Health*, volume 9. Repéré à <https://doi.org/10.2166/wh.2010.063>
- Zone d'intervention prioritaire les Deux rives. (sous presse). *Suivi de la qualité des eaux riveraines du fleuve*. [Bases de données]. Manuscrit soumis pour publication.

ANNEXE-1 CARTES DES DONNÉES DE DISTRIBUTION MENSUELLES EN *E. COLI* (couche de fond tirée de :
ressources naturelles canada, 2019)

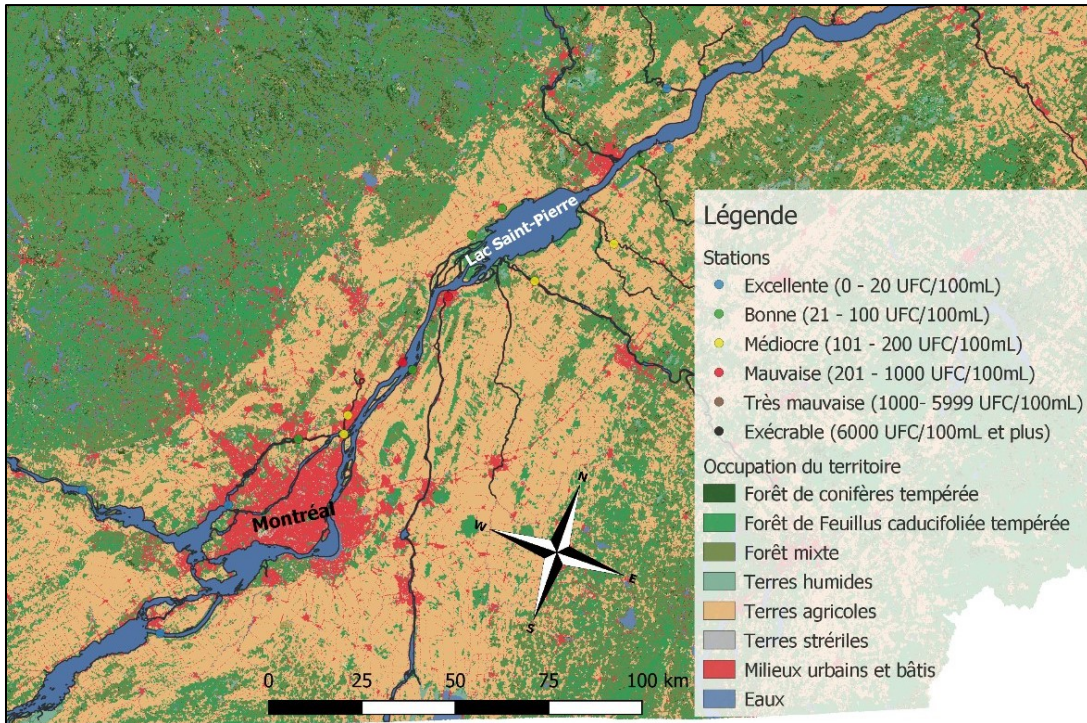


Figure A1 : Carte de distribution des *E. coli* de janvier 2017

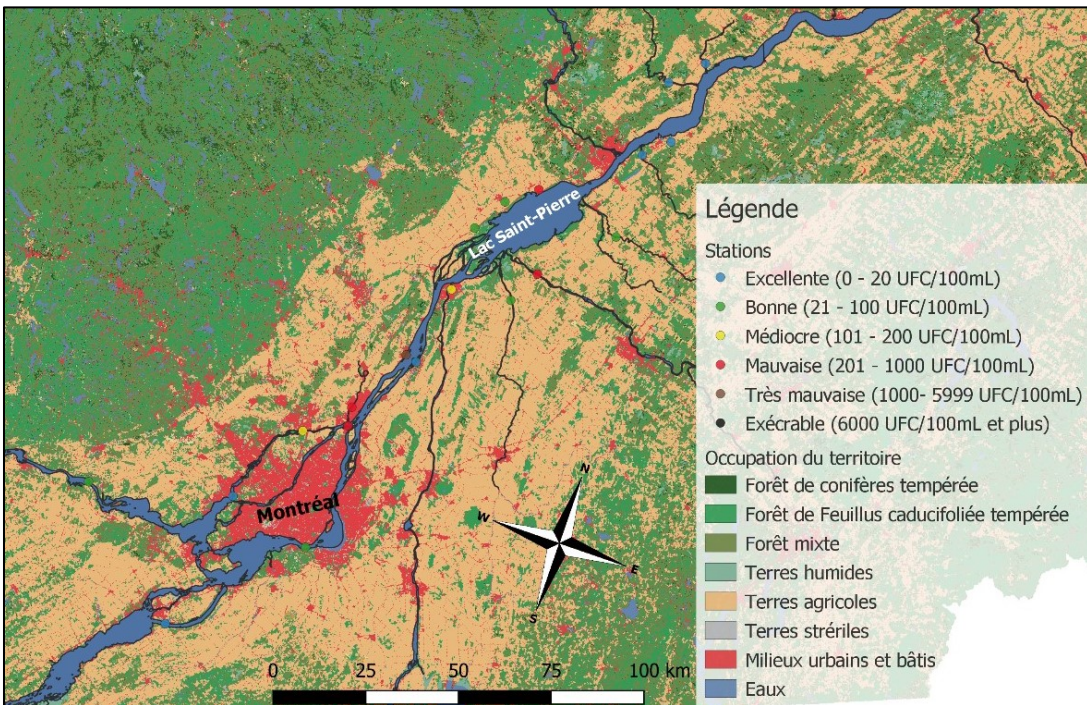


Figure A2 : Carte de distribution des *E. coli* de février

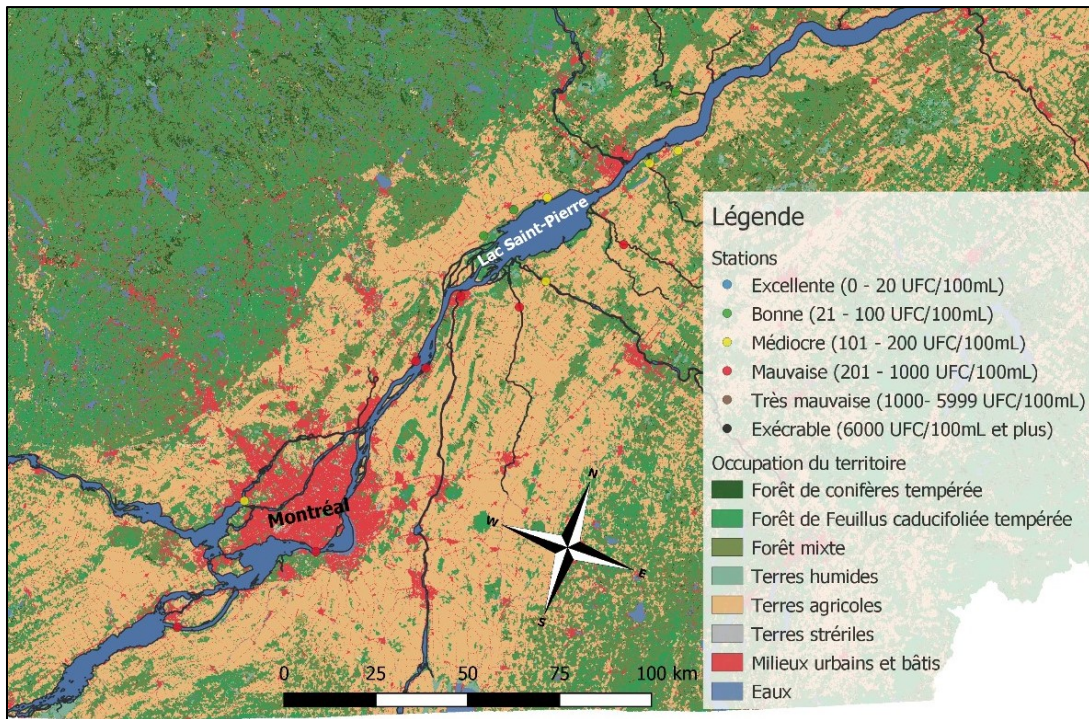


Figure A3 : Carte de distribution des *E. coli* de mars 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

