# État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 4, Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, Québec

Scott A. Ryan[1], Gary Wohlgeschaffen[1], Nusrat Jahan[1], Haibo Niu[2], Alice C. Ortmann[1], Trevor N. Brown[1], Thomas L. King[1], et Jason Clyburne[3]

[1]Centre de recherche sur le pétrole, le gaz et autres sources d'énergie extracôtières, Pêches et Océans Canada, Institut océanographique de Bedford, Dartmouth, NS B2Y 4A2

[2]Département d'ingénierie, Université Dalhousie, Truro, NS B2N 5E3

[3]Département de chimie, Université Saint Mary's, Halifax, NS B3H 3C3

2019

## Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques 3176

Pêches et Océans Canada Fisheries and Oceans Canada

Canada

## Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports manuscrits contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui traitent de problèmes nationaux ou régionaux. La distribution en est limitée aux organismes et aux personnes de régions particulières du Canada. II n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports manuscrits peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports manuscrits sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques.*

Les rapports manuscrits sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre.

Les numéros 1 à 900 de cette série ont été publiés à titre de Manuscrits (série biologique) de l'Office de biologie du Canada, et après le changement de la désignation de cet organisme par décret du Parlement, en 1937, ont été classés comme Manuscrits (série biologique) de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 901 à 1425 ont été publiés à titre de Rapports manuscrits de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 1426 à 1550 sont parus à titre de Rapports manuscrits du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 1551.

## Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Manuscript reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which deals with national or regional problems. Distribution is restricted to institutions or individuals located in particular regions of Canada. However, no restriction is placed on subject matter, and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Manuscript reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts*.

Manuscript reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-900 in this series were issued as Manuscript Reports (Biological Series) of the Biological Board of Canada, and subsequent to 1937 when the name of the Board was changed by Act of Parliament, as Manuscript Reports (Biological Series) of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 1426 - 1550 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Manuscript Reports. The current series name was changed with report number 1551.

Rapport manuscrit canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3176

2019

# État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 4, Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, Québec

par

Scott A. Ryan[1], Gary Wohlgeschaffen[1], Nusrat Jahan[1], Haibo Niu[2], Alice C. Ortmann[1], Trevor N. Brown[1], Thomas L. King[1], et Jason Clyburne[3]

1. Centre de recherche sur le pétrole, le gaz et autres sources d'énergie extracôtières, Pêches et Océans Canada, Institut océanographique de Bedford, Dartmouth, NS B2Y 4A2
2. Département d'ingénierie, Université Dalhousie, Truro, NS B2N 5E3
3. Département de chimie, Université Saint Mary's, Halifax, NS B3H 3C3

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2019
Cat. N ° Fs97-4/3176F-PDF ISBN 978-0-660-30897-5 ISSN 1488-5468

La présente publication doit être citée comme suit :

Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J. 2019. État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 4, Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, Québec. Rapp. manuscrit can. sci. halieut. et aquat. 3176: viii + 43 p.

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé ..... vii
Abstract ..... viii
1 Introduction ..... 1
2 Hydrographie ..... 6
2.1 Bathymétrie ..... 6
2.2 Circulation ..... 12
2.3 Marées ..... 14
2.4 Bassin hydrographique ..... 17
2.5 Salinité, température et oxygène dissous ..... 22
3 Climat ..... 28
3.1 Température et précipitations ..... 28
3.2 Vent et vagues ..... 29
4 Déversements de pétrole précédents ..... 32
*4.1 Irving Whale* ..... 34
*4.2 NEPCO 140* ..... 34
*4.3 Richelieu* ..... 35
4.4 Camion-citerne ..... 35
4.5 Remorqueur ..... 35
4.6 Déversement de carburant diesel à Longueuil ..... 35
5 Conclusions ..... 37
6 Références ..... 38

## FIGURES

Figure 1. Zone d'étude du fleuve Saint-Laurent ..... 2

Figure 2. Sections du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1993) ..... 3

Figure 3. Bathymétrie du golfe du Saint-Laurent (Dunbar *et al.* 1980) ..... 4

Figure 4. Indices de sensibilité environnementale dans les régions du fleuve Saint-Laurent (Houston *et al.* 2013)..... 5

Figure 5. Estuaire du fleuve (Centre Saint-Laurent 1996b) ..... 7

Figure 6. Haut estuaire et rivière Saguenay (Centre Saint-Laurent 1996a)..... 8

Figure 7. Bathymétrie du haut estuaire (Centre Saint-Laurent 1991) ..... 9

Figure 8. Haut estuaire et bas estuaire (Bourgault 2001)..... 10

Figure 9. Bas estuaire et golfe (Centre Saint-Laurent 1996b) ..... 11

Figure 10. Profils des courants dans le passage du Nord à l'île-aux-Lièvres 1) une heure avant la marée haute, 2) deux heures après la marée haute, 3) trois heures après la marée haute, 4) deux heures avant la basse mer, 5) trois heures après la basse mer (Bourgault *et al.* 2001) ..... 13

Figure 11. Courants dans le bas estuaire et dans le golfe (Centre Saint-Laurent 1991) ..... 14

Figure 12. Variations de l'amplitude des marées dans le Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1996b)..... 15

Figure 13. Modification des ondes de marée entre Sainte-Anne-des-Monts et Montréal (Godin 1979)..... 16

Figure 14. Débit mensuel moyen du Saint-Laurent à la hauteur de la ville de Québec en noir et données climatologiques mensuelles de 1981 à 2010 plus et moins un demi-écart-type en bleu (Galbraith *et al.* 2014a) ..... 18

Figure 15. Débit annuel moyen du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de la ville de Québec et de la somme de tous les cours d'eau se jetant dans l'estuaire, avec les moyennes climatologiques pour la période allant de 1981 à 2010 comme lignes horizontales et sur le côté droit des cartes de pointage. Les cartes de pointage rendent compte des anomalies normalisées, les couleurs rouge, bleu et blanc représentant des valeurs positives, négatives et non significatives, respectivement, et l'intensité étant représentée par une zone ombrée (Galbraith *et al.* 2015)..... 19

Figure 16. Industrie pétrolière le long du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1996b) ..... 20

Figure 17. Emplacements géographiques dans le haut estuaire du fleuve Saint-Laurent ..... 23

Figure 18. Stratification de l'eau dans le réseau du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1991) ..... 25

Figure 19. Température annuelle moyenne de la couche intermédiaire froide (CIL) à la mi-juillet (Galbraith *et al.* 2014b) ..... 25

Figure 20. Profil estival de la salinité, de la température et de la densité dans le bas estuaire du Saint-Laurent (de Vernal *et al.* 2011) ..... 26

Figure 21. Température (bleu) et oxygène dissous (vert) à 300 m dans le bas estuaire (Galbraith *et al.* 2014b) ..... 27

Figure 22. Température mensuelle moyenne à Mont-Joli, au Québec (The Weather Network 2019) ..... 29

Figure 23. Précipitations mensuelles moyennes à Mont-Joli, au Québec (The Weather Network 2019) ..... 29

Figure 24. Direction des vents dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent; la taille des flèches est proportionnelle à la vitesse du vent (Koutitonsky et Bugden 1991) ..... 30

## TABLEAUX

Tableau 1. Débit moyen mensuel du fleuve Saint-Laurent près de la ville de Québec, entre 1955 et 1999 (Bourgault et Koutitonsky 1999) ..... 17

Tableau 2. Rejets des raffineries de pétrole le long du fleuve Saint-Laurent en 2011 et 2012 (Pineault 2014) ..... 20

Tableau 3. Concentration des solides en suspension de Kingston, en Ontario, à l'île d'Orléans ..... 21

Tableau 4. Incidents et accidents survenus au port de Montréal et dans la Voie maritime du Saint-Laurent d'après le Bureau de la sécurité des transports du Canada ..... 33

## RÉSUMÉ

Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J. 2019. État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 4, Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, Québec. Rapp. manuscrit can. sci. halieut. et aquat. 3176: viii + 43 p.

L'augmentation de la production de pétrole et du trafic de navires-citernes au Canada accroît le risque de déversements accidentels de produits pétroliers dans les eaux canadiennes. En réaction à ces changements, le gouvernement du Canada a annoncé le système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes et créé le Comité d'experts indépendant sur la sécurité des navires-citernes afin d'examiner la préparation et l'intervention du Canada en cas de déversement de produits pétroliers provenant de navires. Suivant les recommandations du Comité, le gouvernement du Canada établit des plans d'intervention pour quatre zones pilotes où le trafic de navires-citernes est le plus élevé au Canada: Saint-Jean (Nouveau-Brunswick), Port Hawkesbury et le détroit de Canso (Nouvelle-Écosse), la Voie maritime du Saint-Laurent (Québec) et la partie sud de la Colombie-Britannique.

Le présent rapport est le quatrième volume de cinq et contient de l'information pertinente relativement à l'élaboration d'un plan d'intervention régional pour la Voie maritime du Saint-Laurent, au Québec. Le premier volume du présent rapport contient des renseignements introductifs sur les produits pétroliers et les déversements et devrait accompagner les volumes suivants.

## ABSTRACT

Ryan, S.A., Wohlgeschaffen, G., Jahan, N., Niu, H., Ortmann, A.C., Brown, T.N., King, T.L., et Clyburne, J. 2019. État des connaissances sur le devenir et le comportement des déversements de produits pétroliers provenant de navires: Volume 4, Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, Québec. Rapp. manuscrit can. sci. halieut. et aquat. 3176: viii + 43 p.

Increasing Canadian oil production and tanker traffic elevates the risk of accidental oil spills in Canadian waters. In response, the Government of Canada announced the World Class Tanker Safety System and created the independent Tanker Safety Expert Panel to review Canada's ship-source oil spill preparedness and response. Using the panel's recommendations, the Government of Canada is establishing response plans for four pilot areas which have the highest tanker traffic in Canada: Saint John, NB, Port Hawkesbury and Canso Strait, NS, St. Lawrence Seaway, Qc, and the southern portion of British Columbia.

This is the fourth volume of a five volume report and contains information relevant to developing an area response plan for the St. Lawrence Seaway, Québec. The first volume of this report contains introductory information on oil products and spills and should accompany subsequent volumes.

# 1 INTRODUCTION

En novembre 2013, le Comité d'experts du Système de sécurité de classe mondiale pour les navires-citernes (SSCMNC) a produit son premier rapport (Houston et al 2013). En réponse à la recommandation du Comité, le gouvernement du Canada souhaite élaborer et mettre en œuvre des plans d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures adaptés dans les quatre zones pilotes suivantes :

- Saint-Jean et la baie de Fundy, au Nouveau-Brunswick.
- Port Hawkesbury et le détroit de Canso, en Nouvelle-Écosse.
- Voie maritime du Saint-Laurent, de Montréal à Anticosti, dans la province du Québec.
- Détroit de Georgie et détroit de Juan de Fuca, en Colombie-Britannique.

Dans le cadre de cette initiative, un rapport en cinq volumes a été rédigé afin de fournir une revue générale des facteurs susceptibles d'influencer les déversements d'hydrocarbures et l'intervention dans les quatre zones pilotes. Le présent rapport se veut un outil pratique plutôt qu'un examen détaillé de la science des déversements d'hydrocarbures ou des scénarios précis qui pourraient survenir.

Le volume 1 du rapport fournit des renseignements communs à l'ensemble de l'étude, notamment sur les produits pétroliers manutentionnés dans les ports, le devenir et le transport des déversements d'hydrocarbures, la modélisation du devenir et du comportement des hydrocarbures déversés, un résumé des méthodes actuellement utilisées dans le cadre des interventions opérationnelles, les techniques utilisées pour surveiller et suivre les déversements, et un aperçu des technologies en cours d'élaboration. Quatre volumes supplémentaires fournissent des renseignements sur l'hydrographie, l'océanographie, le climat, des études de cas de déversements et, lorsqu'elle est disponible, la modélisation des déversements pour chacun des quatre ports pilotes choisis, dans l'ordre indiqué précédemment.

Le présent volume porte sur la région entourant la Voie maritime du Saint-Laurent, au Québec (Figure 1). Le Saint-Laurent est l'une des voies navigables commerciales les plus importantes au monde et constitue un atout socio-économique important pour le Canada et le centre industriel des États-Unis, reliant l'océan Atlantique aux Grands Lacs (gouvernement du Canada 2017). En tant que l'un des trois plus grands fleuves du continent nord-américain, le Saint-Laurent s'étend des Grands Lacs laurentiens au golfe du Saint-Laurent et est alimenté par deux grands bassins hydrographiques : les Grands Lacs, qui sont régularisés à la station de Cornwall et la rivière des Outaouais, qui est régularisée à la centrale électrique de Carillon, à l'ouest de Montréal. Avec une superficie de 1 610 000 km$^2$, le bassin du Saint-Laurent est le treizième plus grand bassin hydrographique du monde. En tout temps, le fleuve Saint-Laurent contient jusqu'à 25 % de l'eau douce de la planète et influe sur les processus environnementaux à l'échelle de l'ensemble du continent nord-américain. Le ruissellement total d'eau douce dans le fleuve Saint-Laurent, la rivière Saguenay, les rivières qui se trouvent le long de la côte nord et les cours d'eau de la rive sud, dont la contribution est plus faible,

régissent la circulation estuarienne dans le golfe du Saint-Laurent (Dufour et Ouellet 2007).

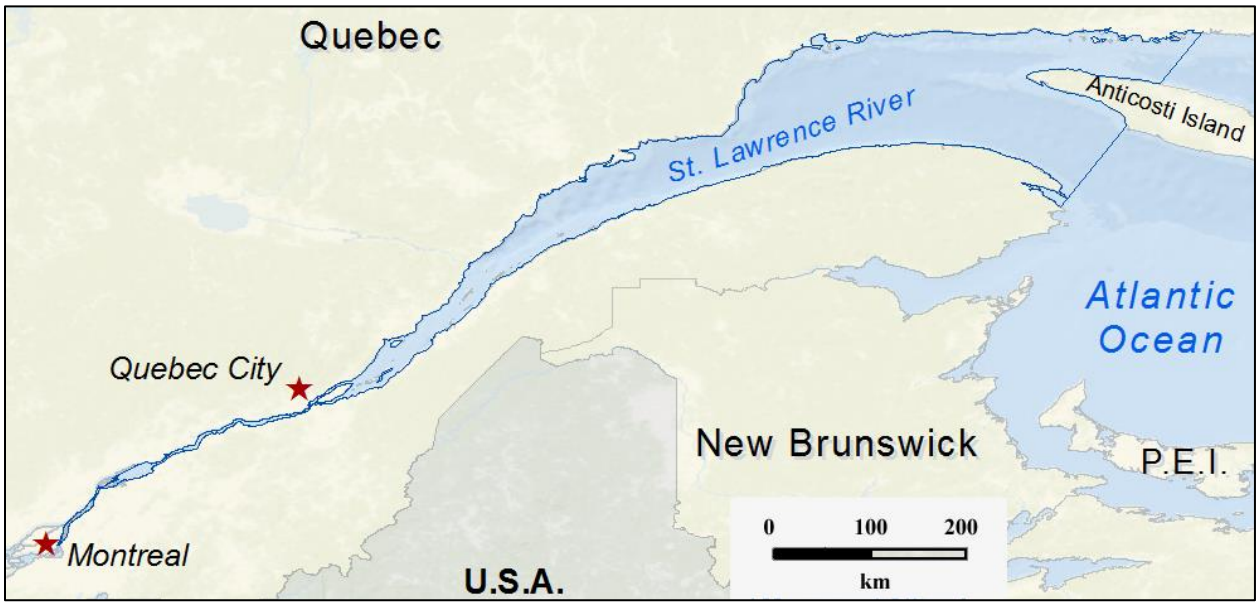


**Figure 1. Zone d'étude du fleuve Saint-Laurent**

Du lac Ontario vers la mer, on peut observer le fleuve et l'estuaire par sections en fonction de leurs propriétés physiques, avec des limites qui varient selon l'autorité citée ou l'utilisation prévue (Dunbar *et al*. 1980), mais nous utiliserons les limites illustrées à la Figure 2 (Centre Saint-Laurent 1993): 1. Mille-Isles, 2. Rapides internationaux, 3. Fleuve (tronçon fluvial), 4. Estuaire du fleuve, 5. Haut estuaire, 6. Bas estuaire et 7. Golfe. La zone d'étude ne comprend pas les sections 1 ou 2 et ne s'étend que jusqu'à la pointe ouest de l'île d'Anticosti, dans le golfe.

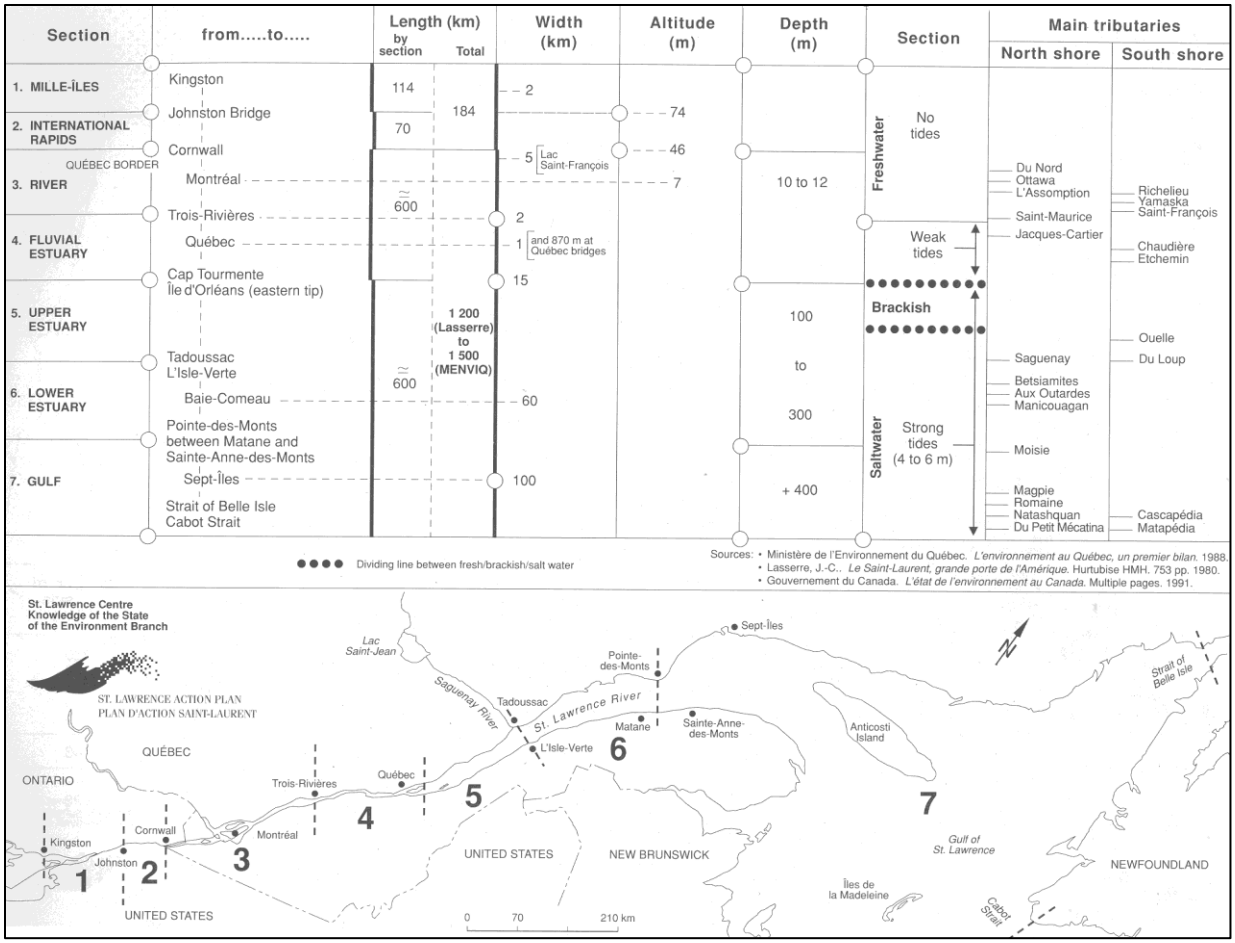


**Figure 2. Sections du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1993)**

L'estuaire et le golfe sont reliés à l'océan Atlantique par le chenal Laurentien. L'extrémité nord du chenal se divise en deux cuvettes secondaires qui détournent l'eau vers le nord et le sud de l'île d'Anticosti. Une partie de cette eau se déplace plus au nord-est, dans le détroit de Belle Isle. Près du détroit de Cabot, les profondeurs peuvent dépasser 500 m (Figure 3), alors qu'ailleurs dans le golfe, elles s'échelonnent entre 100 et 400 m.