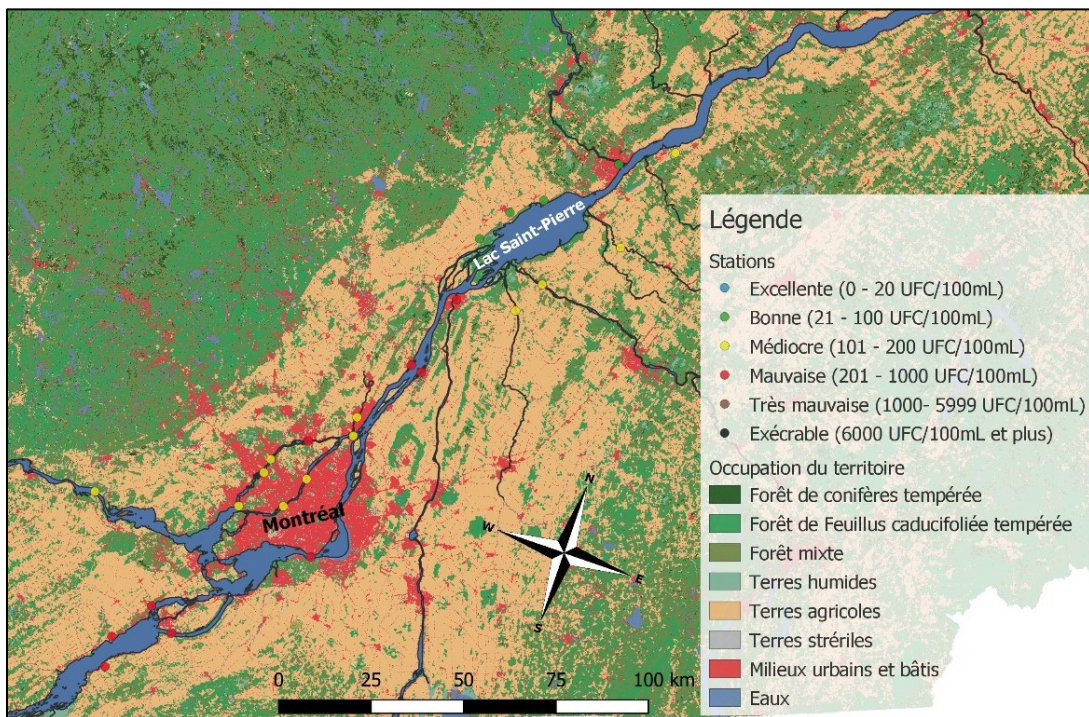


Figure A4 : Carte de distribution des *E. coli* d'avril 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

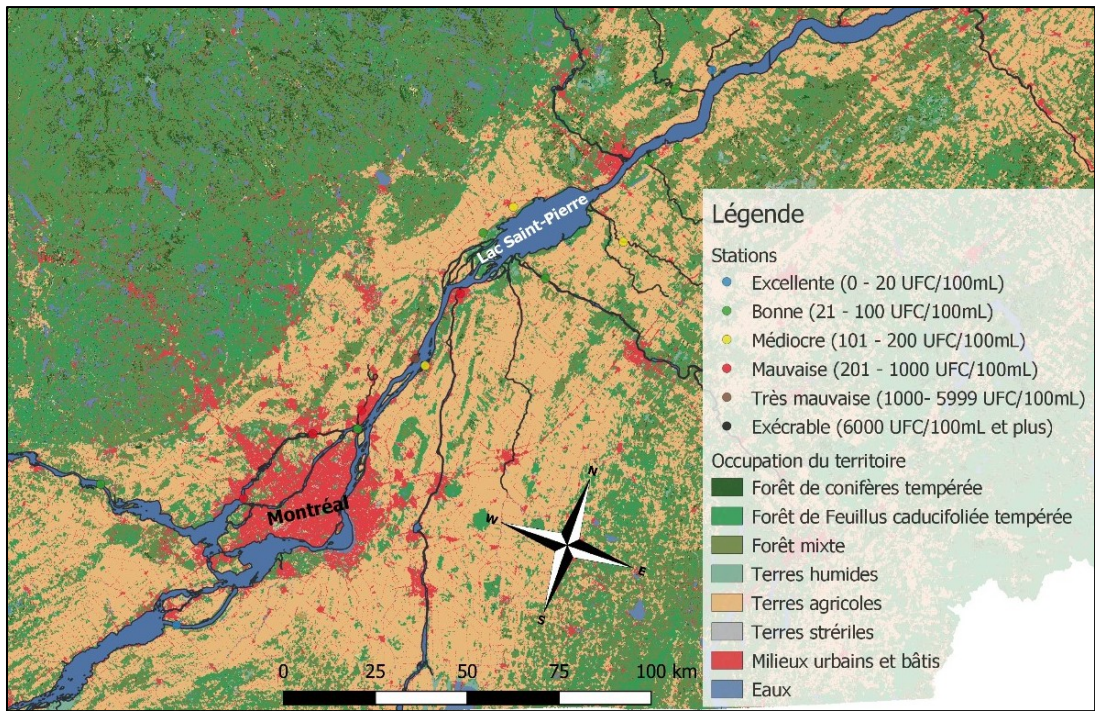


Figure A5 : Carte de distribution des *E. coli* de mai 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

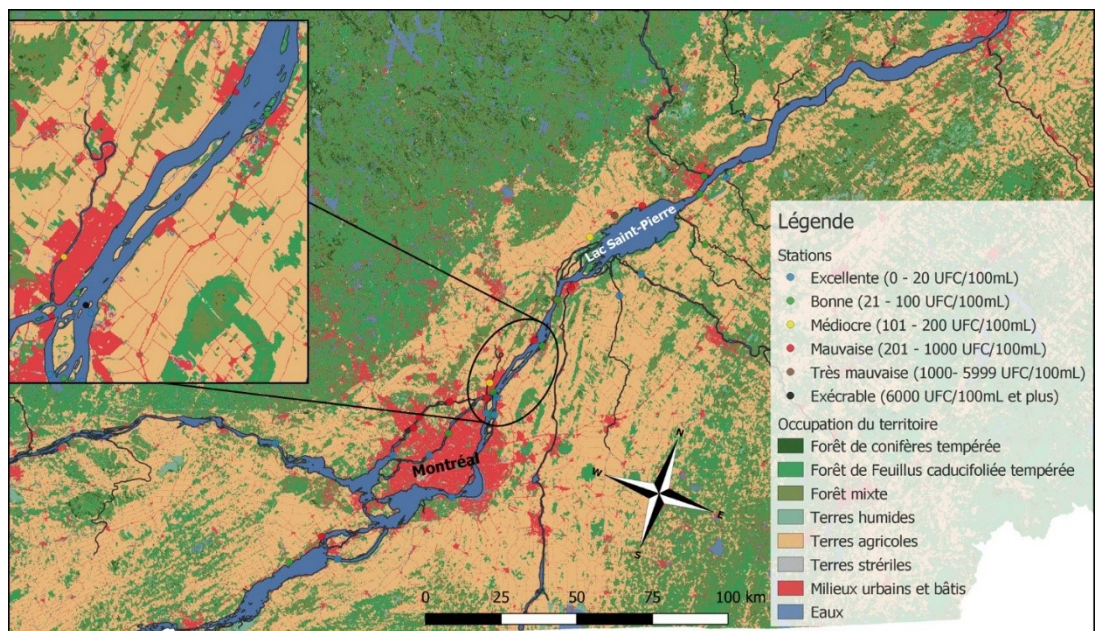


Figure A6 : Carte de distribution des *E. coli* de juin 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

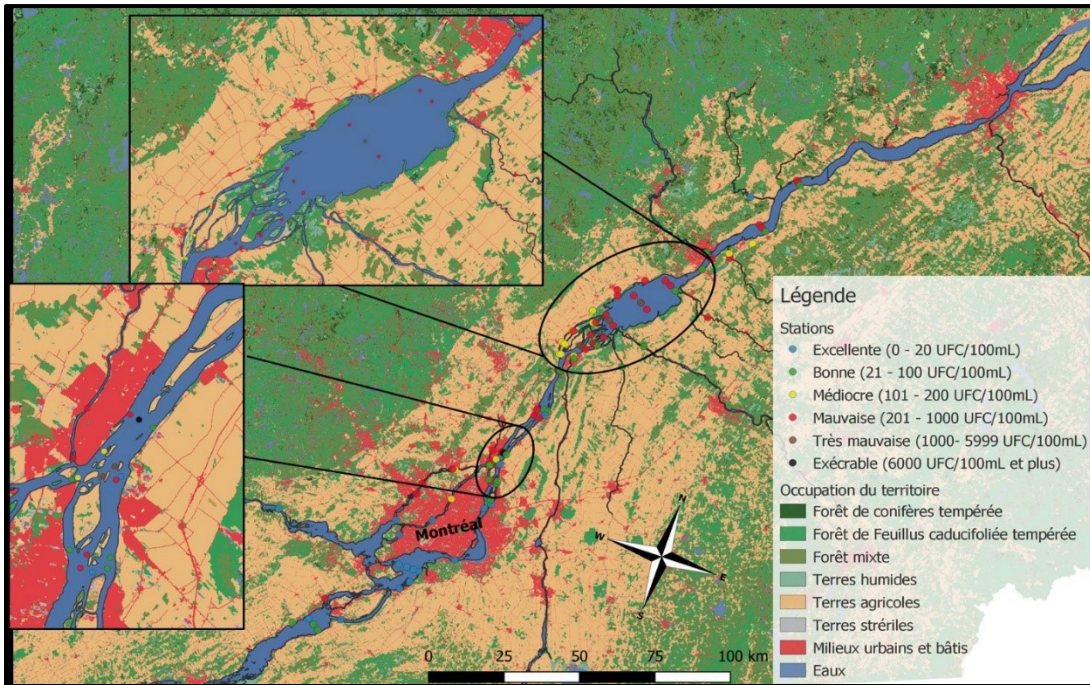


Figure A7 : Carte de distribution des *E. coli* de juillet 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