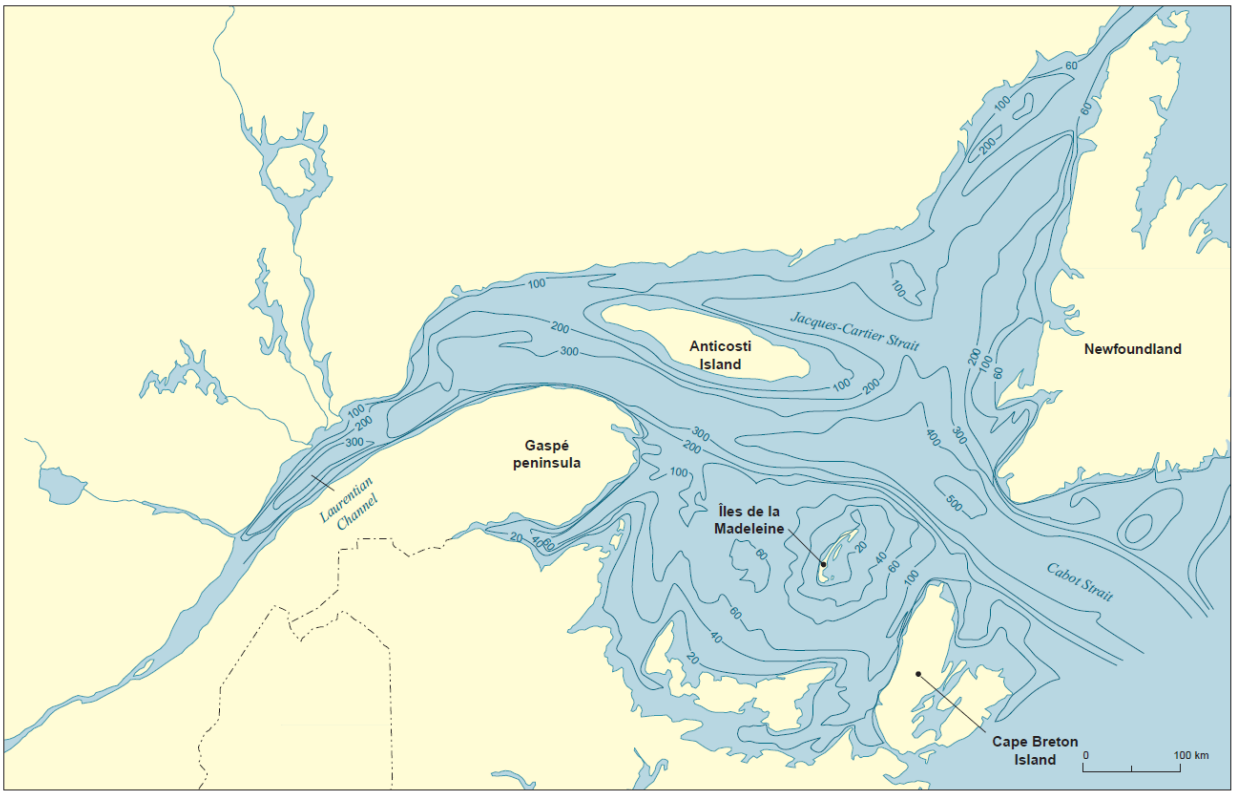


**Figure 3. Bathymétrie du golfe du Saint-Laurent (Dunbar *et al.* 1980)**

Un rapport récent (Houston *et al.* 2013) considère le golfe du Saint-Laurent et la côte sud de la Colombie-Britannique comme étant les régions canadiennes les plus vulnérables face à un déversement de pétrole. Un tel déversement aurait de graves impacts environnementaux et socio-économiques, compte tenu des caractéristiques côtières (marées et bancs de sable, par exemple), de la faune (mollusques, poissons, oiseaux, etc.) et des activités humaines dépendant de ces ressources.

En outre, la voie Grands lacs–Voie maritime du Saint-Laurent est une voie navigable d'importance géographique, hydrologique et économique qui peut accueillir des navires à fort tirant d'eau et qui s'étend sur 4 000 km du détroit de Cabot à la tête des Grands Lacs jusqu'à North River, au Minnesota. La partie de la Voie maritime du Saint-Laurent s'étend de Montréal au lac Érié, en passant par le Québec et l'Ontario, et est contiguë à une section de la frontière canado-américaine. Elle soutient 15 grands ports et 50 ports régionaux, tous reliés à 40 autoroutes provinciales et interétatiques et à une trentaine de lignes ferroviaires, ce qui en fait une voie de transport internationale vitale (New World Encyclopedia 2015).

Le port de Montréal est un point de transbordement international, une plaque tournante pour les principaux oléoducs et le seul port à conteneurs du fleuve Saint-Laurent. Plus de 100 postes d'amarrage accueillent des marchandises en provenance de plus de 200 ports internationaux, y compris des céréales et d'autres denrées sèches en vrac, des produits pétroliers, d'autres biens de consommation liquides en vrac, des machines

et du sucre. Dans le port, on a manutentionné 28 422 003 tonnes de marchandises en 2012, et on a transporté une moyenne annuelle de 20 millions de tonnes de marchandises au cours des dix dernières années.

La capacité d'intervention en cas de déversement de pétrole dans le Saint-Laurent est limitée à 15 000 tonnes de pétrole (environ 105 000 barils). Dans des conditions idéales, on peut s'attendre à ce que la récupération physique maximale des hydrocarbures déversés soit de 30 % (Environnement Canada *et al.* 2013), et à ce que ce taux de récupération soit vraisemblablement beaucoup plus faible dans l'eau froide et les milieux glacés (Engelhardt 1994; Lee *et al.* 2011). Les principaux risques seraient les déversements causés par des accidents à l'échelon des navires-citernes et des oléoducs.

Pour la zone d'étude (Figure 1), qui s'étend du fleuve Saint-Laurent à la pointe ouest de l'île d'Anticosti, dans le golfe du Saint-Laurent, les indices de sensibilité environnementale (Figure 4) indiquent que les zones d'impact potentiel le plus élevé se trouvent dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, particulièrement près du littoral (WSP Canada 2014).

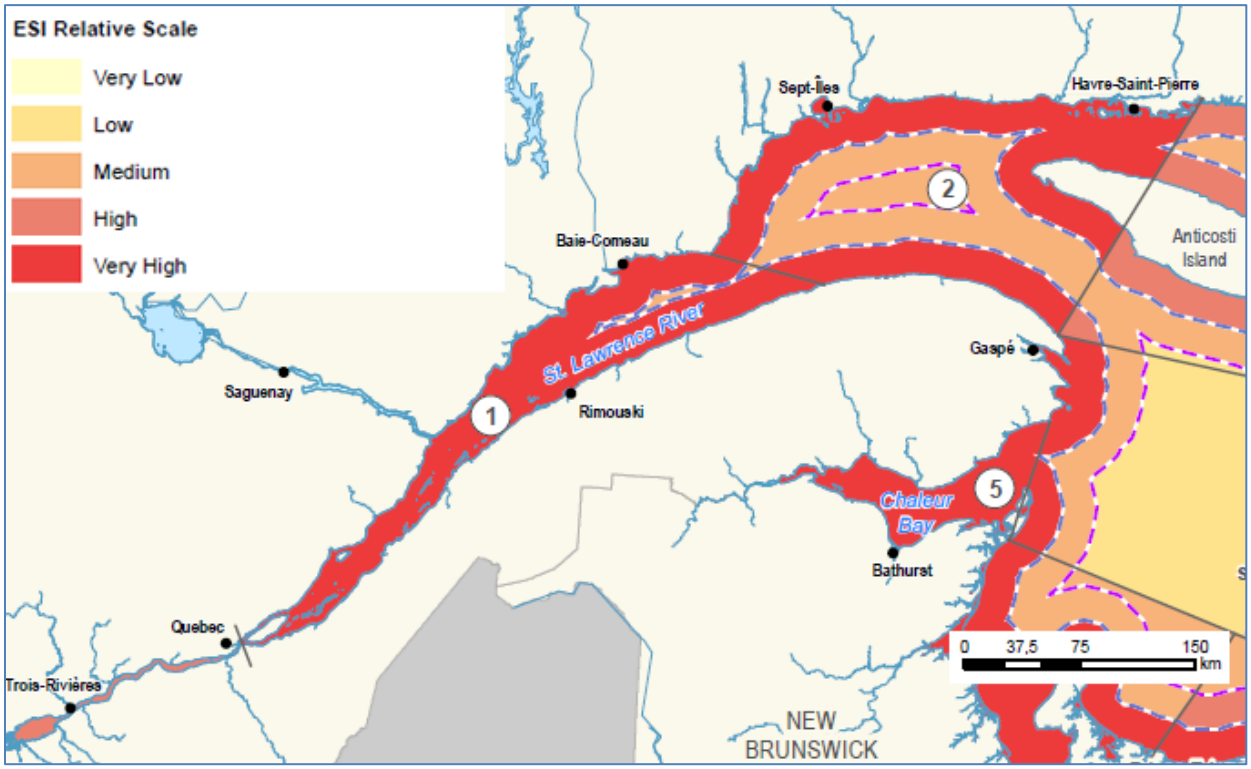


**Figure 4. Indices de sensibilité environnementale dans les régions du fleuve Saint-Laurent (Houston *et al.* 2013)**

# 2 HYDROGRAPHIE

## 2.1 BATHYMÉTRIE

### *2.1.1 Fleuve Saint-Laurent*

Le tronçon fluvial, long de 240 km, traverse une région fortement industrialisée entre Cornwall, en Ontario, et Pointe-du-Lac, sur le lac Saint-Pierre (Trois-Rivières), au Québec, et contient des milieux humides, des rapides, des lacs et plus de 100 îles (Centre Saint-Laurent 1991, 1993, 1996b). Il n'y a pas d'incidence des marées le long de ce tronçon. L'eau qui pénètre dans le tronçon fluvial à partir des affluents ne se mélange pas toujours, mais l'eau brune tachée d'humus de la rivière des Outaouais s'écoule le long des eaux vertes et relativement claires des Grands Lacs (Vincent et Dodson 1999), créant des contrastes écologiques saisissants (Centre Saint-Laurent 1996b).

L'estuaire du fleuve, de Trois-Rivières à la pointe est de l'île d'Orléans, est long d'environ 160 km et large de 2 à 5 km (Figure 5, mais de seulement 870 m aux ponts de la ville de Québec) et compte moins de milieux humides et plus de battures rocheuses soumises à l'action des marées (Centre Saint-Laurent 1991, 1996b). Le fleuve et son estuaire affichent la biodiversité de faune et de flore la plus élevée (Centre Saint-Laurent 1996b). L'amplitude moyenne des marées vers la fin de ce tronçon, à la ville de Québec, est de 4,1 m, atteignant 5,8 m lors des marées de vives-eaux. Une inversion des courants et un brassage important sont observés à la marée montante, de sorte que cette partie du fleuve ne présente pas les gradients des masses d'eau entre les chenaux qui sont typiques de ce tronçon fluvial. Les courants de jusant et les courants du fleuve, combinés, peuvent engendrer un débit instantané de 75 000 $m^3/s$ (Vincent et Dodson 1999).

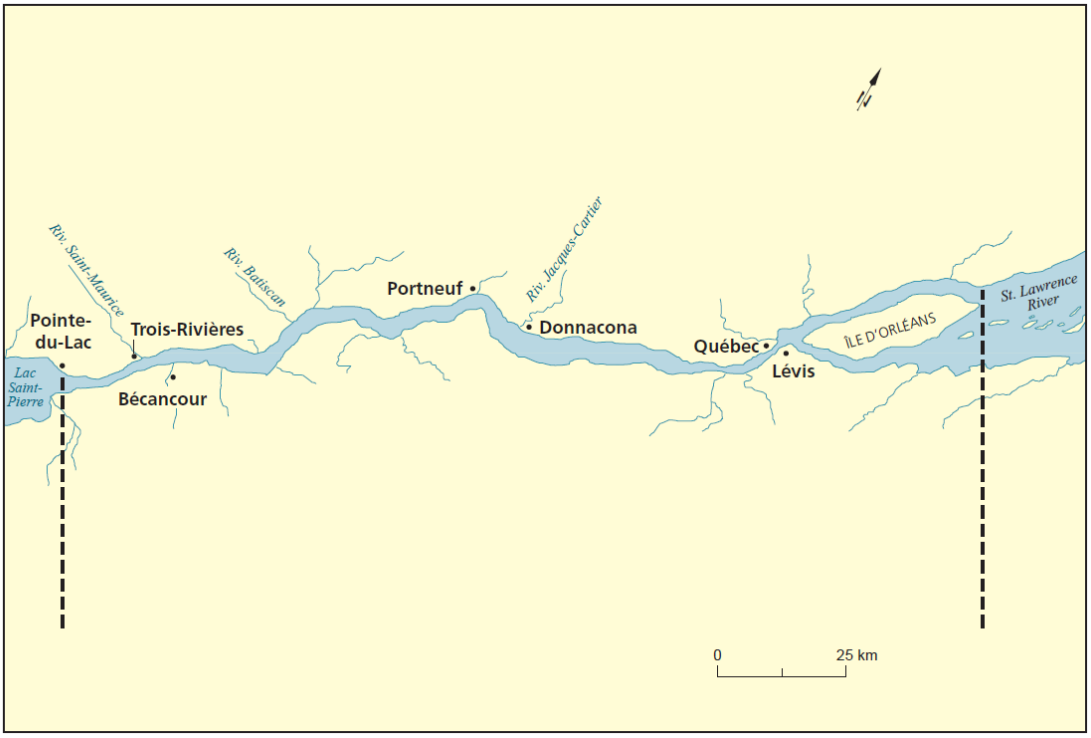


**Figure 5. Estuaire du fleuve (Centre Saint-Laurent 1996b)**

### *2.1.2 Haut estuaire du Saint-Laurent*

Le haut estuaire (Figure 6) s'étend sur 180 km depuis la limite terrestre de l'intrusion saline, à la pointe est de l'île d'Orléans (Neu 1970), jusqu'à la tête de la vallée glaciaire profonde appelée le chenal Laurentien, près de Tadoussac. Il affiche une largeur d'environ 2 km dans le tronçon fluvial et s'élargit à environ 25 km près de Tadoussac (moyenne = 17 km de largeur), et couvre quelque 3 277 km$^2$ (Centre Saint-Laurent 1991). Les courants et les marées de forte intensité entraînent le mélange dans cette zone de transition entre les eaux douces et les eaux salées, et la turbidité tend à être élevée entre l'île d'Orléans et l'île aux Coudres (Centre Saint-Laurent 1991). La profondeur moyenne est inférieure à 10 m et la turbulence diminue de l'île aux Coudres à Tadoussac, de sorte que la colonne d'eau devient partiellement stratifiée (Bourgault 2001; Neu 1970), la salinité variant de 0,5 à 25 ppm (Vincent et Dodson 1999).

Dans le haut estuaire, plus de 90 % de l'énergie cinétique totale de l'écoulement est due à la seule action des marées (Muir 1982). Au fur et à mesure que l'estuaire devient plus étroit et moins profond, l'amplitude des marées augmente. L'amplitude maximale des marées, qui se chiffre à près de 5 m, est observée à Saint-François-de-l'île-d'Orléans (Godin 1979). L'amplitude des marées et les courants diminuent ensuite rapidement dans le tronçon fluvial vers l'intérieur des terres à partir de la ville de Québec, en raison de l'augmentation du frottement du fond. À

Trois-Rivières, l'amplitude des marées est réduite à moins de 0,2 m (Bourgault 2001; Godin 1979).

**Figure 6. Haut estuaire et rivière Saguenay (Centre Saint-Laurent 1996a)**

La bathymétrie du haut estuaire est compliquée par la présence de trois chenaux d'écoulement de plus de 10 m de profondeur, dont l'un traverse la rivière du nord au sud entre l'île aux Coudres et l'archipel de l'Isle-aux-Grues (Figure 7). À Saint-Siméon, des profondeurs de plus de 100 m ont été enregistrées dans une cuvette d'une cinquantaine de kilomètres de long. La région compte bon nombre d'îles, de cuvettes profondes, de bancs peu profonds et de seuils, dont le plus spectaculaire est le seuil du Saguenay, près de Tadoussac, qui chute sur 250 m dans un passage qui s'étend jusqu'à 20 km vers l'est. Inclus dans le haut estuaire, le fjord du Saguenay (profondeur maximale = 320 m) s'étend sur plus de 100 km, et le seuil, à son embouchure, limite l'écoulement entre ses masses d'eau à partir du fleuve Saint-Laurent, bien que certains échanges se produisent encore (Belzile *et al.* 2016; Centre Saint-Laurent 1991, 1996b). Le seuil du Saguenay marque le début du bas estuaire (Figure 8).