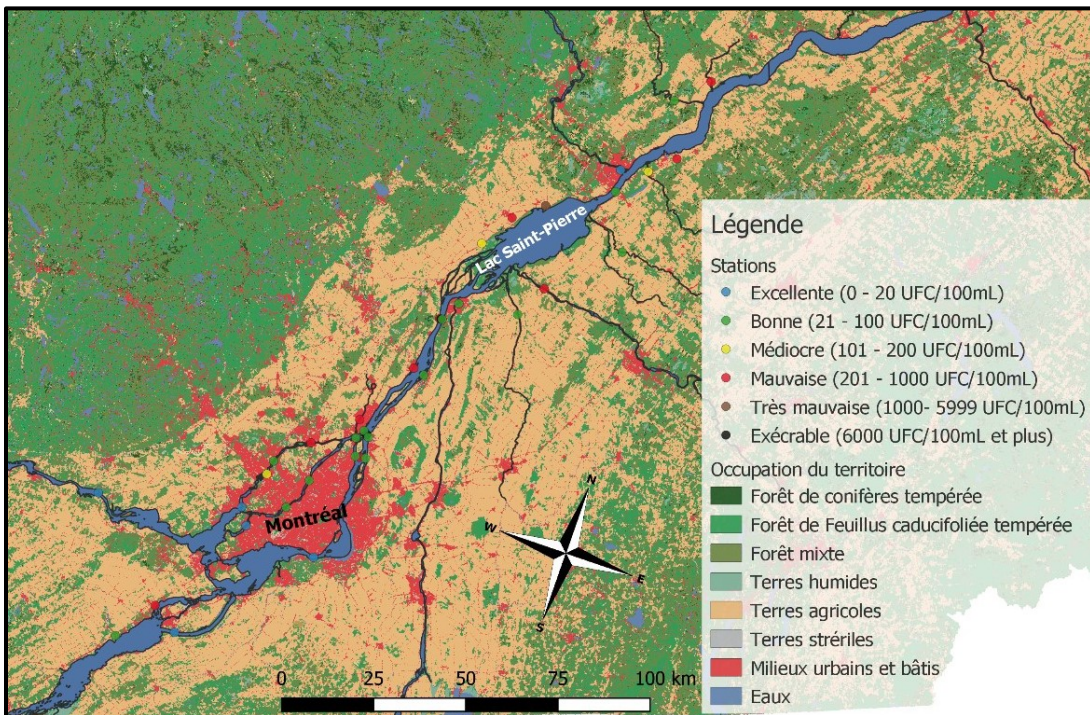


Figure A8 : Carte de distribution des *E. coli* d'août 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

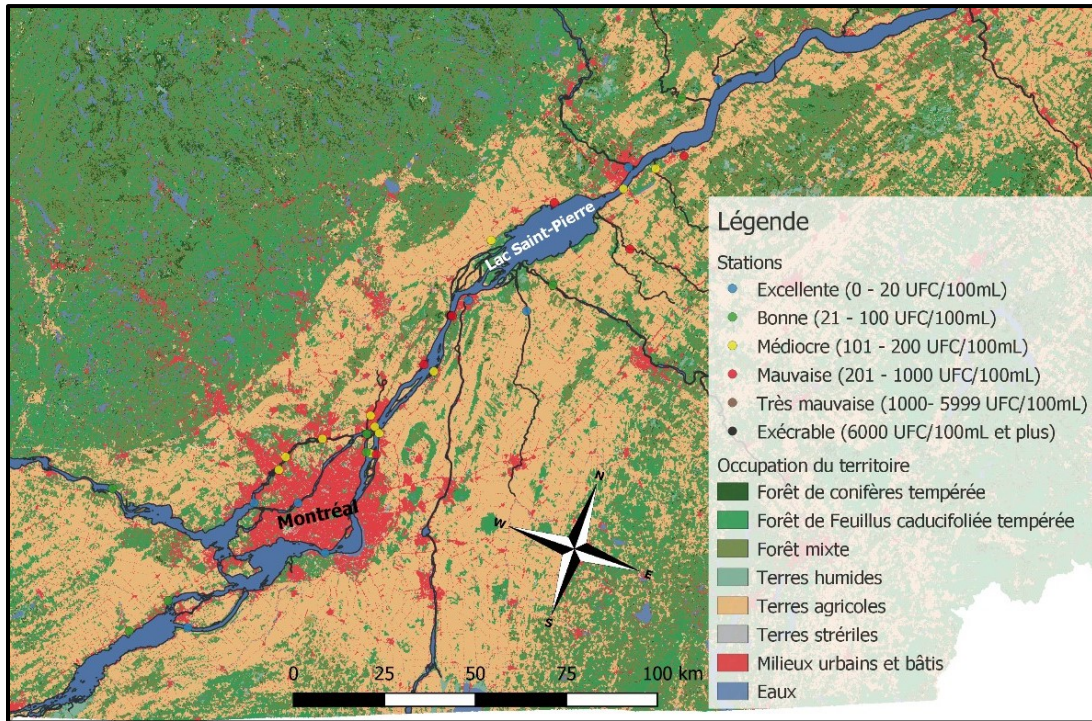


Figure A9 : Carte de distribution des *E. coli* de septembre 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