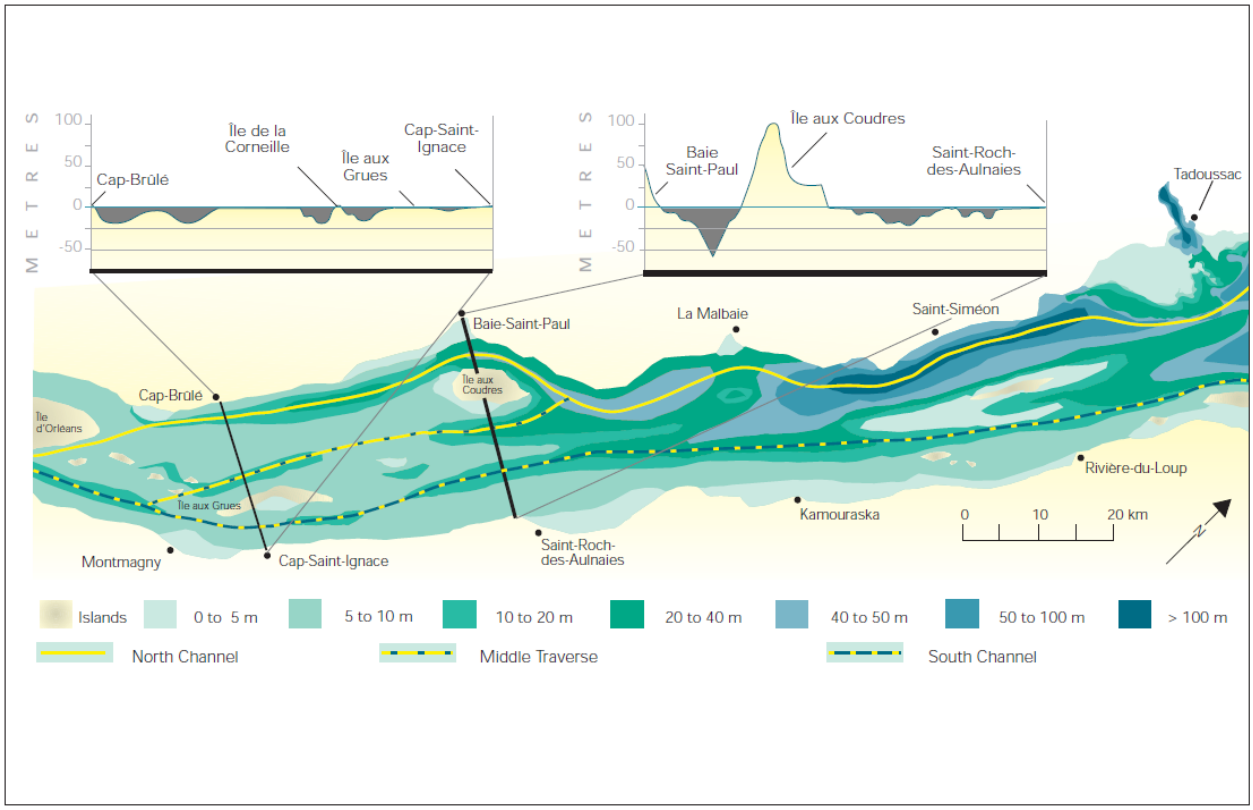


**Figure 7. Bathymétrie du haut estuaire (Centre Saint-Laurent 1991)**

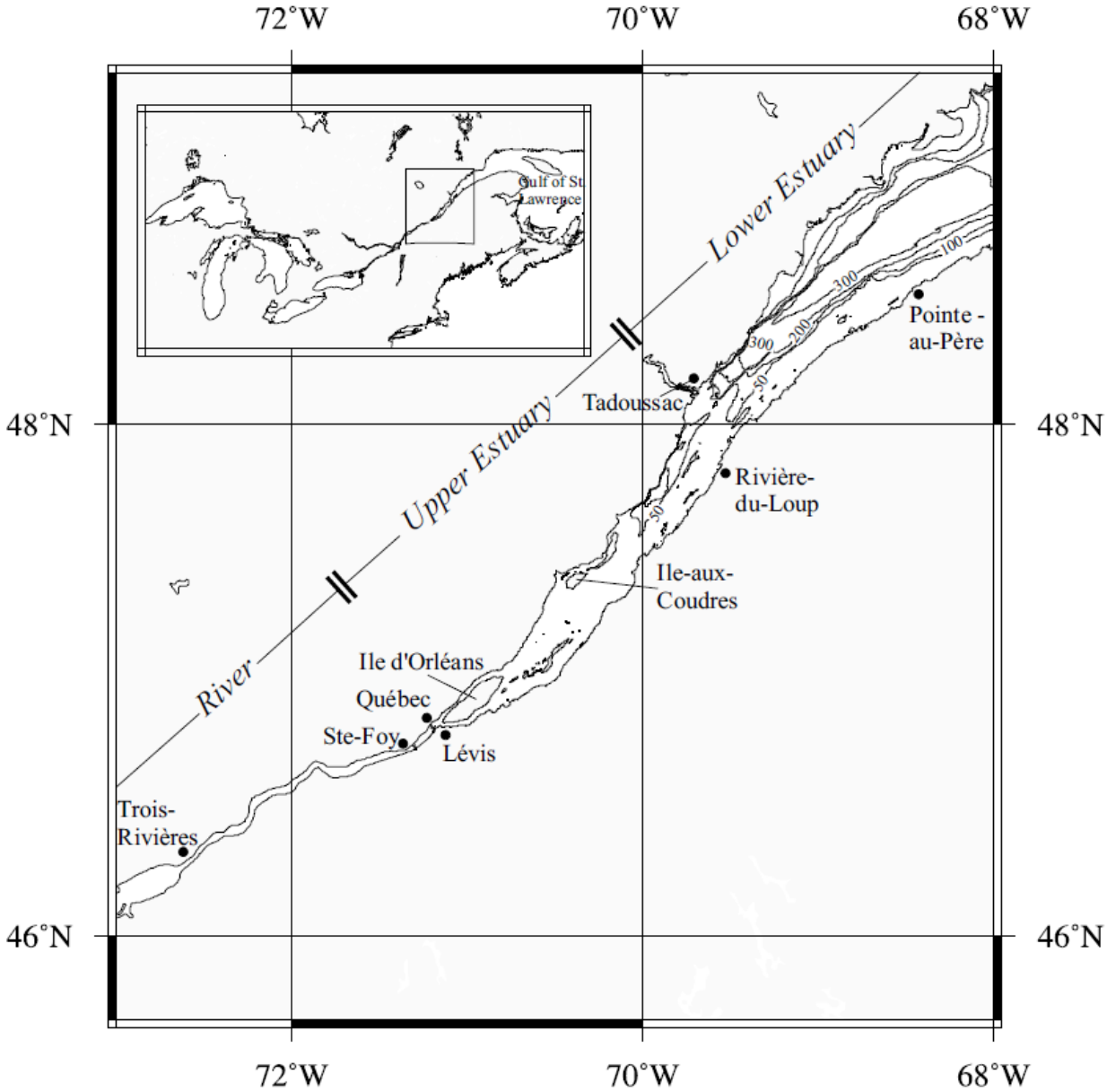


**Figure 8. Haut estuaire et bas estuaire (Bourgault 2001)**

### *2.1.3 Bas estuaire du Saint-Laurent*

Le dernier tronçon de 300 km du fleuve constitue le bas estuaire, qui s'étend sur une superficie de 12 600 km$^2$ (Figure 9) et qui débute à la tête du chenal Laurentien. Cette section affiche une largeur moyenne de 37 km entre Tadoussac et Pointe-des-Monts, avec une largeur maximale d'environ 60 km à Baie-Comeau (Centre Saint-Laurent 1991), et qui s'élargit brusquement près de Pointe-des-Monts, où commence le golfe du Saint-Laurent (Bourgault 2001). La géométrie et la physique diffèrent considérablement entre le haut estuaire et le bas estuaire (El-Sabh 1988).

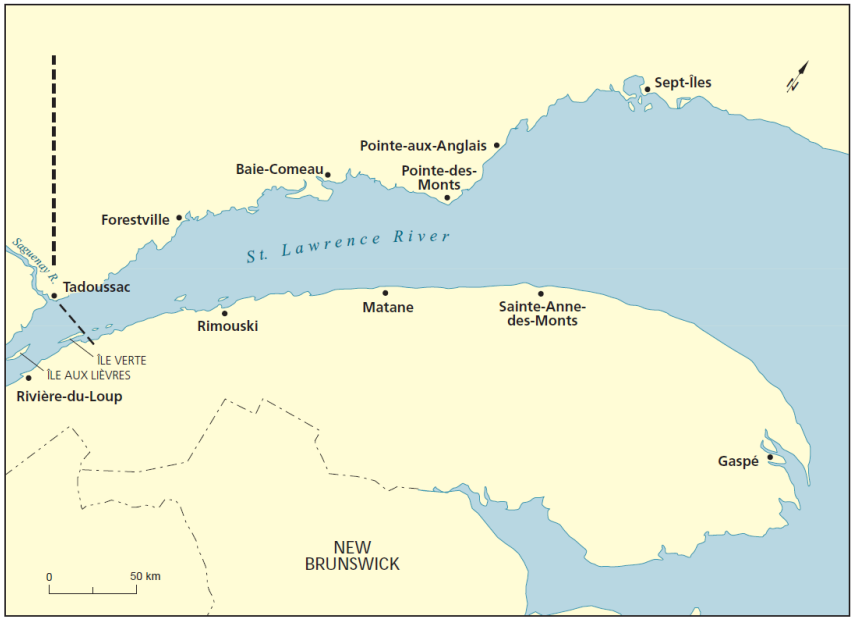


**Figure 9. Bas estuaire et golfe (Centre Saint-Laurent 1996b)**

La circulation et le mélange dans le bas estuaire sont fortement influencés par les marées, la pression barométrique, la température de l'air, le vent, les apports locaux d'eau douce, le relief côtier, la bathymétrie et la rotation terrestre. Le bas estuaire du Saint-Laurent reçoit en moyenne 12 000 $m^3/s$ d'eau douce par année, avec un débit plus élevé de 40 % pendant les crues printanières, ce qui crée une circulation par forçage de flottabilité (Neu 1970), outre le mélange qui se produit sous l'action des marées. L'estuaire affiche une structure de densité variable, avec des eaux bien mélangées vers la tête et des eaux plus stratifiées près de l'embouchure (Bourgault 2001; El-Sabh 1988; Neu 1970). La zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée est un front dynamique qui est caractérisé par des salinités oscillant entre 0,2 et 5 ups, avec des gradients marqués dans les propriétés biologiques et la structure du réseau trophique (Vincent et Dodson 1999). En été, trois masses d'eau affichant des températures et des salinités différentes se superposent, contre deux seulement en hiver (Devine 2015; Dunbar *et al.* 1980; Centre Saint-Laurent 1996b).

La modélisation numérique a montré que le mélange dans l'estuaire est plus prononcé près du seuil du Saguenay (Tadoussac), à la tête du chenal Laurentien, près du banc des Anglais et près de l'île aux Coudres (Bourgault 2001), surtout pendant la crue printanière, qui pousse l'intrusion saline vers la mer sur environ 12 km et augmente la circulation résiduelle et le flux massique vertical turbulent. Des volumes élevés d'eau douce se sont traduits par une augmentation de la stabilité de la colonne d'eau dans le haut estuaire, mais par une diminution dans le bas estuaire.

Le bas estuaire se jette dans le golfe (Figure 3), une mer semi-fermée d'environ 195 000 $km^2$ (Centre Saint-Laurent 1996b) contenant environ 3 553 $km^3$

d'eau, qui est presque sept fois plus petite que le golfe du Mexique et qui est bordée par le Québec, le Nouveau-Brunswick, l'Île-du-Prince-Édouard, la Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve-et-Labrador. De Vernal et ses collaborateurs (2011) décrivent brièvement les caractéristiques océanographiques de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, lesquels constitueraient une mer épicontinentale caractérisée par un vaste bassin hydrographique fournissant un débit moyen d'eau douce de 10 900 $m^3/s$ (Bourgault et Koutitonsky 1999).

## 2.2 CIRCULATION

### *2.2.1 Estuaire et fleuve Saint-Laurent*

Outre la fluctuation verticale, les marées astronomiques engendrent des courants horizontaux dont la vitesse peut aller jusqu'à 0,50 m/s dans les chenaux et détroits et jusqu'à 3 m/s dans la région de la ville de Québec (Centre Saint-Laurent 1996b). D'après des simulations mathématiques, on enregistrerait des valeurs de 0,25 m/s ou moins dans le bas estuaire et de 1,0 m/s autour de Tadoussac (El-Sabh et Murty 1990; Centre Saint-Laurent 1996b). En hiver, ces marées déplacent la glace d'avant en arrière, surtout dans le haut estuaire, ce qui limite la formation de banquise côtière (Environnement et Changement climatique Canada 2017).

La différence de densité entre l'eau douce apportée (environ $10^4$ $m^3/s$) dans l'estuaire, près de la ville de Québec, et l'eau océanique, combinée aux forts courants de marée et au mélange turbulent, entraîne une circulation estuarienne. En moyenne, la couche saumâtre de surface (de la surface à environ 30 m de profondeur) s'écoule vers la mer, tandis qu'un écoulement de fond froid et salin de compensation se produit en profondeur pour renouveler les eaux dans les chenaux plus profonds du haut estuaire (Neu 1970). Cette eau dense provient principalement de la couche intermédiaire froide (-1 à 1 °C) (50 - 150 m de profondeur) que l'on retrouve tout au long du bas estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Dickie et Trites 1983; El-Sabh 1988; Galbraith 2017; Koutitonsky *et al.* 1991). Cette couche circule par advection de façon continue vers la terre, à l'intérieur de l'estuaire, par la circulation résiduelle persistante qui est décrite ci-devant par Bourgault (2001).

Les mesures de la vitesse du courant dans le chenal nord du haut estuaire (Figure 10) près de l'île aux Lièvres (à environ 20 km en amont de Tadoussac et 125 km en aval de l'île d'Orléans) pendant les phases de marée donnent à penser qu'il existerait un courant bicouche dans toutes les phases de marée, sauf une heure avant la marée haute et deux heures avant la basse mer (Bourgault *et al.* 2001).

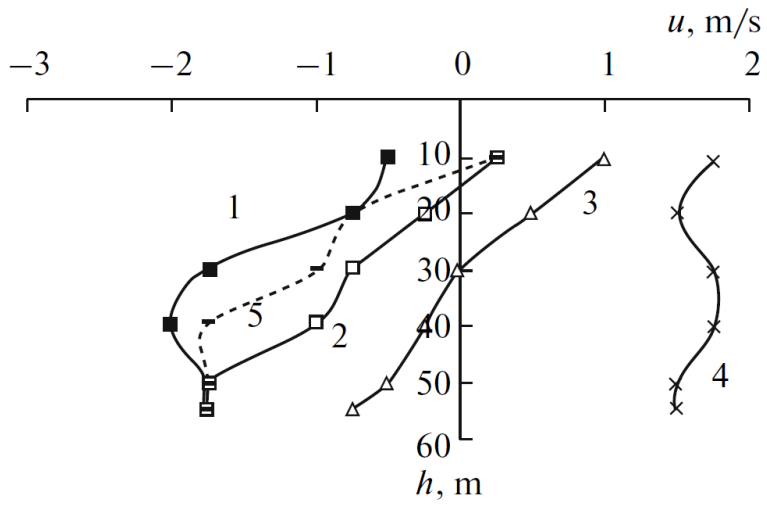


**Figure 10. Profils des courants dans le passage du Nord à l'île-aux-Lièvres 1) une heure avant la marée haute, 2) deux heures après la marée haute, 3) trois heures après la marée haute, 4) deux heures avant la basse mer, 5) trois heures après la basse mer (Bourgault *et al.* 2001)**

Selon la phase de la lune et la quantité d'eau douce qui s'écoule, l'eau profonde et froide du golfe peut pénétrer dans l'estuaire (Koutitonsky 1979). Le transport net (rapporté à la moyenne sur le cycle des marées) s'est révélé être en amont du fleuve. Cependant, le flux résiduel du courant de Gaspé était toujours dirigé vers le golfe.

### *2.2.2 Bas estuaire*

Une grande partie de l'eau qui pénètre dans le golfe à partir de l'estuaire du Saint-Laurent par le détroit d'Honguedo (entre la Gaspésie et l'île d'Anticosti) se déplace le long de la côte sud (Dolgopolova et Isupova 2011) en raison du courant de Gaspé (Figure 11). Elle prend naissance à la tête du bas estuaire, longe la côte sud jusqu'au cap Gaspé, où elle affiche une largeur allant de 15 à 20 km dans les 40 à 50 m supérieurs de la colonne d'eau, et se dissipe sur le plateau continental au large des îles de la Madeleine (Tang et Bennett 1981). Quatre-vingts pour cent (80 %) de l'eau transportée dans les 50 m supérieurs du courant de Gaspé est remontée à partir de la couche de 50 à 100 m, 71 % à partir du nord-ouest du golfe et 9 % à partir du bas estuaire (Bugden 1981). Sur les 20 % restants, 17 % sont attribuables à la recirculation en surface dans les régions adjacentes du golfe et 3 % à l'eau douce déversée par le Saint-Laurent.

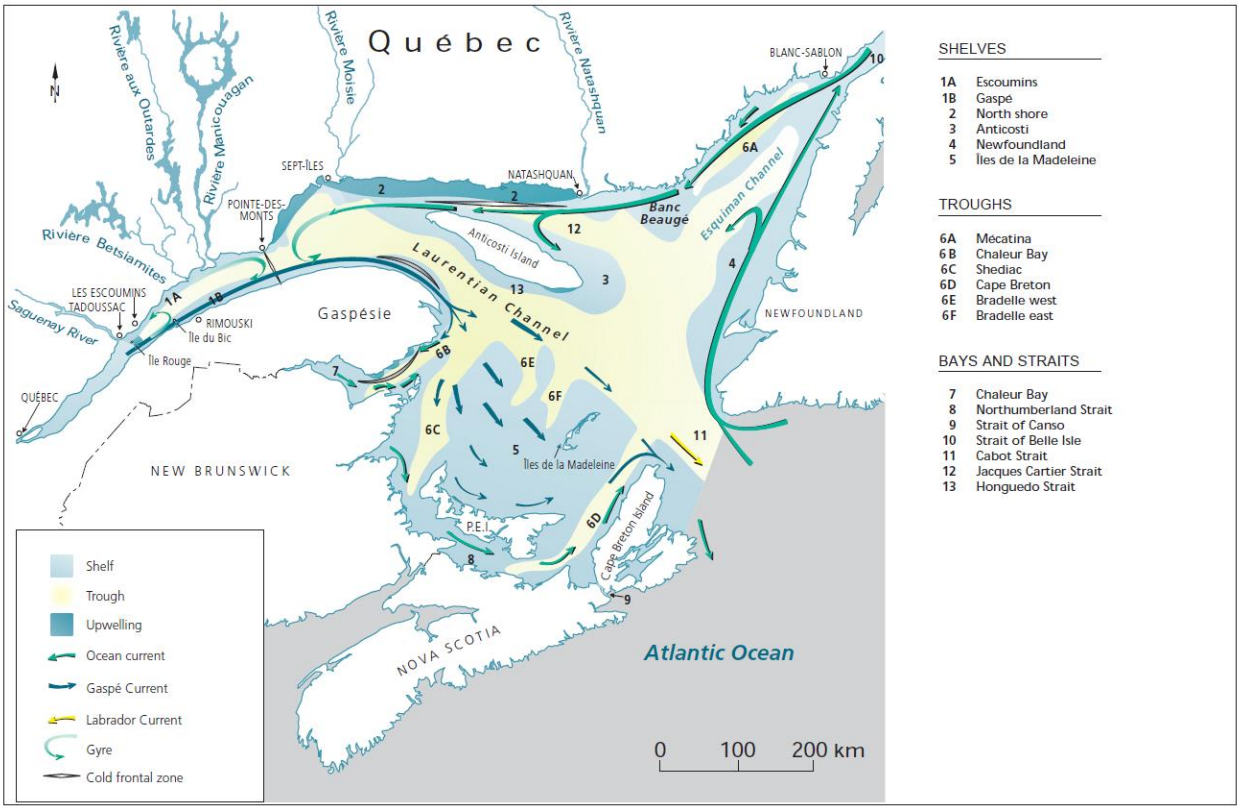


**Figure 11. Courants dans le bas estuaire et dans le golfe (Centre Saint-Laurent 1991)**

## 2.3 MARÉES

Les marées mixtes, semi-diurnes et barotropes de l'océan Atlantique se propagent dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, au-dessus du seuil à la tête du chenal Laurentien, produisant des courants de marée turbulents et renouvelant les bassins d'eau froide des chenaux nord et sud et du fjord du Saguenay (Belzile *et al.* 2016; Bourgault *et al.* 2001; Dolgopolova et Isupova 2011; Drapeau *et al.* 2003; Dufour et Ouellet 2007; El-Sabh et Murty 1990; Farquharson 1962; Saucier et Chasse 2000; Saucier *et al.* 2003). Une onde de marée générée près du détroit de Cabot met près d'une journée pour atteindre le lac Saint-Pierre, en amont de Trois-Rivières (Centre Saint-Laurent 1996b). L'onde semi-diurne résultant de l'action des marées s'amplifie (Figure 12) tandis que l'on remonte l'estuaire (Godin 1979).