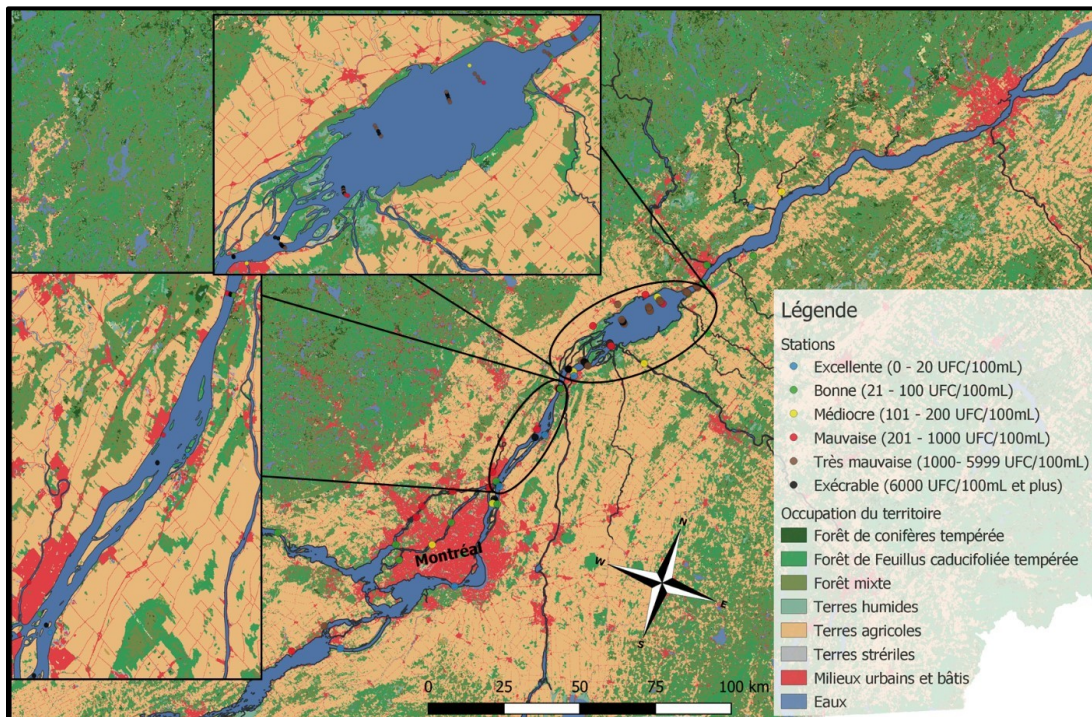


Figure A10 : Carte de distribution des *E. coli* d'octobre 2017(couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

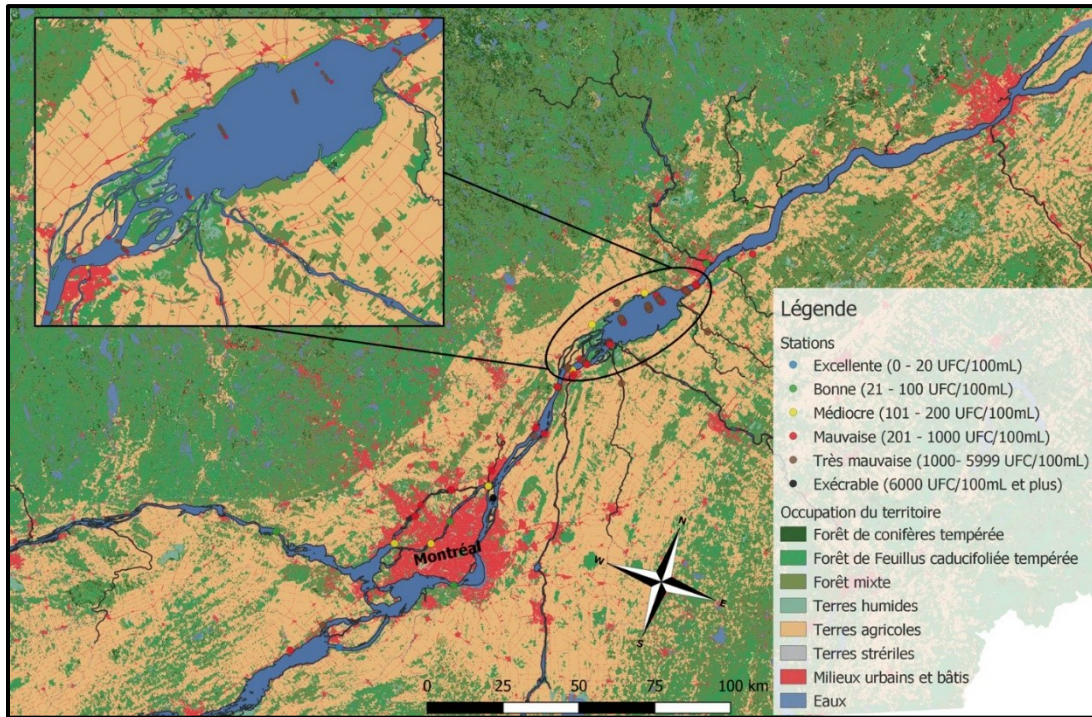


Figure A11 : Carte de distribution des *E. coli* de novembre 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