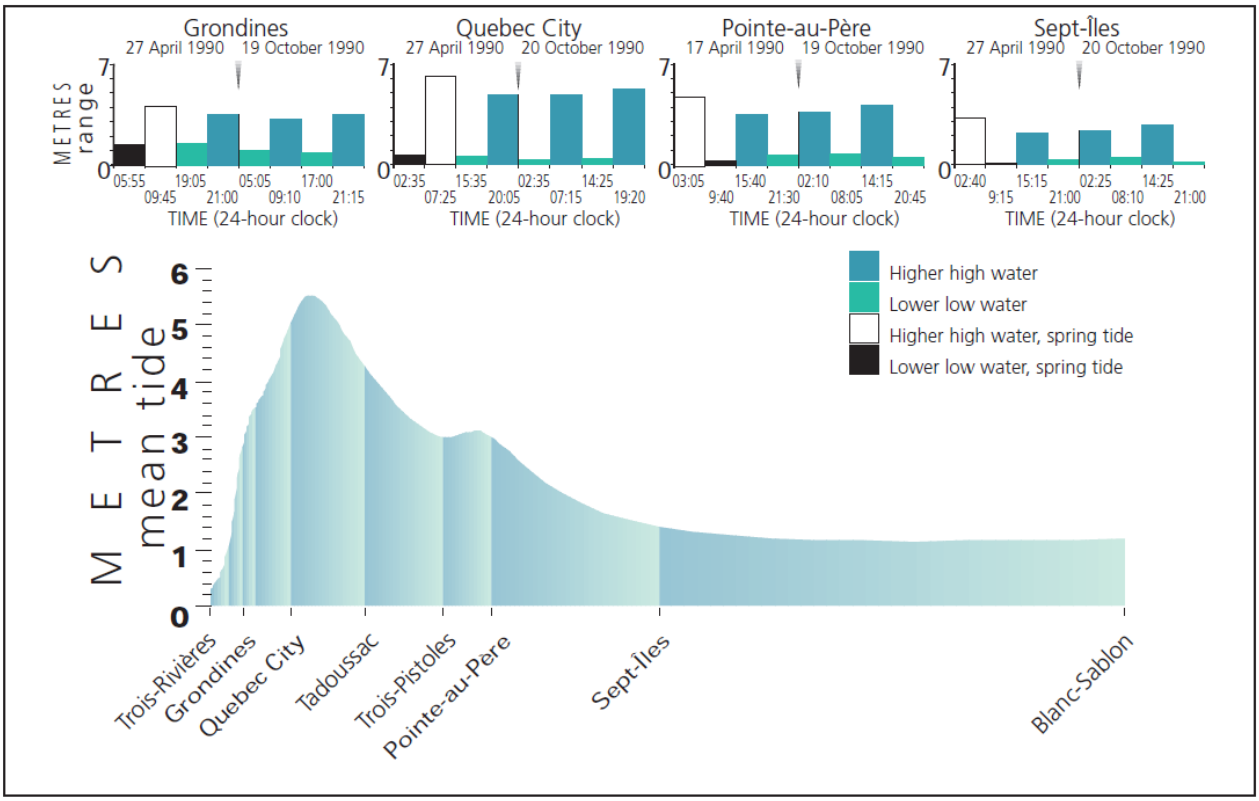


**Figure 12. Variations de l'amplitude des marées dans le Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1996b)**

À l'île d'Anticosti, l'amplitude de la marée de morte-eau est de 1 m et celle de la marée de vive-eau, de 2 m. Les amplitudes moyennes sont de 2,3 m à Sept-Îles, 2,5 m dans la région de Pointe-des-Monts à Mont-Joli, 3,0 m à Pointe-au-Père et 4,1 m près de la ville de Québec (Pêches et Océans Canada 1992). Une hauteur maximale de 4,9 m durant la marée de vive-eau et de 2,8 m durant marée de morte-eau a été observée à la tête de l'estuaire, près de la ville de Québec (de Borne de Grandpré et El-Sabh 1980), et une amplitude de 5,0 à 7,5 m a été enregistrée à la station de jaugeage de Saint-François, à l'extrémité sud-est de l'île d'Orléans, où l'amplitude des marées est connue pour être maximale (Godin 1979).

L'amplitude moyenne des marées à la ville de Québec est de 4,1 m (Centre Saint-Laurent 1993), augmentant à 5,8 m durant les marées de vives-eaux (Robitaille 1998). À la ville de Québec, le débit des marées est de 65 000 $m^3/s$ (Robitaille 1998), soit 4,5 fois le débit moyen du fleuve, qui se chiffre à 12 100 $m^3/s$ (Centre Saint-Laurent 1993). À marée descendante, la somme des marées et du débit du fleuve peut atteindre 75 000 $m^3/s$ au large de l'île d'Orléans (Robitaille 1998). À Montmagny (haut estuaire), le débit moyen total (fleuve et marée) est estimé à 90 000 $m^3/s$ (Centre Saint-Laurent 1991, 1996b). La vitesse du courant dans les rapides Richelieu peut atteindre 10 m/s à marée descendante, comparativement à 4,6 à 7,4 m/s entre les rapides et la ville de Québec (Robitaille 1998).

En amont de la ville de Québec, les marées semi-diurnes montent rapidement et descendent lentement (El-Sabh et Murty 1990), et leur influence s'étend aussi loin en amont que jusqu'au lac Saint-Pierre (Godin 1979). Au-delà du lac Saint-Pierre, les fluctuations quotidiennes du niveau d'eau font place à des fluctuations bimensuelles d'environ 0,20 m (Figure 13). Près de Trois-Rivières, la hauteur maximale des marées ne dépasse jamais 0,2 m (Dolgopolova et Isupova 2011). Les fluctuations du niveau du fleuve à Montréal (0,05 à 0,15 m) se superposent aux marées astronomiques bimensuelles de 0,20 m provenant de l'estuaire (Godin 1979).

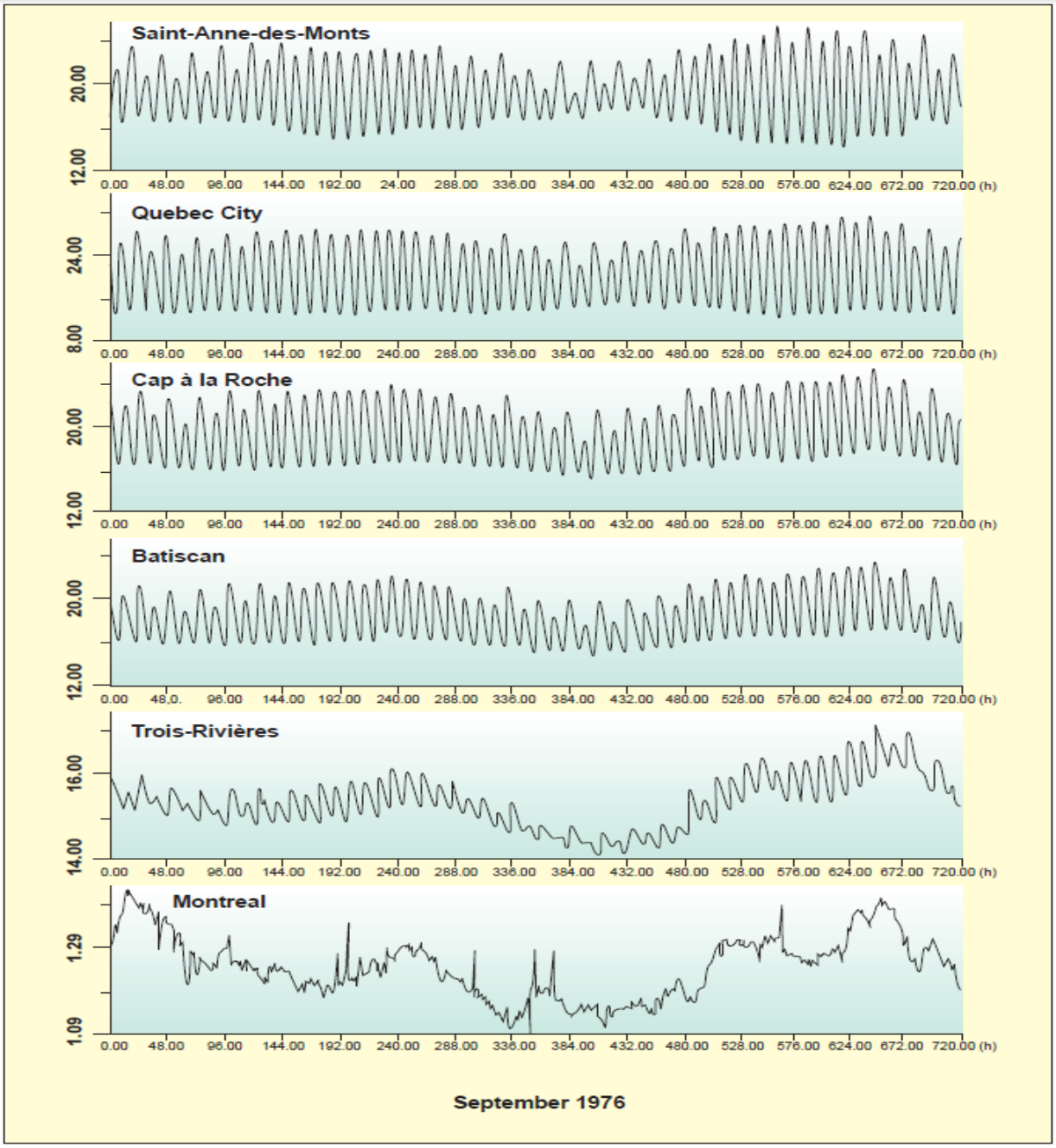


**Figure 13. Modification des ondes de marée entre Sainte-Anne-des-Monts et Montréal (Godin 1979)**

## 2.4 BASSIN HYDROGRAPHIQUE

### *2.4.1 Débit fluvial*

Les apports d'eau douce dans le fleuve, l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent proviennent des nombreux affluents du bassin hydrographique, dont les Grands Lacs (Dufour et Ouellet 2007). Près de la station de jaugeage de Cornwall, le débit moyen est de 7 350 $m^3/s$ (232 $km^3/an$), le débit maximal moyen est de 10 000 $m^3/s$ et le débit minimal moyen est de 4 500 $m^3/s$ (Dolgopolova et Isupova 2011). Le débit annuel moyen à Sorel est de 9 868 $m^3/s$. Pour la ville de Québec, à la tête de l'estuaire, la moyenne se chiffre à 11 300 à 12,000 $m^3/s$, soit 357 à 379 $km^3/an$ (Bourgault et Koutitonsky 1999; Couillard 1987; Koutitonsky 1979). Vers l'embouchure de l'estuaire, elle augmente à 14 400 à 16,800 $m^3/s$ (454 à 530 $km^3/an$) (El-Sabh 1988). Le débit d'eau moyen à long terme (Tableau 1) à la ville de Québec entre 1955 et 1999 était de 12 000 $m^3/s$ ou 379 $km^3/an$ (Bourgault et Koutitonsky 1999).

**Tableau 1. Débit moyen mensuel du fleuve Saint-Laurent près de la ville de Québec, entre 1955 et 1999 (Bourgault et Koutitonsky 1999)**

| | Débit du fleuve ($m^3/s$) | Pourcentage du total annuel |
|---|---|---|
| Janvier | 10 700 | 7,4 |
| Février | 10 700 | 7,4 |
| Mars | 12 000 | 8,3 |
| Avril | 16 800 | 11,7 |
| Mai | 15 800 | 11,0 |
| Juin | 12 400 | 8,6 |
| Juillet | 11 300 | 7,8 |
| Août | 10 600 | 7,4 |
| Septembre | 10 400 | 7,2 |
| Octobre | 10 900 | 7,6 |
| Novembre | 11 400 | 7,9 |
| Décembre | 11 100 | 7,7 |
| Moyenne pour l'année | 12 000 | 8,3 |

Le débit mensuel est relativement uniforme (Tableau 1). Une augmentation jusqu'à environ 17 000 $m^3/s$, avec un maximum de 23 700 $m^3/s$ (1976) d'avril à mai, était due à la fonte des neiges, et les variations du débit du fleuve au cours de chaque mois peuvent être encore plus importantes, selon les conditions synoptiques et les variations du niveau des Grands Lacs (Dolgopolova et Isupova 2011).

La contribution annuelle moyenne, entre 1964 et 2017, de la rivière des Outaouais, le plus important affluent du Saint-Laurent, était de 1 942 $m^3/s$, avec un minimum quotidien moyen de 744 et un maximum quotidien moyen de 5 356 à la centrale

électrique de Carillon, à l'ouest de Montréal (Commission de régularisation de la rivière des Outaouais 2018).

Les données sur le ruissellement des eaux douces dans le fleuve Saint-Laurent, mises à jour mensuellement (Figure 14), sont disponibles auprès de l'Observatoire du Saint-Laurent. Galbraith et ses collaborateurs (2015) ont utilisé RIVSUM (*river sum*) II, un modèle hydrologique à l'échelle du bassin versant, pour estimer le ruissellement mensuel dans les autres grandes rivières qui se jettent dans l'estuaire, et ont constaté que ces rivières contribuent pour environ 5 000 $m^3/s$, l'équivalent de 40 % de la contribution du fleuve Saint-Laurent (Figure 15). On a constaté que la régularisation des cours d'eau influe de façon importante sur le ruissellement.

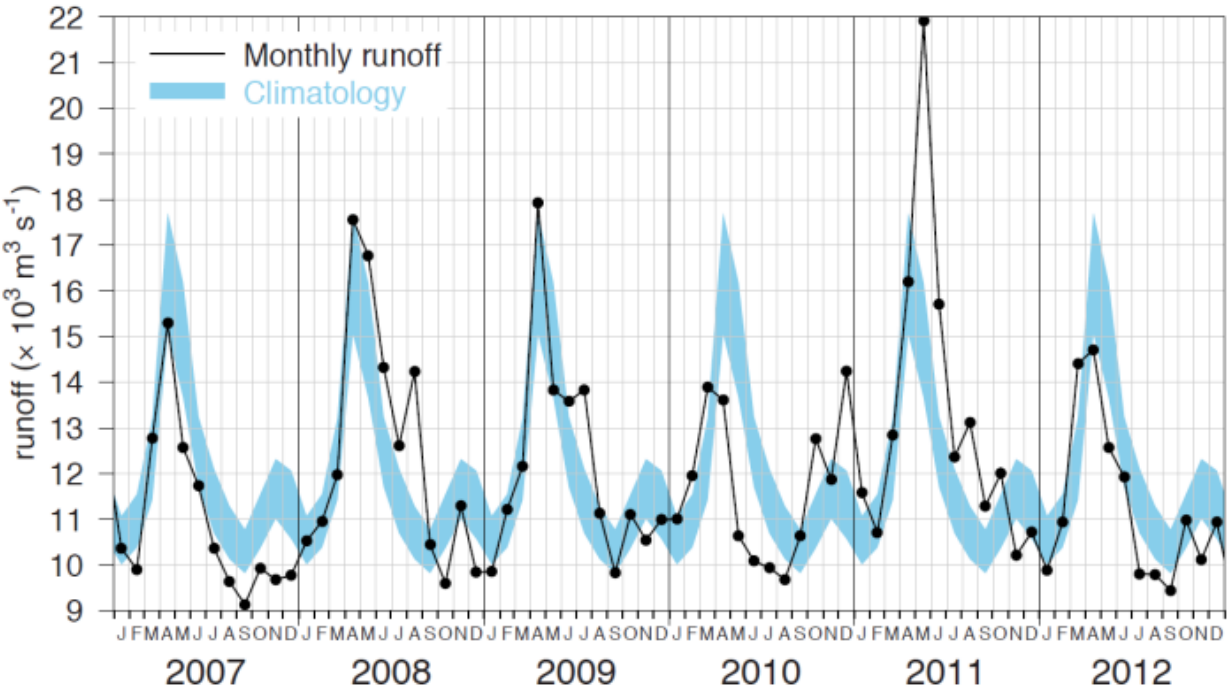


**Figure 14. Débit mensuel moyen du Saint-Laurent à la hauteur de la ville de Québec en noir et données climatologiques mensuelles de 1981 à 2010 plus et moins un demi-écart-type en bleu (Galbraith *et al.* 2014a)**

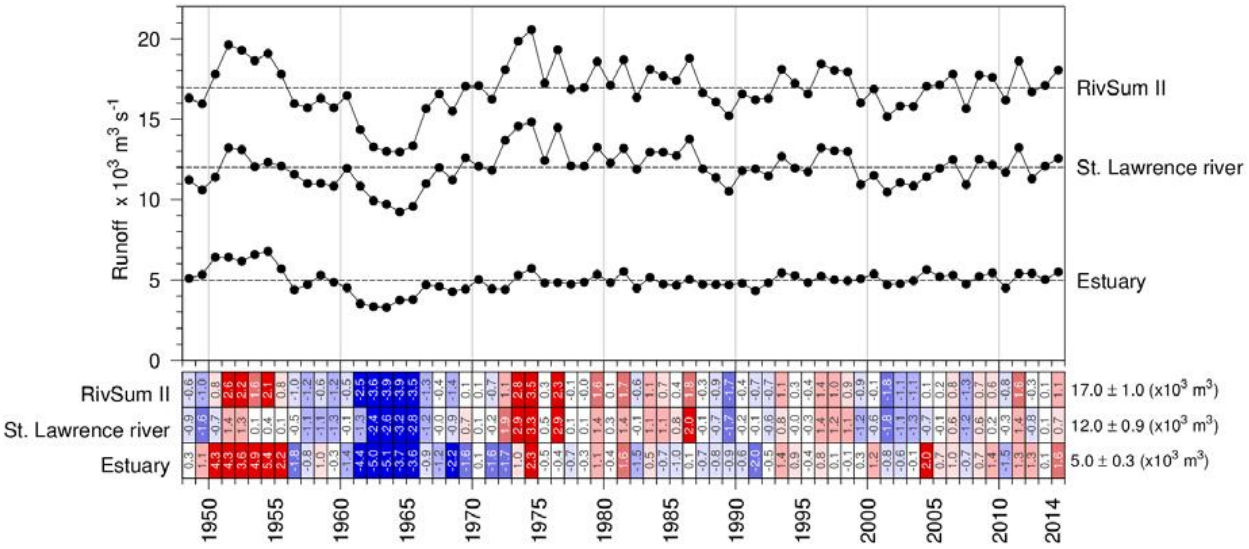


**Figure 15. Débit annuel moyen du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de la ville de Québec et de la somme de tous les cours d'eau se jetant dans l'estuaire, avec les moyennes climatologiques pour la période allant de 1981 à 2010 comme lignes horizontales et sur le côté droit des cartes de pointage. Les cartes de pointage rendent compte des anomalies normalisées, les couleurs rouge, bleu et blanc représentant des valeurs positives, négatives et non significatives, respectivement, et l'intensité étant représentée par une zone ombrée (Galbraith *et al.* 2015).**

### *2.4.2 <u>Eaux usées industrielles</u>*

On compte de nombreux dépôts de produits pétroliers, outre les trois raffineries de pétrole, le long du Saint-Laurent (Figure 16). Suncor et Shell sont présents à l'extrémité est de l'île de Montréal, et Valero est présent à Saint-Romuald. En 1992, les rejets d'eaux usées de ces raffineries ont contribué au déversement quotidien de 74,5 kg d'azote ammoniacal, 160 kg d'huile et de graisse, 743 kg de solides en suspension, 4,4 kg de phénols et 1,3 kg de sulfures dans le fleuve (Centre Saint-Laurent 1996b). On trouvera des renseignements plus détaillés sur les rejets des raffineries en 2011 et 2012 au Tableau 2 (Pineault 2014).

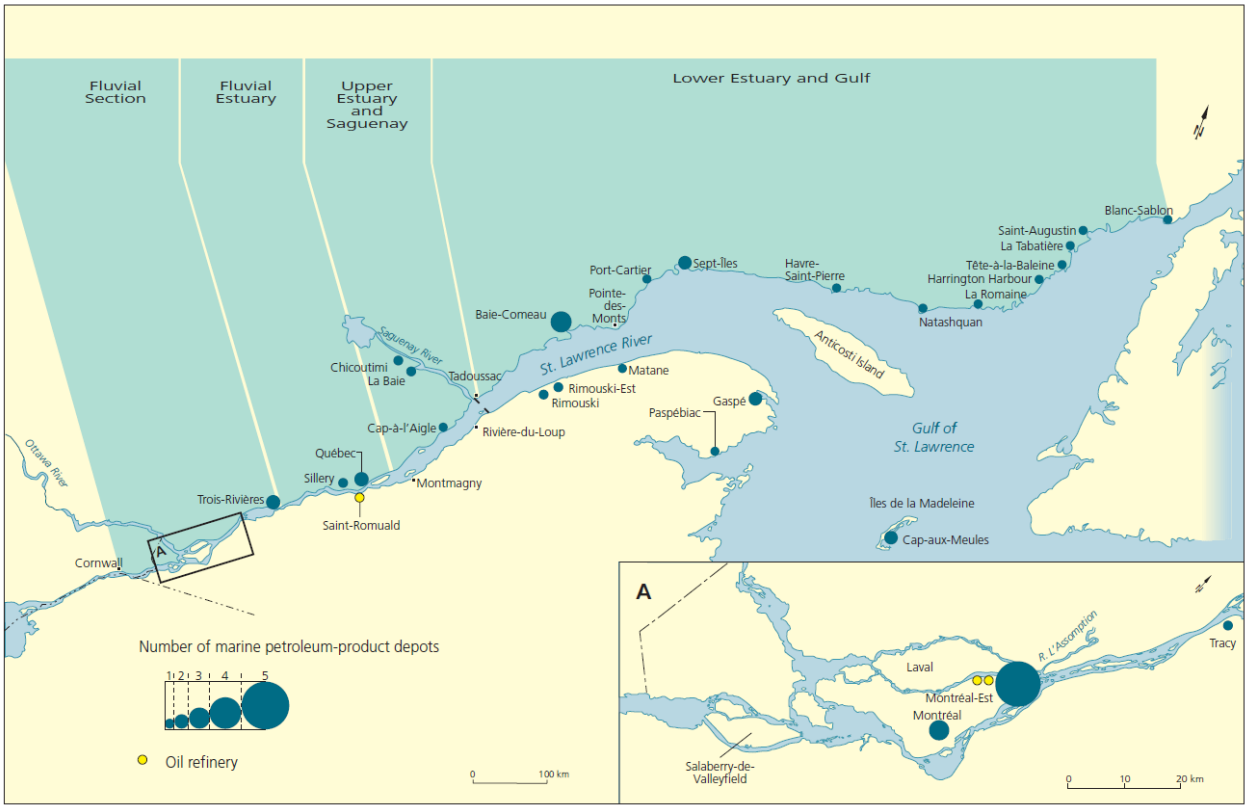


**Figure 16. Industrie pétrolière le long du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1996b)**

**Tableau 2. Rejets des raffineries de pétrole le long du fleuve Saint-Laurent en 2011 et 2012 (Pineault 2014)**

| | | Shell | | Suncor | | Valero | | **Total** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | Unit | 2011 | 2012 | 2011 | 2012 | 2011 | 2012 | **2011** | **2012** |
| Volume | m^3 (x1000) | 2,855 | 1,254 | 4,395 | 4,911 | 4,190 | 3,822 | **11,440** | **9,988** |
| Oil & Grease | kg | 1,832 | 603 | 4,587 | 4,537 | 961 | 1,061 | **7,380** | **6,201** |
| Phenols | kg | 49 | 17 | 29 | 24 | 13 | 23 | **91** | **64** |
| Sulfides | kg | 56 | 24 | 191 | 244 | 258 | 280 | **505** | **547** |
| Ammonia Nitrogen | kg | 306 | 35 | 4,836 | 4,682 | 9,995 | 13,241 | **15,137** | **17,958** |

### *2.4.3 Sédiments et solides dissous*

Comparativement à d'autres fleuves du monde, le fleuve Saint-Laurent présente une faible charge sédimentaire (Dolgopolova et Isupova 2011). La quantité de sédiments entrant dans l'estuaire à partir du fleuve est de 1,1 à 6,5 millions de t/an (Couillard 1987; Environnement et Changement climatique Canada 2016; Kranck 1979). Le lac Ontario contribue dans une proportion inférieure à 3 % à la quantité de sédiments en suspension, les affluents, dans une proportion de 32 % et l'érosion du lit et des berges du fleuve Saint-Laurent, dans une proportion d'environ 65 % (Rondeau *et al.* 2000). La

contribution au printemps représente entre 60 et 70 % de la charge totale annuelle, tandis qu'en été, la contribution est de 15 %, en automne, de 15 à 25 % et en hiver, de 5 % (Frenette *et al.* 1989). Le ruissellement total des solides dissous dans le golfe du Saint-Laurent est de 92 500 t/km$^2$ par année (Dolgopolova et Isupova, 2011).

En amont du lac Saint-Pierre (entre Montréal et Trois-Rivières), la concentration des sédiments en suspension varie de 4 à 10 mg/L, augmentant jusqu'à 30 à 50 mg/L en aval de la ville de Québec et se situant entre 50 et 200 mg/L immédiatement en amont de l'île d'Orléans (Couillard 1987). En aval de l'île d'Orléans, la concentration des sédiments en suspension diminue à 40 à 80 mg/L, passant de moins de 5 mg/L à Rivière-du-Loup à moins de 2 mg/L à la rivière Saguenay.

Dans le haut estuaire, la turbidité est contrôlée par l'échange de sédiments provenant des vasières et des marais, qui est dû à la circulation, à la glace, aux turbulences induites par le vent et aux marées, et affiche un maximum entre l'île d'Orléans et l'île aux Coudres de 50 à 200 mg/L (Tableau 3), avec des pics dépassant 400 mg/L (d'Anglejan 1990). Cette région constitue une zone de turbidité maximale due à la formation de floc (d'Anglejan 1990; Kranck 1979), ce qui serait important pour la formation d'agrégats d'hydrocarbures et de minéraux pendant un déversement de pétrole. La zone migre de 30 à 40 km de haut en bas de l'estuaire en fonction des marées et du débit du fleuve. La marée descendante rejette 15‰ (50 % étant mélangé à de l'eau de mer) d'eau turbide le long de la rive sud par le passage du sud et forme un front, séparant les eaux estuariennes en fonction de leur salinité, de leur température et de leur turbidité, lesquelles eaux migrent également en fonction des variations du débit du fleuve (Dolgopolova et Isupova 2011).

**Tableau 3. Concentration des solides en suspension de Kingston, en Ontario, à l'île d'Orléans**

| Emplacement | Concentration (mg/L) |
|---|---|
| Kingston | 1-2 |
| Lac Saint-François | 4-5 |
| Lac Saint-Louis | 7-8 |
| Lac Saint-Pierre | 9-13 |
| Ville de Québec | 16-20 |
| Extrémité est de l'île d'Orléans | 25-70 |
| Zone de turbidité maximale | 200-400 |

La dynamique des sédiments est dominée par l'action des marées à la tête du haut estuaire autour de l'île d'Orléans, où les marais intertidaux abondent, mais, en descendant en aval vers Pointe-des-Monts, cette dynamique change, devenant dominée par les vagues, particulièrement à l'embouchure du bas estuaire, où les plages de sable sont fréquentes (Drapeau 1990; Drapeau 1992; Centre Saint-Laurent 1996b). Les principaux affluents en aval de la ville de Québec (rivières Saguenay, Betsiamites, aux Outardes et Manicouagan) sont responsables de la charge sédimentaire dans le bas estuaire (Centre Saint-Laurent 1996b). L'accumulation de sédiments se produit en

hiver dans les marais et les battures intertidales des trois principaux lacs intérieurs au-delà du canal de navigation, où la vitesse du courant est inférieure à 0,3 m/s et où la profondeur ne dépasse pas 4,5 m (Dolgopolova et Isupova 2011). L'érosion qui se produit pendant la crue printanière ajoute des sédiments au fleuve (d'Anglejan 1990), et des zones d'érosion de grande importance sont observées dans les chenaux du tronçon moyen du fleuve (Couillard 1987).

Les sédiments de fond du haut estuaire sont principalement constitués de sable grossier (0,06 - 2 mm) et de gravier (2 - 80 mm) avec quelques dépôts d'argiles silteuses fines (≤ 60 µm) (Dolgopolova et Isupova 2011), tandis que le bas estuaire profond est une région propice à l'établissement de ces sédiments fins, à un taux de 1,5 à 4 mm/an (d'Anglejan 1990). Le rapport limon/argile est en moyenne de 2,3:1, les particules d'argile de moins de 0,002 mm de diamètre représentant 20 à 30 % des sédiments, et le sable fin de 0,063 à 0,125 mm de diamètre représentant entre 5 et 70 % des sédiments (d'Anglejan 1990). Le contenu organique des matières particulaires en suspension dans le haut estuaire semble provenir de l'érosion des sols, tandis que celui du bas estuaire semble provenir de la production marine (d'Anglejan 1990).

## 2.5 SALINITÉ, TEMPÉRATURE ET OXYGÈNE DISSOUS

Le Saint-Laurent possède un estuaire classique: les eaux de ruissellement et les précipitations dépassent l'évaporation, les eaux douces et salées se mélangent et la salinité diminue régulièrement au fur et à mesure qu'on remonte le fleuve. La limite supérieure de l'intrusion d'eau salée se déplace en fonction du débit du fleuve, de l'amplitude et de la phase des marées, et du cycle de vive-eau et de morte-eau (Bourgault *et al.* 2001; Dolgopolova et Isupova 2011). À la saison chaude, la limite se situe près de l'extrémité est de l'île d'Orléans et se déplace dans un rayon de 20 km (Dolgopolova et Isupova 2011; Gagnon 1998). La salinité moyenne des eaux de surface passe de 0,1 à la tête de l'estuaire à 18 à 26 à l'embouchure de la rivière Saguenay (Gagnon 1998), tandis que la salinité du lit peut atteindre 20 à 30‰ (Neu 1976). Dans le moyen estuaire et le bas estuaire, la salinité de surface oscille entre 28 et 32‰, selon la saison, et augmente avec la profondeur pour atteindre 33 à 35‰, soit l'équivalent du taux de salinité dans le golfe (Dolgopolova et Isupova 2011; Neu 1976).

Les eaux de surface et du fond forment un gradient de salinité entre l'île d'Orléans et l'île aux Coudres (Figure 17). Entre l'île d'Orléans et l'archipel de Montmagny, la salinité en été ne dépasse pas 2 à 3‰ en surface et 4 à 6‰ au fond. La diminution du débit du fleuve en hiver permet à la salinité de la couche inférieure de s'élever à 6 à 10‰. Au large de l'île aux Coudres, les changements de salinité dus aux apports d'eau douce ne sont perceptibles qu'à proximité des affluents (Couillard 1987; Dolgopolova et Isupova 2011).

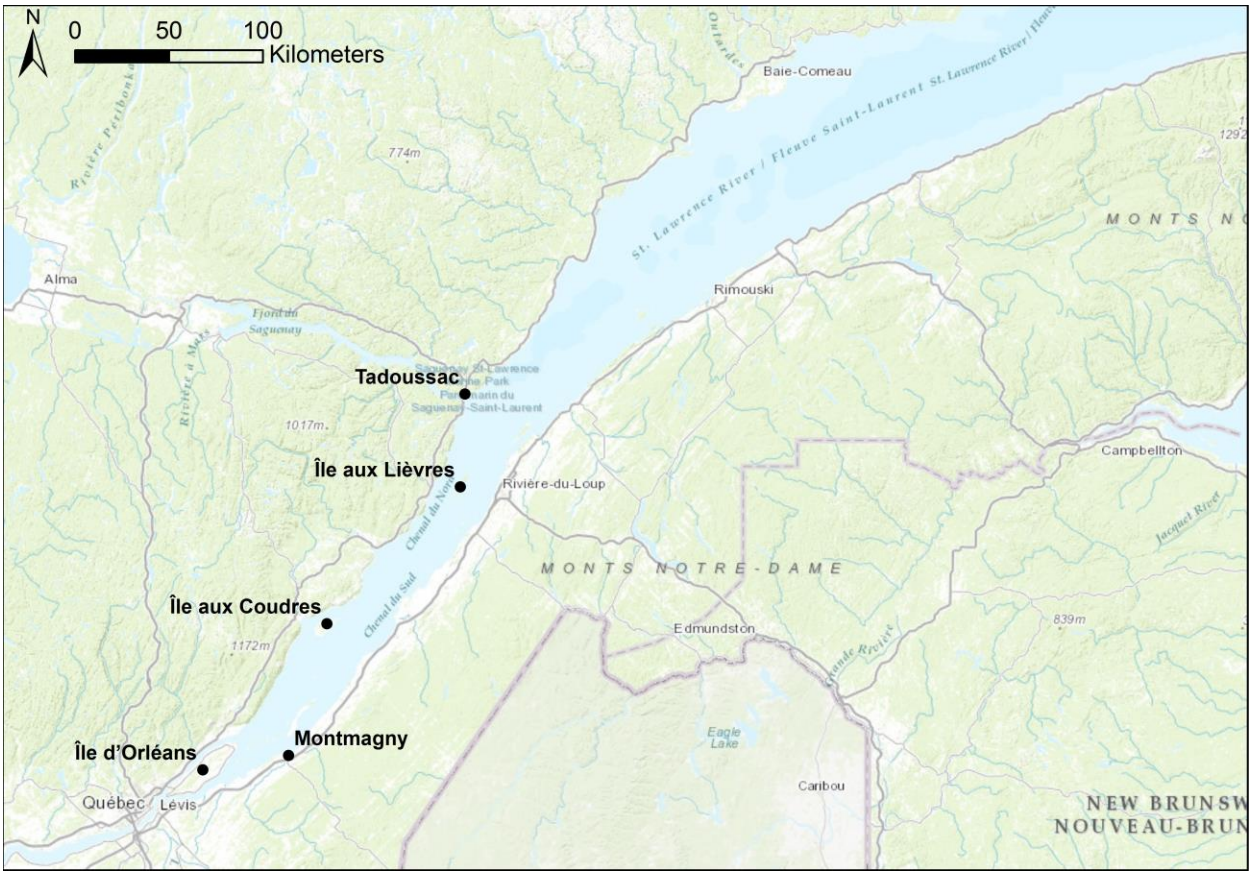


**Figure 17. Emplacements géographiques dans le haut estuaire du fleuve Saint-Laurent**

De Borne de Grandpré et El-Sabh (1980) ont décrit la migration verticale de l'isohaline à 32,5 ‰ à proximité de la zone du débit entrant de la rivière Saguenay sous l'effet des marées. À marée haute, cette isohaline à 32,5‰ se trouve à une profondeur de 20 à 25 m. Pendant la marée descendante, la profondeur de l'isohaline diminue jusqu'à son maximum de 75 m, et les vitesses d'écoulement vertical, dirigé vers le lit (positif), augmentent progressivement et atteignent leur maximum de 2,2 mm/s quatre heures après la marée haute. L'inverse se produit pendant la marée montante, lorsque l'isohaline se déplace vers le haut avec une vitesse moyenne de 2,3 mm/s, deux à trois heures avant la marée haute. Le gradient de vitesse vertical d'une marée de vive-eau est deux fois supérieur à celui d'une marée de morte-eau (de Borne de Grandpré et El-Sabh 1980; Dolgopolova et Isupova 2011).