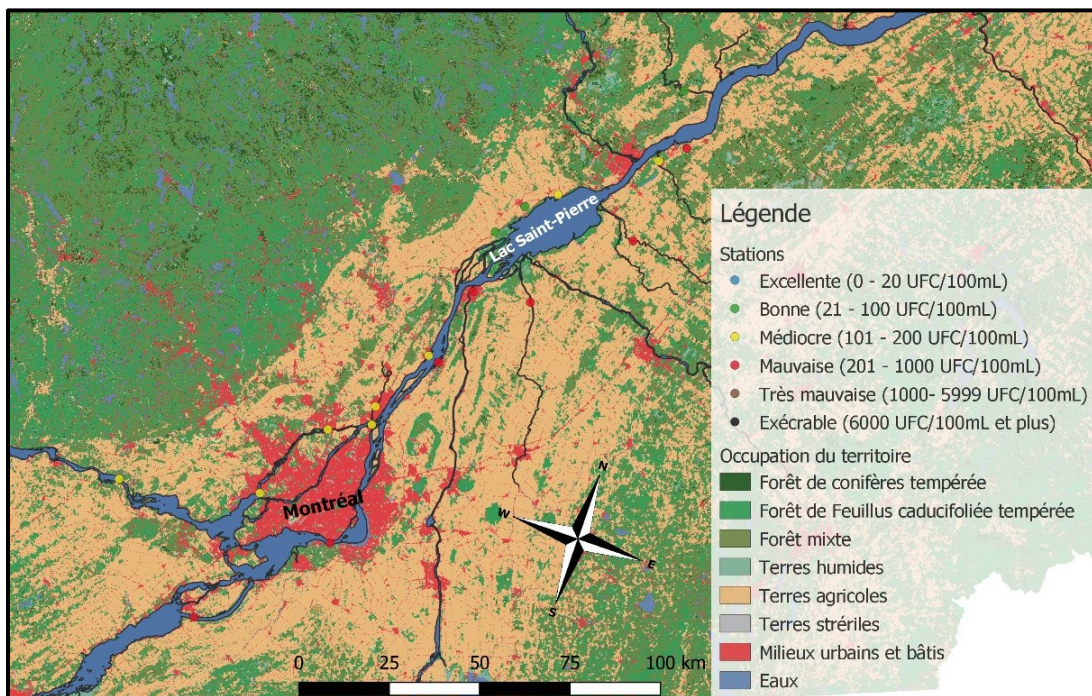


Figure A12 : Carte de distribution des *E. coli* de décembre 2017 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

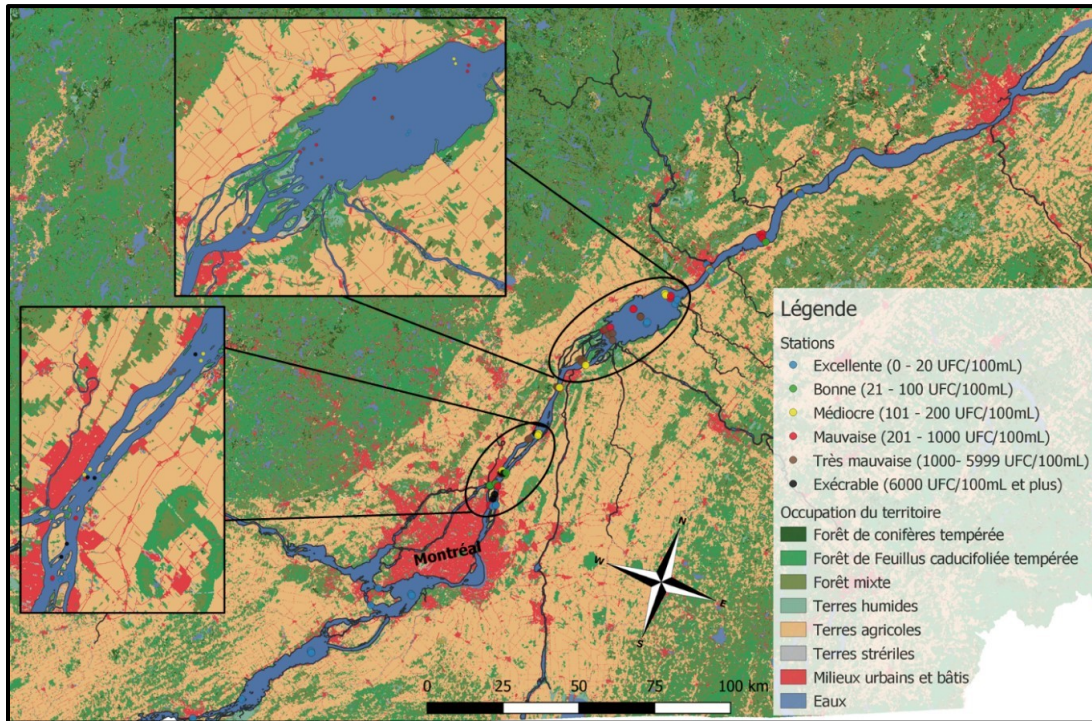


Figure A13 : Carte de distribution des *E. coli* de juillet 2018 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