La température mensuelle moyenne de l'eau à la surface du golfe s'échelonne entre 0 (janvier-avril) et +13 °C (août). De mai à octobre, la température de l'air est en moyenne de 2 °C plus élevée que la température de l'eau dans la couche superficielle du golfe. L'eau douce provenant du fleuve Saint-Laurent a tendance à s'écouler le long de la rive sud du bas estuaire, tandis que l'eau froide de l'Atlantique remonte en profondeur par le détroit de Belle Isle et le chenal Laurentien (Figure 18), ce qui donne trois couches (Dickie et Trites 1983): 1) une couche de surface mixte de 27 à 32 ppm, vers la mer, provenant de l'écoulement fluvial, qui s'étend de 25 à 75 m, 2) une couche saline

intermédiaire (31,5 - 33 ppm), vers les terres, dont les températures oscillent entre - 1 et 2 °C et provenant du refroidissement hivernal de la surface du golfe (Banks 1966; Galbraith 2017; Gilbert et Pettigrew 1997) et 3) une couche plus chaude (4 à 6 °C) de 34 à 34,6 ppm, vers la terre (Bourgault *et al.* 2001), lente et profonde, provenant de l'Atlantique (Koutitonsky 1979).

La couche de surface présente d'importantes variations saisonnières de température et de salinité dues au forçage atmosphérique et au forçage de flottabilité. Cette couche est relativement mince (Craig et Gilbert 2008), gèle en hiver pendant trois à quatre mois et se réchauffe pour atteindre 18 °C en été. Les gradients saisonniers de température et de productivité sont extrêmement élevés (Le Fouest *et al.* 2006). Les températures maximales en surface sont observées entre la mi-juillet et la mi-août, avec une moyenne climatologique (1985-2010) qui varie d'environ 7 °C à la tête du bas estuaire, à Tadoussac, à plus de 17 °C dans les petits fonds de Madeleine. Les eaux de surface estivales se réchauffent en été en raison de la hausse de la température de l'air de 0,9 °C tous les 100 ans depuis 1873, et plus rapidement ces dernières années (Galbraith *et al.* 2014b). De l'automne à l'hiver, le refroidissement de surface, le mélange induit par le vent, la diminution de l'écoulement des affluents et la formation de glace entraînent la fusion des couches de surface et intermédiaire jusqu'à une profondeur de 75 m (Galbraith 2006; Gilbert et Pettigrew 1997; Saucier *et al.* 2003). Au printemps, la couche froide qui s'était formée dans le nord du golfe du Saint-Laurent et dans le chenal Laurentien devient une masse d'eau de subsurface qui se déverse dans l'estuaire (Dufour et Ouellet 2007). Au printemps, le réchauffement de la surface, les eaux de fonte des glaces de mer et le ruissellement continental produisent une couche de surface de plus faible salinité et plus chaude, sous laquelle les eaux froides de l'hiver précédent sont partiellement isolées et forment la couche intermédiaire froide de l'été, laquelle se réchauffe, gagne en profondeur et persiste progressivement jusqu'à l'hiver suivant (Cyr *et al.* 2011; Galbraith *et al.* 2015; Gilbert et Pettigrew 1997). L'étendue de la formation des glaces, le volume de la glace de mer et la durée de la saison des glaces ont diminué depuis 1990. Durant les hivers 1969, 2010 et 2011, la région était pratiquement libre de glace en hiver, avec des températures de l'air qui affichaient 2 à 3 °C de plus que la normale (Galbraith *et al.* 2014b; Galbraith *et al.* 2015).

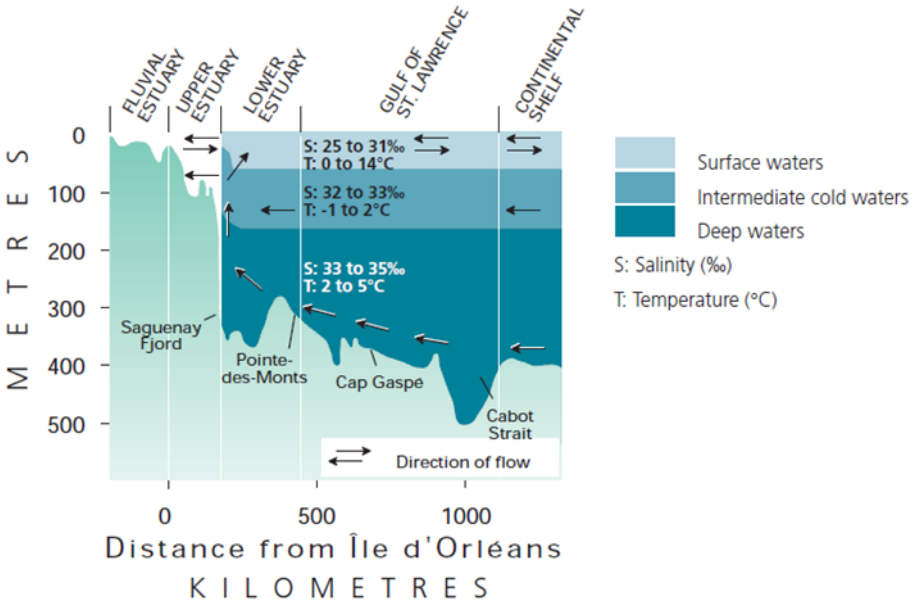


**Figure 18. Stratification de l'eau dans le réseau du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent 1991)**

Les caractéristiques de la couche intermédiaire froide (<1 °C, Figure 20) sont étroitement liées aux conditions climatiques : refroidissement hivernal (jusqu'à -1 °C jusqu'à une profondeur de 75 m; Galbraith *et al.* 2014a), densité accrue et libération de saumure pendant la formation de la glace de mer (Craig et Gilbert 2008; Gilbert et Pettigrew 1997). La température moyenne estivale dans la couche intermédiaire froide fluctue chaque année. Elle était très froide durant la période allant de 1986 à 1998 (Figure 19), mais, depuis lors, les températures ont généralement augmenté, et l'été 2012 a été le plus chaud jamais enregistré depuis 1980 (Galbraith *et al.* 2014b).

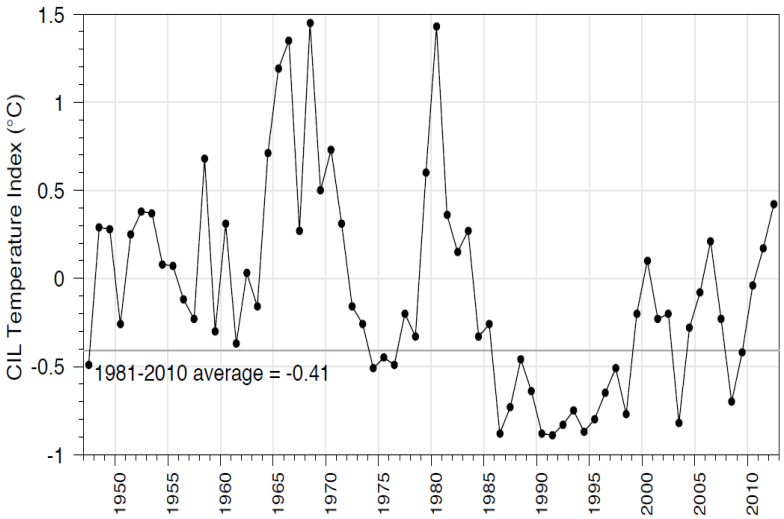


**Figure 19. Température annuelle moyenne de la couche intermédiaire froide (CIL) à la mi-juillet (Galbraith *et al.* 2014b)**

Dans la couche intermédiaire froide, les courants s'écoulent principalement vers les terres sur le côté nord du chenal Laurentien et ils s'écoulent principalement vers la mer, bien qu'étant plus faibles, sur le côté sud du chenal, de sorte que le transport net dans la couche s'effectue vers les terres (Mucci *et al.* 2011).

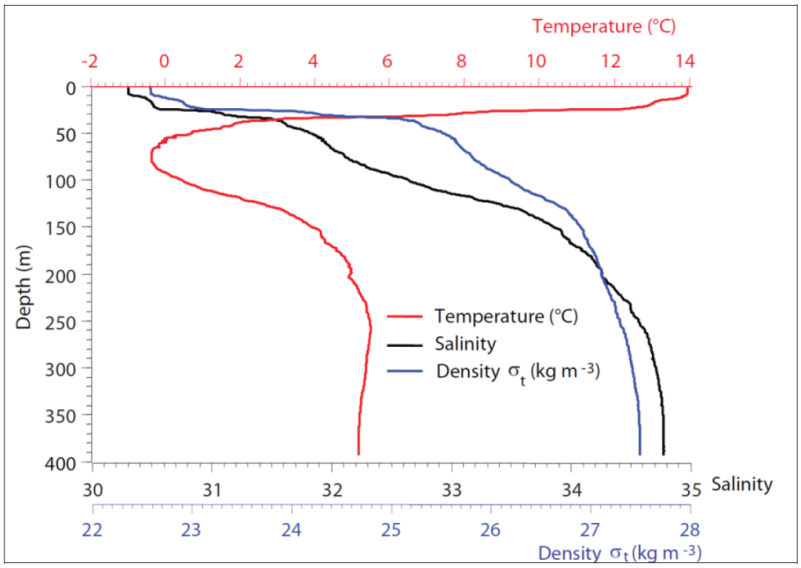


**Figure 20. Profil estival de la salinité, de la température et de la densité dans le bas estuaire du Saint-Laurent (de Vernal *et al.* 2011)**

Les eaux profondes du fond sont un mélange des eaux amenées par le courant du Labrador et des eaux centrales de l'Atlantique Nord dont les proportions varient à très long terme (Bugden 1991; Gilbert *et al.* 2005). Cette eau s'écoule vers l'intérieur des terres, jusqu'à Tadoussac, à l'embouchure du fjord du Saguenay, et se caractérise par des remontées d'eau, ce qui entraîne une productivité extrêmement élevée qui soutient de grandes populations de baleines (de Vernal *et al.* 2011). Le mélange vertical (Neu 1970) ou l'interaction entre des courants de marée stratifiés et intenses et des rapides sur les hauts-fonds qui se trouvent près de Tadoussac (Bourgault 2001; Reid 1977) semble être responsable de la remontée de grandes quantités d'éléments nutritifs depuis la zone située à en deçà de 50 m dans la zone photique. Autour de Tadoussac, l'eau de surface a tendance à être toujours froide en raison du mélange tidal variable, mais important, des eaux qui remontent avec les eaux provenant du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Saguenay (Koutitonsky et Bugden 1991; Centre Saint-Laurent 1996b).

Les remous géants cycloniques et anticycloniques engendrés par les vents dans la région sont communs entre Les Escoumins et la pointe ouest de l'île d'Anticosti (Figure 11), produisant des contre-courants s'écoulant vers le nord à l'île du Bic et vers le sud à Pointe-des-Monts (Centre Saint-Laurent 1991, 1996b).

L'eau qui forme la couche profonde en deçà de 150 m se déplace en amont du détroit de Cabot et du détroit de Belle-Isle, se mélange peu avec l'eau moins profonde et met trois à quatre ans pour atteindre la tête du bas estuaire (Gilbert 2004). La respiration des organismes et l'oxydation des matières organiques réduisent la concentration d'oxygène dissous (Figure 21), de sorte que les eaux profondes du bas estuaire sont devenues brièvement hypoxiques au début des années 1960, et ont été constamment hypoxiques, avec un degré de saturation allant de 19 à 22 %, depuis 1984 (Galbraith *et al.* 2014b).

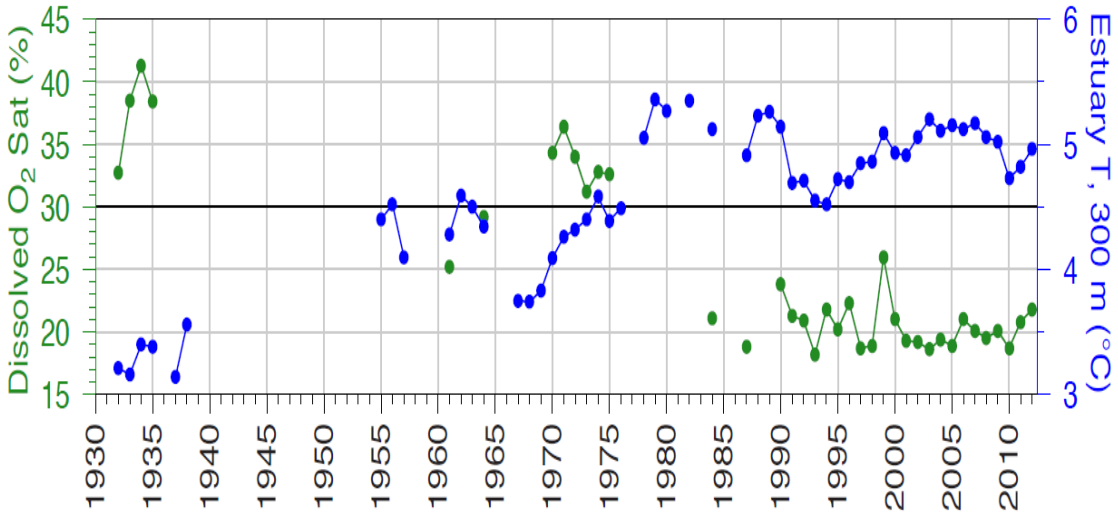


**Figure 21. Température (bleu) et oxygène dissous (vert) à 300 m dans le bas estuaire (Galbraith *et al.* 2014b)**

# 3 CLIMAT

Dans la région de l'Atlantique, on prévoit qu'au cours des 50 prochaines années, la température de l'air augmentera de 2 à 3,5 °C, les précipitations augmenteront de plus de 10 %, le ruissellement augmentera, la glace de mer (y compris les icebergs) diminuera, la température des océans augmentera, la salinité diminuera, la couche mixte en surface aura une épaisseur moindre, les échanges d'éléments nutritifs entre les eaux profondes et la zone photique diminueront (en raison d'une stratification plus marquée) et le pH sera plus acide (> 0,1) (Pêches et Océans Canada 2013).
Le Gulf Stream chaud et le courant froid du Labrador sont les deux principaux courants océaniques qui ont le plus d'effet sur les conditions météorologiques dans la région (Robichaud et Mullock 2001a). La circulation à partir du nord-ouest provoque de forts vents du sud-ouest sur la rive sud du Bas-Saint-Laurent jusqu'à l'île Bicquette, près de Rimouski, et le brouillard est fréquent sur l'eau en été. Des plafonds bas et une visibilité réduite sont fréquemment enregistrés le long de la côte lorsque les vents d'est et de nord-est soufflent (Robichaud et Mullock 2001b).

## 3.1 TEMPÉRATURE ET PRÉCIPITATIONS

Le fleuve Saint-Laurent jouit d'un climat tempéré, avec des hivers froids. Les températures moyennes mensuelles à Mont-Joli, qui se trouve au centre de la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent, se situent entre -12,3 °C (janvier) et 17,5 °C (juillet) (Figure 22) (The Weather Network 2019). Les statistiques sur les précipitations dans le secteur de Mont-Joli font état de précipitations annuelles moyennes de 606 mm de pluie et de 350 cm de neige, avec des niveaux de précipitations relativement constants tout au long de l'année.

Le fleuve Saint-Laurent est généralement recouvert de glace de la mi-décembre à la mi-avril, et les floes sont également fréquents dans le grand estuaire pendant cette période (Dolgopolova et Isupova 2011).

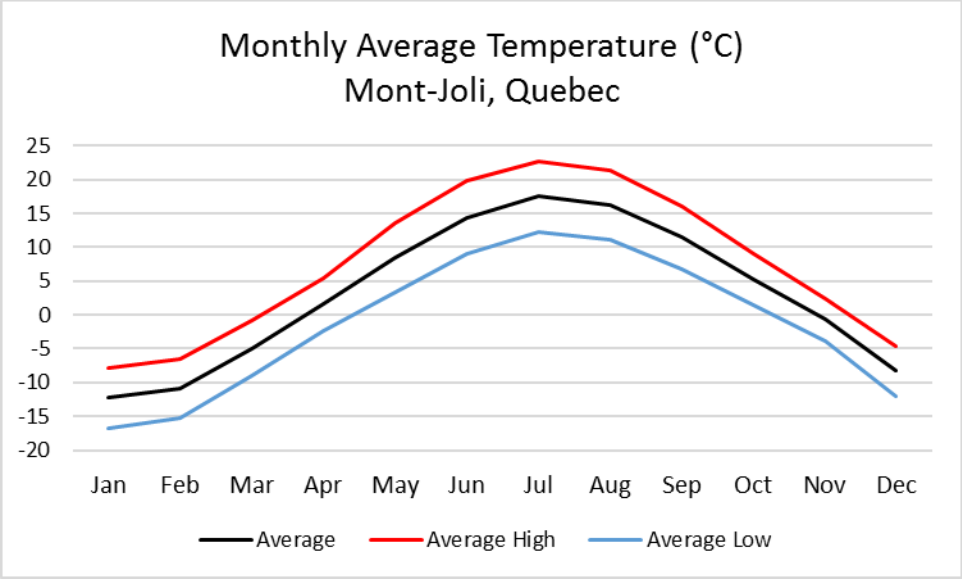


**Figure 22. Température mensuelle moyenne à Mont-Joli, au Québec (The Weather Network 2019)**

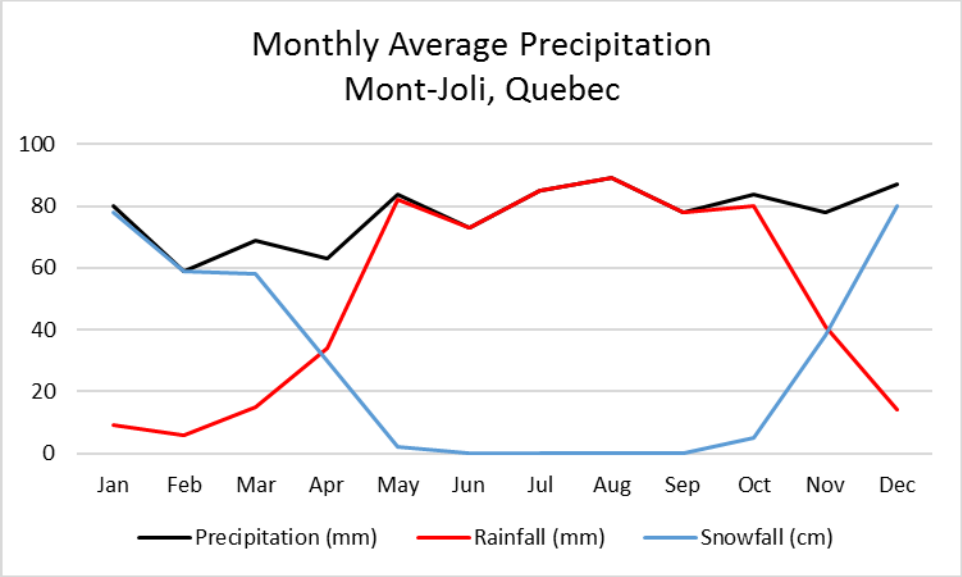


**Figure 23. Précipitations mensuelles moyennes à Mont-Joli, au Québec (The Weather Network 2019)**

## 3.2 VENT ET VAGUES

De juin à novembre, les vents soufflent du sud-ouest et de l'ouest (Figure 24), tandis qu'en hiver, ils soufflent du nord-ouest (Dufour et Ouellet 2007; Koutitonsky et Bugden 1991), mais la trajectoire des tempêtes peut engendrer un mécanisme de forçage de la direction du vent (Dolgopolova et Isupova 2011). La vitesse du vent est généralement

inférieure à 20 km/h, et la récurrence des vents hivernaux dont la vitesse est supérieure à 57 km/h est toujours inférieure à 10 % (Dolgopolova et Isupova 2011).

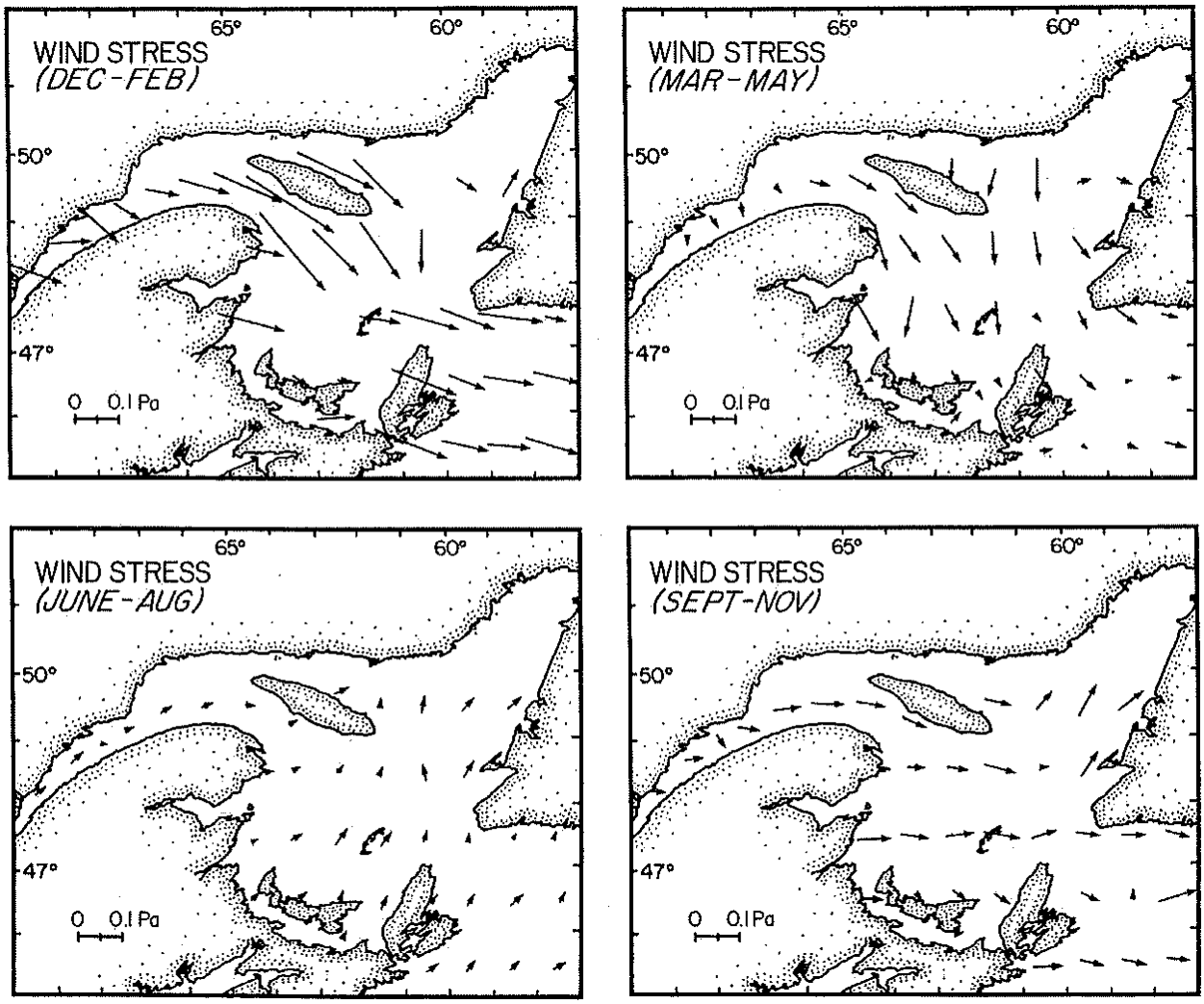


**Figure 24. Direction des vents dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent; la taille des flèches est proportionnelle à la vitesse du vent (Koutitonsky et Bugden 1991)**

À Mont-Joli, sur la rive sud du bas estuaire, les vents hivernaux soufflent surtout de l'ouest ou du sud-ouest. La direction du vent est un résultat direct de la canalisation dans la vallée du Saint-Laurent. Les vents d'été présentent un profil semblable, mais ont tendance à être plus légers. Les principaux axes de vent sont le sud-ouest et le nord-est, bien que les vents du sud-ouest en été soient presque deux fois plus fréquents qu'en hiver (Robichaud et Mullock 2001a).

On a élaboré un modèle d'évaluation de l'effet de la couverture de glace sur le régime des vagues pour le golfe du Saint-Laurent (Ruest *et al.* 2015). La zone d'étude était limitée aux eaux profondes (> 50 m), ce qui exclut la pointe ouest de l'île d'Anticosti, mais englobe toujours le bas estuaire. La concentration cumulative moyenne des

glaces, telle que déterminée par le modèle océanique régional avec le forçage éolien établi d'après le Modèle régional canadien du climat (MRCC-1 et MRCC-2), a généralement augmenté d'est en ouest durant la période allant de1981 à 2010, et la hauteur extrême des vagues a été réduite par la couverture de glace. Dans l'estuaire, 99 % de la hauteur de l'onde significative était de 1 à 2 m et la hauteur sur 50 ans était de 2,5 à 4 m, comparativement à 2 à 4 m et 4,5 à 8 m dans le reste du golfe. La présence de glace réduisait la hauteur des vagues. L'impact de la glace de mer était statistiquement significatif dans l'ensemble de la zone d'étude. L'absence de glace a entraîné une augmentation de 8 à 16 % de 99 % de la hauteur de l'onde significative, et de 10 % de cette hauteur sur 50 ans (Ruest *et al.* 2015).

# 4 DÉVERSEMENTS DE PÉTROLE PRÉCÉDENTS

Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BSTC) tient à jour une base de données sur les incidents et accidents aériens, maritimes, ferroviaires et de pipeline, appelés collectivement événements, et publie des rapports annuels accompagnés de statistiques (Transportation Safety Board of Canada 2018). La base de données sur les événements maritimes contient des renseignements sur les navires en cause, leur cargaison, l'emplacement, la pollution signalée et d'autres données. Comme les exigences en matière de rapports ont changé au fil du temps, le nombre d'événements maritimes saisis dans la base de données chaque année a augmenté. La mise à jour la plus récente des exigences en matière de rapports du BSTC remonte à 2014 (Transportation Safety Board of Canada 2014), et les données concernant de nombreux autres événements sont disponibles à partir de cette date. Des statistiques ont été compilées ici concernant les événements d'intérêt de l'ensemble de la période couverte par la base de données (1975-2018) et sur une base annuelle moyenne pour des années complètes depuis l'entrée en vigueur des nouvelles exigences en matière de rapports (2015-2017).

Des statistiques ont été compilées pour quatre types différents d'événements maritimes: 1) les événements mettant en cause des navires de charge, qu'il s'agisse de navires-citernes ou de barges transportant des produits pétroliers; 2) les événements au cours desquels une pollution a été signalée ou une cargaison, quelle qu'elle soit, a été perdue par-dessus bord; 3) les événements au cours desquels des produits pétroliers ont été déversés à bord ou dans l'eau; 4) les événements au cours desquels des navires ont coulé, chaviré ou ont subi de graves avaries sans possibilité de réparation et au cours desquels un rejet de carburant dans l'environnement est possible.

Les statistiques concernant le port de Montréal ont été compilées par filtrage des événements dans la province de Québec ou dans les eaux internationales, dans la plage latitudinale de 45,3°N à 50,3°N et dans la plage longitudinale de 64,0°O à 74,6°O. La baie des Chaleurs et les régions avoisinantes du golfe du Saint-Laurent et les parties de la baie de Fundy situées dans cette case sont exclues. La région englobe la Voie maritime du Saint-Laurent. Voir les statistiques au Tableau 4.

**Tableau 4. Incidents et accidents survenus au port de Montréal et dans la Voie maritime du Saint-Laurent d'après le Bureau de la sécurité des transports du Canada**

| Événements mettant en cause... | Toutes les années (1975-2018) | Moyenne annuelle (2015-2017) |
|---|---|---|
| Tous les événements | 2 105 | 116,7 |
| Navires de charge transportant des hydrocarbures | 128 | 6,0 |
| Pollution ou perte de cargaison par-dessus bord | 100 | 1,3 |
| Déversements d'hydrocarbures à bord ou par-dessus bord | 3 | 0,7 |
| Navires coulés, chavirés ou détruits | 17 | 1,0 |

Huit événements mettant en cause des navires de charge transportant des produits pétroliers ont également été signalés comme des événements de pollution ou de perte de cargaison. Dans la plupart des cas, la nature de la pollution n'était pas indiquée dans le résumé de l'événement, et les événements n'étaient pas signalés comme étant des déversements de produits pétroliers dans la base de données. L'un de ces cas concernait le navire-citerne *Irving Nordic* en 1991. Le Rapport d'enquête maritime (Bureau de la sécurité des transports du Canada 1991) indique que l'*Irving Nordic*, qui transportait 11 000 tonnes de pétrole brut, a quitté le chenal de navigation du fleuve Saint-Laurent en aval de Trois-Rivières en raison d'une erreur de navigation et a heurté le fond, causant des avaries considérables et perforant une citerne. Le rapport fait état d'une pollution de moindre importance et estime qu'un baril de pétrole a été perdu, mais cette perte n'est pas enregistrée dans la base de données du BST. Des traces d'huile ont été trouvées dans une marina voisine, mais n'ont pas pu être reliées de façon concluante à l'accident de l'*Irving Nordic*.

L'événement de l'*Irving Nordic* a été l'un des sept événements au cours desquels un navire de charge transportant des produits pétroliers a subi de graves avaries qui ont été signalées. La collision entre le navire-citerne *Hyde Park* et le porte-conteneurs *Cast Prosperity* en 2005 est un autre événement important. Le *Hyde Park* transportait 30 000 tonnes d'essence. Les deux navires remontaient le chenal dragué du lac Saint-Pierre, au sud-ouest de Trois-Rivières, lorsque le *Cast Prosperity* a tenté de dépasser le *Hyde Park*. En raison de la forme étroite et de la faible profondeur du chenal, de fortes forces hydrodynamiques ont entraîné la collision entre les deux navires. Les deux navires ont subi des avaries considérables, y compris des avaries au bordé de la coque du *Hyde Park* adjacent à trois citernes à cargaison. On a senti de l'odeur d'essence sur le pont, mais on n'a pas signalé de brèche dans les citernes. Le Rapport d'enquête maritime (Bureau de la sécurité des transports du Canada 2005) traite en détail des difficultés de la navigation dans des chenaux étroits tels que certains tronçons de la Voie maritime du Saint-Laurent.

La plupart des navires signalés comme ayant coulé ou ayant été perdus dans la Voie maritime du Saint-Laurent sont des bateaux de pêche (10 sur 17), qui sont habituellement de petits bateaux d'une longueur médiane de 12,85 m. Les autres sont des embarcations de plaisance ou de petits bateaux de travail.

Voici une liste des déversements les plus notables qui se sont produits dans ce secteur et pour lesquels nous avons obtenu de la documentation au cours de notre analyse documentaire.

### *4.1 IRVING WHALE*

La barge pétrolière *Irving Whale* transportait une cargaison de 4 500 tonnes de pétrole brut de soute lorsqu'elle a coulé par 67 mètres de fond dans le golfe du Saint-Laurent, entre l'Île-du-Prince-Édouard et les îles de la Madeleine, le 7 septembre 1970 (Gagnon *et al.* 2010; Latremouille 1974), causant un premier déversement important et les fuites qui ont suivi pendant les 26 années suivantes. Environ 80 km de littoral ont été touchés par le déversement. Au cours des opérations de nettoyage des plages sous les auspices de Transports Canada, les résidus pétroliers et les sédiments contaminés aux BPC ont été recueillis dans des sacs de plastique. Les sacs ont été enfouis dans des trous, des tranchées ou des cavités naturelles à la base de la dune antérieure ou derrière la première rangée de dunes, et aucune trace des lieux d'enfouissement des sacs de sédiments contaminés n'est disponible (Gagnon *et al.* 2010). Les changements très importants que les dunes ont subis depuis 1970 sont tels qu'il est impossible de déterminer l'emplacement actuel des sacs dans le profil de la plage (entre la zone intertidale et la dune arrière). La barge coulée a finalement été récupérée par le gouvernement fédéral le 30 juillet 1996.

### *4.2 NEPCO 140*

Le 23 juin 1976, le *Eileen C.* remorquait la barge *NEPCO 140* sur le fleuve Saint-Laurent, de Montréal à la centrale électrique mohawk de Niagara, à Oswego (New York) (Foley et Tresidder 1977). La barge s'était échouée sur un haut-fond au nord-est de l'île Wellesley, déversant des hydrocarbures dans l'American Narrows, un chenal restreint de la région des Mille-Îles entouré de corniches et de petites falaises, où la profondeur est supérieure à 46 m et où la vitesse du courant dépasse 6,5 km/h. Le remorqueur et la barge ont poursuivi leur route sur 8 km vers l'amont en passant par le goulet jusqu'à Mason Point. Pendant quatre jours, 1 140 000 L d'hydrocarbures de catégorie n° 6 déversés ont été poussés à 137 km en aval par des courants de 3,5 à 13 km/h et par des vents d'ouest, malgré le déploiement de barrages flottants et d'écrémeurs, touchant plus de 483 km de côtes insulaires et continentales, dont presque toute la rive américaine du fleuve (Foley et Tresidder 1977).

Environ 1 000 oiseaux sauvages et un nombre inconnu de mammifères et de reptiles ont été touchés (Foley et Tresidder 1977). Les rives ont été lavées à la main à l'électricité, et la végétation aquatique et marécageuse contaminée a été coupée et transportée manuellement. Le nettoyage a duré 122 jours, mais bon nombre de zones ont été laissées telles quelles, pour une restauration naturelle. Le coût a dépassé 8 millions de dollars (Foley et Tresidder 1977).

### *4.3 RICHELIEU*

Le 13 juillet 2010, près de l'écluse de Côte Sainte-Catherine, au Québec (Rive-Sud de Montréal), 50 à 200 tonnes de carburant diesel provenant d'une citerne perforée du cargo de la Canada Steamship Lines (CSL) le *Richelieu*, se sont déposés sur la rive, couvrant onze oiseaux d'hydrocarbures (dont cinq sont morts par la suite), touchant environ 3 km du littoral et retardant 17 navires (CTV News 2010a, 2010b; Hamilton Spectator 2010; The Toronto Star 2010). Tous les navires de la CSL possèdent à bord des barrières flottantes d'urgence, lesquelles ont été immédiatement déployées et ont contenu la nappe (CBC News 2010). Le nettoyage de la zone de 500 $m^2$ a pris environ 3 jours et a nécessité de 30 à 50 personnes.

### 4.4 CAMION-CITERNE

Le mardi 2 septembre 2014, un camion-citerne circulant sur la route 132, près de Saint-Lambert, sur la Rive-Sud de Montréal, a fait une embardée pour éviter un accident antérieur impliquant une auto-caravane et une voiture, entre les ponts Victoria et Champlain (Global News 2014). Le conducteur du camion a perdu le contrôle, s'est écrasé sur les deux véhicules et a terminé sa course dans le fleuve Saint-Laurent. On estime que 400 litres de carburant diesel se sont déversés dans le fleuve à partir de la citerne perforée du camion. Une équipe environnementale a été envoyée sur les lieux pour nettoyer le déversement. Le camion transportait également environ 40 tonnes de ciment sec.

### 4.5 REMORQUEUR

Le 18 décembre 2014, un remorqueur a coulé près de Trois-Rivières, au Québec, déversant du carburant diesel dans le fleuve Saint-Laurent, dont 10 000 L ont été récupérés. On ne sait toujours pas quelle quantité des 22 000 litres de carburant diesel qui se trouvaient à bord du navire a été déversée dans l'eau (CBC News 2008).

### 4.6 DÉVERSEMENT DE CARBURANT DIESEL À LONGUEUIL

Un réservoir de carburant d'une usine de filtration d'eau à Longueuil, au Québec, a laissé fuir 28 000 L de carburant diesel dans le fleuve Saint-Laurent, ce qui a donné lieu

à un avis municipal de non-consommation d’eau potable pendant plusieurs jours (CBC News 2015).

# 5 CONCLUSIONS

La région de Montréal et du golfe du Saint-Laurent jouit d'un climat moyennement tempéré, avec des étés chauds et humides et de la neige et de la glace pendant les mois d'hiver. En été, de forts vents du sud-ouest soufflent sur la rive sud du Bas-Saint-Laurent jusqu'à l'île Bicquette, et on observe du brouillard sur l'eau, des plafonds bas et une visibilité réduite le long de la côte par vent d'est et nord-est.

Le port de Montréal est un point de transbordement international, une plaque tournante pour les principaux oléoducs et le seul port à conteneurs du fleuve Saint-Laurent. Il a contribué au transport d'une quantité moyenne de 20 millions de tonnes de marchandises par an au cours des dix dernières années. On compte de nombreux dépôts de produits pétroliers, outre les trois raffineries de pétrole qui se trouvent le long du fleuve Saint-Laurent.

Les Grands Lacs et la Voie maritime du Saint-Laurent constituent une voie de transport international vitale d'importance géographique, hydrologique et économique qui est capable d'accueillir des navires à fort tirant d'eau. La région d'étude s'étend de Montréal à la pointe ouest de l'île d'Anticosti, dans le golfe du Saint-Laurent, et peut être divisée par secteurs : le fleuve ou le tronçon fluvial, l'estuaire fluvial, le haut estuaire et le bas estuaire. Les grands facteurs qui influent sur la circulation estuarienne dans la région sont le ruissellement des eaux douces dans le fleuve Saint-Laurent, la rivière Saguenay, les rivières qui se trouvent le long de la rive nord et les cours d'eau de la rive sud, dont la contribution est plus faible, ainsi que les marées provenant du golfe du Saint-Laurent.

Le haut estuaire, qui s'étend de la limite de l'intrusion saline, à la pointe est de l'île d'Orléans, à la tête du chenal Laurentien, à Tadoussac, affiche une largeur de 2 à 25 km et est dominé par des courants de forte intensité, des marées, un mélange important et une turbidité élevée. En hiver, les marées déplacent la glace d'avant en arrière, ce qui empêche la formation de banquise côtière.