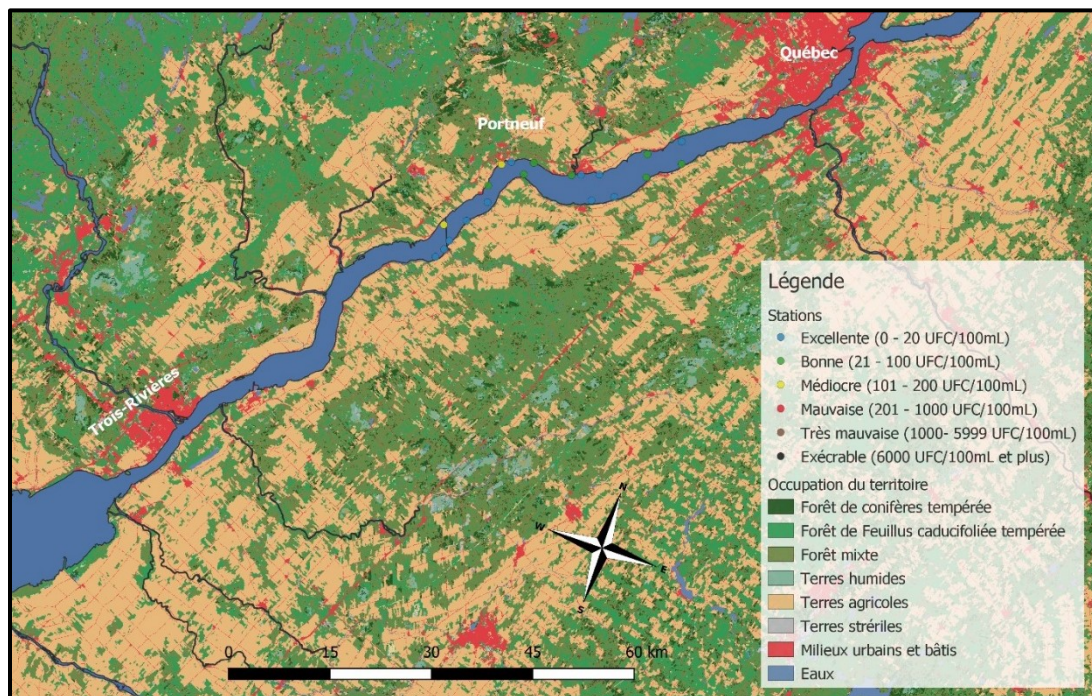


Figure A14 : Carte de distribution des *E. coli* de septembre 2019 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)

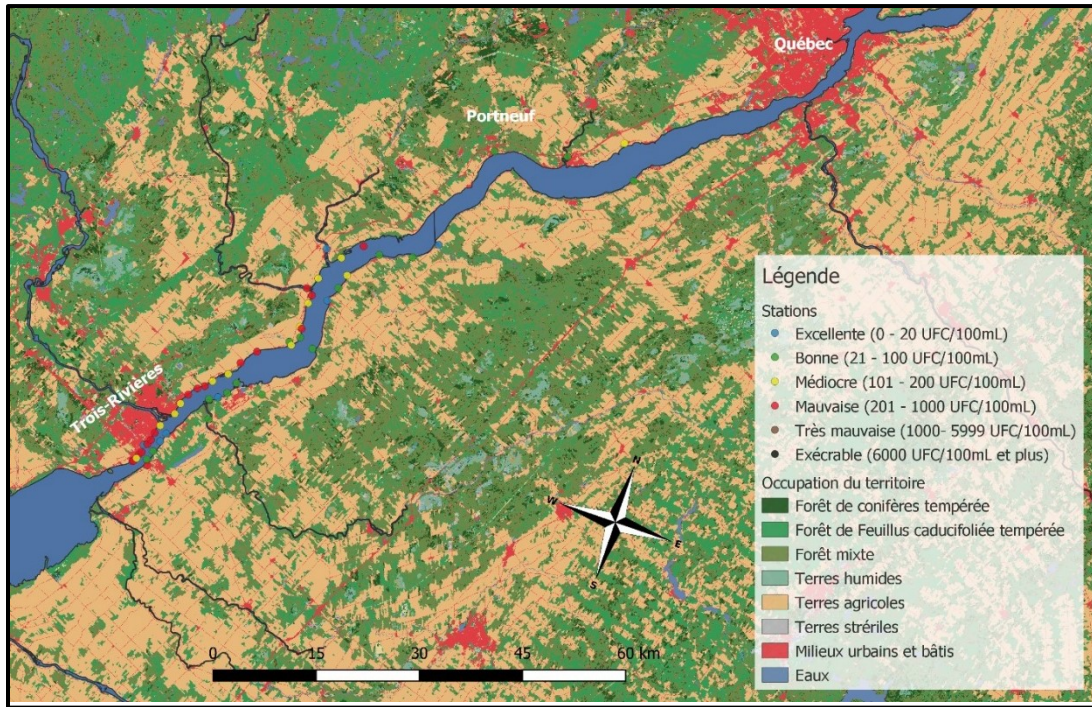


Figure A15 : Carte de distribution des *E. coli* d'octobre 2019 (couche de fond tirée de : Ressources naturelles Canada, 2019)