Les 300 derniers kilomètres sont appelés le bas estuaire, qui atteint en moyenne 37 km de largeur entre Tadoussac et Pointe-des-Monts, avec une largeur maximale de 60 km à Baie-Comeau. Un débit d'eau douce plus élevé qui est enregistré pendant les crues printanières crée une circulation par forçage de flottabilité, outre le mélange sous l'action des marées. En été, trois masses d'eau affichant des températures et des salinités différentes se superposent, contre deux seulement en hiver. Le mélange est plus intense près du seuil du Saguenay (Tadoussac), près du banc des Anglais et près de l'île aux Coudres, surtout lorsque la crue printanière pousse l'intrusion saline vers la mer sur environ 12 km et augmente le mélange vertical turbulent. Les remous géants cycloniques et anticycloniques engendrés par les vents régionaux sont communs entre Les Escoumins et la pointe ouest de l'île d'Anticosti. De la mi-décembre à la mi-avril, la couverture de glace est répandue dans le fleuve, et de la banquise côtière et des floes sont présents dans l'estuaire.

# 6 RÉFÉRENCES


Banks, R.E. 1966. Cold Layer in Gulf of St Lawrence. J Geophys Res **71**(6): 1603-&. doi:DOI 10.1029/JZ071i006p01603.

Belzile, M., Galbraith, P.S., and Bourgault, D. 2016. Water renewals in the Saguenay Fjord. Journal of Geophysical Research: Oceans **121**(1): 638-657. doi:doi:10.1002/2015JC011085.

Bourgault, D. 2001. Circulation and mixing in the St. Lawrence Estuary. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research, McGill University, Montreal.

Bourgault, D., and Koutitonsky, V.G. 1999. Real-time monitoring of the freshwater discharge at the head of the St. Lawrence Estuary. Atmosphere-Ocean **37**(2): 201-218. Available from <Go to ISI>://WOS:000081532600004 [accessed.

Bourgault, D., Saucier, F.J., and Lin, C.A. 2001. Shear instability in the St. Lawrence Estuary, Canada: A comparison of fine-scale observations and estuarine circulation model results. J Geophys Res-Oceans **106**(C5): 9393-9409. doi:Doi 10.1029/2000jc900165.

Bugden, G.L. 1981. Salt and Heat Budgets for the Gulf of St-Lawrence. Can J Fish Aquat Sci **38**(9): 1153-1167. doi:DOI 10.1139/f81-155.

Bugden, G.L. 1991. Changes in the temperature-salinity characteristics of the deeper waters of the Gulf of St. Lawrence over the past several decades. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. **113**: 139-147.

CBC News. 2008. 3 small oil spills spotted in Bay of Fundy. CBC.ca, https://www.cbc.ca/news/canada/new-brunswick/3-small-oil-spills-spotted-in-bay-of-fundy-1.750404.

CBC News. 2010. St. Lawrence Seaway fuel spill contained. Available from https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/st-lawrence-seaway-fuel-spill-contained-1.8682782018].

CBC News. 2015. Damaged infrastructure, poor design caused Longueuil diesel leak: Environment Quebec. Available from https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/damaged-infrastructure-poor-design-caused-longueuil-diesel-leak-environment-quebec-1.29166202018].

Couillard, D. 1987. Quality of Suspended and Bottom Sediments of the St-Lawrence System (Canada). Hydrolog Sci J **32**(4): 445-467. doi:Doi 10.1080/02626668709491205.

Craig, J., and Gilbert, D. 2008. Estimation of mixed layer depth at the AZMP fixed stations. AZMP Bulletin **7**: 37–42.

CTV News. 2010a. St. Lawrence Seaway reopens after fuel spill. Available from https://www.ctvnews.ca/st-lawrence-seaway-reopens-after-fuel-spill-1.5327422018].

CTV News. 2010b. Five mallards die in St. Lawrence Seaway oil slick. Available from https://www.ctvnews.ca/five-mallards-die-in-st-lawrence-seaway-oil-slick-1.5337032018].

Cyr, F., Bourgault, D., and Galbraith, P.S. 2011. Interior versus boundary mixing of a cold intermediate layer. J Geophys Res-Oceans **116**. doi:Artn C12029 10.1029/2011jc007359.

d'Anglejan, B. 1990. Chapter 6: Recent sediments and sediment transport processes in the St. Lawrence estuary. *In* Oceanography of a Large-Scale Estuarine System. *Edited by* M.I. El-Sabh and N. Silverberg. Springer-Verlag, New York. pp. 109-129.

de Borne de Grandpré, C., and El-Sabh, M.I. 1980. Étude de la circulation verticale dans l'estuaire du Saint-Laurent au moyen de la modélisation mathématique. Atmosphere-Ocean **18**(4): 304-321. doi:10.1080/07055900.1980.9649094.

de Vernal, A., Guillaume, S.-O., and Denis, G. 2011. Oceanography and Quaternary geology of the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science **14**(1): 012004. Available from http://stacks.iop.org/1755-1315/14/i=1/a=012004 [accessed.

Devine, L., ;Plourde, S.; Starr M.; St-Pierre, J.-F.; St-Amand, L.; Joly, P.; Galbraith, P.S. 2015. Chemical and Biological Oceanographic Conditions in the Estuary and Gulf of St. Lawrence during 2014.

Dickie, L., and Trites, L.M. 1983. The Gulf of St. Lawrence. *In* Estuaries and Enclosed Seas. *Edited by* B.H. Ketchum. Elsevier, New York. pp. 403–425.

Dolgopolova, E.N., and Isupova, M.V. 2011. Water and Sediment Dynamics at Saint Lawrence River Mouth. Water Resour+ **38**(4): 453-469. doi:10.1134/S009780781104004x.

Drapeau, G. 1990. Chapter 7: Nearshore sediment dynamics in the St. Lawrence estuary. *In* Oceanography of a Large-Scale Estuarine System. *Edited by* M.I. El-Sabh and N. Silverberg. Springer-Verlag, New York. pp. 130-154.

Drapeau, G. 1992. Sediment Dynamics in the St-Lawrence Estuary. Geogr Phys Quatern **46**(2): 233-242. doi:DOI 10.7202/032907ar.

Drapeau, G., Munro, J., and Nellis, P. Long term fate of dredged sediments at Ile Madame dumping site (St. Lawrence Estuary): A basic assessment. *In* Proceedings of the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments. Quebec City, Quebec 2003. *Edited by* H. Tremblay and J. Locat and R. Galvez-Cloutier. pp. 36–40.

Dufour, R., and Ouellet, P. 2007. Estuary and Gulf of St. Lawrence marine ecosystem overview and assessment report. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. **2744**: 112. Available from www.dfo-mpo.gc.ca/Library/329836.pdf [accessed.

Dunbar, M.J., Maclellan, D.C., Filion, A., and Moore, D. 1980. The biogeographic structure of the Gulf of St. Lawrence. McGill University 32, Montreal.

El-Sabh, M.I. 1988. Physical oceanography of the St. Lawrence estuary. Hydrodynamics of Estuaries. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 61-78.

El-Sabh, M.I., and Murty, T.S. 1990. Mathematical modelling of tides in the St. Lawrence estuary. *In* Oceanography of a Large-Scale Estuarine System. *Edited by* M.I. El-Sabh and N. Silverberg. Springer-Verlag, New York. pp. 10-50.

Engelhardt, F.R. 1994. Limitations and innovations in the control of environmental impacts from petroleum industry activities in the Arctic. *Marine Pollution Bulletin* **29**(6-12): 334-341. Available from http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6N-487DM3F-N/2/a1d0f91030a0b3d037f3acaea5135c5b [accessed.

Environment and Climate Change Canada. 2016. Water pollution: erosion and sedimentation. Available from https://www.canada.ca/en/environment-climate-

change/services/water-overview/pollution-causes-effects/erosion-sedimentation.html.
Environment and Climate Change Canada. 2017. Sea Ice Climatic Atlas for the East Coast 1981-2010. Available from https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/ice-forecasts-observations/publications/sea-climatic-atlas-east-coast-1981-2010.html2018].
Environment Canada, Fisheries and Oceans Canada, and Natural Resources Canada. 2013. Federal Government Technical Report: Properties, Composition and Marine Spill Behaviour, Fate and Transport of Two Diluted Bitumen Products from the Canadian Oil Sands. Government of Canada (Environment Canada, Fisheries and Oceans Canada, and Natural Resources Canada) ISBN 978-1-100-23004-7.
Farquharson, W.I. 1962. Tides, tidal streams and currents in the Gulf of St. Lawrence. Canadian Hydrographic Service, Ottawa, ON.
Fisheries and Oceans Canada. 1992. Gulf of St. Lawrence. Fisheries and Oceans Canada, Ottawa, ON.
Fisheries and Oceans Canada. 2013. Risk-based assessment of climate change impacts and risks on the biological systems and infrastructure within Fisheries and Oceans Canada's mandate - Atlantic large aquatic basin.
Foley, J.P., and Tresidder, S.J. The St. Lawrence River oil spill of June 23, 1976 - are you ever truly ready? *In* Proceedings of the 1977 International Oil Spill Conference. New Orleans, LA, 8-10 March 1977 1977. American Petroleum Institute. pp. 81-85.
Frenette, M., Barbeau, C., and Verrette, J.-L. 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent. Gouvernement du Québec.
Gagnon, M. 1998. Bilan régional - Rive sud de l'estuaire moyen du Saint-Laurent: Zones d'intervention prioritaire 15, 16 et 17. Environnement Canada - région du Québec.
Gagnon, V., Camirand, R., and Blouin, M. 2010. Pollution incident following the sinking of the *Irving Whale* in 1970: Action plan to update the intervention strategy for managing bags buried in the Iles de la Madeleine dunes. Environmental Response Quebec Region, Canadian Coast Guard, Champlain, QC.
Galbraith, P., Plourde, S., and Starr, M. 2014a. Oceanographic Processes in the Estuary and Gulf. St. Lawrence Action Plan 2011-2026. Fisheries and Oceans Canada.
Galbraith, P.S. 2006. Winter water masses in the Gulf of St. Lawrence. J Geophys Res-Oceans **111**(C6). doi:Artn C06022
10.1029/2005jc003159.
Galbraith, P.S., Chassé, J., Gilbert, D., Larouche, P., Caverhill, C., Lefaivre, D., Brickman, D., Pettigrew, B., Devine, L., and Lafleur, C. 2014b. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2013. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. **62**: 84.
Galbraith, P.S., Chassé, J., Nicot, P., Caverhill, C., Gilbert, D., Pettigrew, B., Lefaivre, D., Brickman, D., Devine, L., and Lafleur, C. 2015. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2014. F.a.O. Canada.

Galbraith, P.S.C., J.; Caverhill, C.; Nicot, P.; Gilbert, D.; Pettigrew, B.; Lefaivre, D.; Brickman, D.; Devine, L.; Lafleur, C. 2017. Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2016.

Gilbert, D. 2004. Propagation of temperature signals from the northwest Atlantic continental shelf edge into the Laurentian Channel. *In* ICES. p. 12.

Gilbert, D., and Pettigrew, B. 1997. Interannual variability (1948-1994) of the CIL core temperature in the Gulf of St. Lawrence. Can J Fish Aquat Sci **54**: 57-67. doi:DOI 10.1139/f96-160.

Gilbert, D., Sundby, B., Gobeil, C., Mucci, A., and Tremblay, G.H. 2005. A seventy-two-year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary: The northwest Atlantic connection. Limnology and Oceanography **50**(5): 1654-1666. doi:DOI 10.4319/lo.2005.50.5.1654.

Global News. 2014. Tanker truck crashes into Saint Lawrence River. Available from https://globalnews.ca/news/1539076/tanker-truck-crashes-into-saint-lawrence-river/2018].

Godin, G. 1979. Tides in the St-Lawrence Gulf and Estuary. Naturaliste Canadien **106**(1): 105-121. Available from <Go to ISI>://WOS:A1979HL58500008 [accessed.

Government of Canada. 2017. St. Lawrence River: overview. Available from https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/st-lawrence-river.html2018].

Hamilton Spectator. 2010. Oil leak closes part of Seaway. Available from https://www.thespec.com/news-story/2164105-oil-leak-closes-part-of-seaway/2018].

Houston, G., Gaudreau, R., and Sinclair, M. 2013. A Review of Canada's Ship-source Oil Spill Preparedness and Response Regime: Setting the course for the future. Tanker Safety Panel Secretariat 978-1-100-54627-8, Ottawa, ON.

Koutitonsky, V.G. 1979. Water Mass-Transport at the Entrance of the St-Lawrence Estuary. Naturaliste Canadien **106**(1): 75-88. Available from <Go to ISI>://WOS:A1979HL58500006 [accessed.

Koutitonsky, V.G., and Bugden, G.L. 1991. The physical oceanography of the Gulf of St. Lawrence: A review with emphasis on the synoptic variability of the motion of St. Lawrence: Small ocean or big estuary? . Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences **113**: 57-90.

Koutitonsky, V.G., Long, B., Lefaivre, D., and Sala, M. 1991. The Influence of Hydrodynamical Processes on Sediment Transport in the Northern Gulf of St-Lawrence. Cont Shelf Res **11**(8-10): 1209-1221. doi:Doi 10.1016/0278-4343(91)90098-Q.

Kranck, K. 1979. Dynamics and Distribution of Suspended Particulate Matter in the St-Lawrence Estuary. Naturaliste Canadien **106**(1): 163-173. Available from <Go to ISI>://WOS:A1979HL58500012 [accessed.

Latremouille, M.P. (ed). 1974. Bedford Institute of Oceanography Biennial Review 1973/74. Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, NS.

Le Fouest, V., Zakardjian, B., Saucier, F.J., and Cizmeli, S.A. 2006. Application of SeaWIFS- and AVHRR-derived data for mesoscale and regional validation of a

3-D high-resolution physical-biological model of the Gulf of St. Lawrence (Canada). J Marine Syst **60**(1-2): 30-50. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.008.
Lee, K., Boudreau, M., Bugden, J., Burridge, L., Cobanli, S.E., Courtenay, S., Grenon, S., Hollebone, B., Kepkay, P., Li, Z., Lyons, M., Niu, H., King, T.L., MacDonald, S., McIntyre, E.C., Robinson, B., Ryan, S.A., and Wohlgeschaffen, G. 2011. State of Knowledge Review of Fate and Effect of Oil in the Arctic Marine Environment. National Energy Board of Canada, Ottawa, ON.
Mucci, A., Starr, M., Gilbert, D., and Sundby, B. 2011. Acidification of Lower St. Lawrence Estuary Bottom Waters. Atmosphere-Ocean **49**(3): 206-218. doi:10.1080/07055900.2011.599265.
Muir, L.R. 1982. Internal tides in a partially mixed estuary. Canada Centre for Inlands waters, Burlinfton, Ont.
Neu, H.J.A. 1970. A study on mixing and circulation in the St. Lawrence estuary up to 1964.
Neu, H.J.A. 1976. Runoff regulation for hydro-power and its effect on the ocean environment. Hydr. Scien. Bull. **3**(9): 433-444.
New World Encyclopedia. 2015. Saint Lawrence River. Available from http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Saint_Lawrence_River2018].
Ottawa River Regulation Planning Board. 2018. Ottawa River at Carillon. Available from http://www.ottawariver.ca/ottawa-river-carillon.php.
Pineault, S. 2014. Les effluents liquides du secteur des raffineries de pétrole. Gouvernement du Québec.
Reid, S.J. 1977. Circulation and mixing in the St. Lawrence estuary near Ilet Rouge. Fisheries and Oceans Canada.
Robichaud, B., and Mullock, J. 2001a. The Weather of Atlantic Canada and Eastern Quebec: Chapter 5.
Robichaud, B., and Mullock, J. 2001b. The weather of Atlantic Canada and eastern Quebec graphic area forecast 34 Atlantic Region. NAV Canada.
Robitaille, J. 1998. Regional Assessment: Pointe-du-Lac–Deschambault. Environment Canada – Quebec Region.
Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P., and Bilodeau, L. 2000. Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada. Hydrological Processes **14**(1): 21-36. doi:DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(200001)14:1<21::AID-HYP907>3.0.CO;2-7.
Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Bismuth, E., Senneville, S., and Caveen, J. 2015. Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada. Climate Dynamics.
Saucier, F.J., and Chasse, J. 2000. Tidal circulation and buoyancy effects in the St. Lawrence Estuary. Atmosphere-Ocean **38**(4): 505-556. doi:Doi 10.1080/07055900.2000.9649658.
Saucier, F.J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P., and Ritchie, H. 2003. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. J Geophys Res-Oceans **108**(C8). doi:Artn 3269 10.1029/2000jc000686.
St. Lawrence Centre. 1991. A river, estuaries, and a gulf, broad hydrographic divisions of the St. Lawrence. *In* The Environmental Atlas of the St. Lawrence. *Edited by* J.

Raveneau and O. Mercier and E. Saint-Pierre and N. Lavigne and E. Drueding. Environment Canada, Montreal, Quebec. p. 1 hardcopy plate.
St. Lawrence Centre. 1993. St. Lawrence Update. Environment Canada, Montreal, Quebec.
St. Lawrence Centre. 1996a. State of the Environment Report on the St. Lawrence River. Volume 2: The state of the St. Lawrence. Environment Canada - Quebec Region, Montreal, Quebec.
St. Lawrence Centre. 1996b. State of the Environment Report on the St. Lawrence River. Volume 1: The St. Lawrence ecosystem. Environment Canada - Quebec Region, Montreal, Quebec.
Tang, C.T., and Bennett, A.S. 1981. Physical oceanographic observations in the northwestern Gulf of St. Lawrence. Bedford Institute of Oceanography, F.a.O. Canada, Dartmouth, NS.
The Toronto Star. 2010. Cleanup of oil spill near Montreal ties up a dozen ships in St. Lawrence. Available from https://www.thestar.com/news/canada/2010/07/14/cleanup_of_oil_spill_near_montreal_ties_up_a_dozen_ships_in_st_lawrence.html2018].
The Weather Network. 2019. Weather Statistics: Mont-Joli, QC 2019].
Transportation Safety Board of Canada. 1991. Marine Investigation Report M91L3012. Government of Canada, http://www.tsb.gc.ca/ENG/rapports-reports/marine/1991/m91l3012/m91l3012.asp.
Transportation Safety Board of Canada. 2005. Marine Investigation Report M05L0205. Government of Canada, http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/2005/m05l0205/m05l0205.asp.
Transportation Safety Board of Canada. 2014. Canadian Transportation Accident Investigation and Safety Board Act. *In* Transportation Safety Board Regulations. *Edited by* G.o. Canada, http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2014-37/FullText.html.
Transportation Safety Board of Canada. 2018. TSB Accident Statistics. http://www.tsb.gc.ca/eng/stats/.
Vincent, W.F., and Dodson, J.J. 1999. The St. Lawrence River, Canada-USA: the need for an ecosystem-level understanding of large rivers. Jpn. J. Limnol. **60**: 29-50.
WSP Canada. 2014. Risk assessment for marine spills in Canadian waters Phase 1: Oil spills south of the 60th parallel. WSP Canada Inc. 131-17593-00.