



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

**Rapport de l'étape 2.1 :
Simuler les changements de conditions de salinité dans la zone de transition saline
dans un contexte de changements climatiques**

Rapport final

Mars 2022

Étude de vulnérabilité des sources d'eau potable au fleuve des villes de Québec et de Lévis en regard de la salinité. Rapport de l'étape 2.1 : Simuler les changements de conditions de salinité dans la zone de transition saline

Rapport final

Mars 2022

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Pascal Bourgault, Ouranos
Jean-Éric Tremblay, Université Laval
Chantal Quintin, Ouranos
Charles-Éric Bernier, Communauté métropolitaine de Québec

Révision :

Caroline Larrivée, Ouranos
Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos
Ursule Boyer-Villemare, Ouranos
Anthony Kish, Communauté métropolitaine de Québec

Révision linguistique et mise en page :

Anne-Cécile Cottin, Ouranos

Titre du projet Ouranos :

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

Numéro du projet Ouranos :

510030

Citation suggérée : Bourgault, P., Tremblay, J-É., Quintin, C., Bernier, C-É. (2021). *Étude de vulnérabilité des sources d'eau potable au fleuve des villes de Québec et de Lévis en regard de la salinité Rapport de l'étape 2.1 : Simuler les changements de conditions de salinité dans la zone de transition saline dans un contexte de changements climatiques*. Rapport présenté Ouranos. Montréal. 35 p. + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible grâce au financement accordé par MELCC via le Fonds vert versé dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d’action 2013-2020 sur les changements climatiques, ainsi que par les contributions financières de la Ville de Québec et de la Ville de Lévis.

Nous tenons à remercier plus particulièrement pour leur collaboration Louis-Philippe Nadeau et Daniel Bourgault (ISMER), David Huard (Ouranos), Richard Turcotte (MELCC) et Pascal Matte (Environnement Canada).



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Depuis 1999, plusieurs études ont soulevé l'hypothèse que les effets des changements climatiques se traduiront par une hausse du niveau marin et par une baisse du débit du fleuve Saint-Laurent. Cette situation provoquerait un déplacement de la zone de transition saline (ZTS) vers l'amont du fleuve Saint-Laurent, ce qui pourrait compromettre l'alimentation des prises d'eau au fleuve de certaines municipalités de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). Par ailleurs, des pointes de salinité élevées ont été observées ces dernières années à l'usine de production d'eau potable de Sainte-Foy. Bien que les pointes se situent en deçà du seuil de potabilité, les villes de Québec et de Lévis sont préoccupées par cette situation.

C'est dans ce contexte que la CMQ, Ouranos, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), ainsi que les villes de Québec et de Lévis, ont élaboré un projet visant à mieux comprendre la variabilité spatiale et temporelle actuelle et future de la salinité dans la ZTS. Le projet sur la salinité vise les objectifs suivants :

1. Analyser la variabilité temporelle et spatiale actuelle de la salinité de l'eau observée à proximité et à l'entrée des prises d'eau potable dans le fleuve et les rivières, et en identifier les causes. Cette première étape a été réalisée et fait l'objet de deux rapports disponibles en ligne ([hyperlien des rapports](#)).
2. Modéliser le déplacement du front salin selon des scénarios de hausses du niveau marin et des changements du débit fluvial d'ici 25 et 50 ans afin d'évaluer la possibilité qu'un tel phénomène puisse survenir. Cette étape fait l'objet du présent rapport.
3. Valoriser, diffuser et vulgariser les nouvelles connaissances aux utilisateurs et aux bénéficiaires potentiels.

L'étape 2 du projet, qui fait l'objet du présent rapport, vise à évaluer la probabilité et l'impact d'un éventuel déplacement du front salin sur l'approvisionnement des prises d'eau au fleuve des villes de Québec et de Lévis. Pour ce faire, une analyse de sensibilité a été réalisée, accompagnée d'une campagne d'échantillonnage dans le fleuve afin de renforcer les résultats de la modélisation.

Les caractéristiques du front salin

Québec-Océan a obtenu le mandat de réaliser un plan et un programme d'échantillonnage afin de contribuer au deuxième volet de ce présent projet. Le programme se divise en trois phases d'échantillonnage entre 2018 et 2020, dont les deux premières ont été réalisées dans le cadre de la première phase du projet. Il vise à apporter des informations quantitatives quant à la position et à la configuration actuelle du front salin, afin d'alimenter les analyses ainsi que la réalisation de l'étude de sensibilité. Au total, 222 stations ont été visitées entre le secteur Cap-Rouge-Saint-Nicolas à l'ouest et la pointe de l'île-aux-Oies à l'est. Pour chacune des stations, des données de conductivité ont été récoltées dans différentes conditions (étiage estival, crue printanière et débit intermédiaire).

Les résultats montrent que le chenal situé au nord-est de l'île d'Orléans est la voie principale d'avancée du front de salinité vers l'ouest. Ce constat avait également été observé dans le cadre de l'étape 1 de ce projet et compatible avec les prévisions faites par des modélisations numériques réalisées dans le passé.

Les résultats montrent également que le débit fluvial contrôle la position moyenne du front salin entre mai et juin, mais que ce sont les variations de marées et de vent qui déterminent la position fine du front entre juillet et septembre. L'avancée du front salin est minimale lors de la crue printanière, maximale lors de période d'étiage à la fin de l'été, et un peu moindre à l'automne. Ainsi, la distance minimale enregistrée en condition de marée haute entre le front salin et l'UPE la plus à l'est (UPE de Lévis) varie autour de 35 km à l'été et à l'automne et de 50 km au printemps. À l'aide d'un modèle de régression explorant des combinaisons plausibles qui minimisent le débit fluvial et maximisent la hauteur de la marée et la vitesse des vents du Nord-est, la position du front salin se situe à 18 km de l'UPE la plus à l'est (UPE de Lévis).

L'analyse de sensibilité

Ouranos a obtenu le mandat de réaliser une analyse de sensibilité afin de simuler la dynamique estuarienne selon les paramètres hydroclimatiques actuels et projetés pour évaluer le risque de contamination des prises d'eau potable des villes de Québec et de Lévis par le déplacement potentiel du front salin pour les 20 et 50 prochaines années.

Le choix des simulations s'est arrêté sur une configuration bidimensionnelle (2D) du MIT General Circulation Model (MITgcm), un modèle numérique qui permet d'intégrer des équations non-linéaires de la dynamique des fluides en utilisant des paramètres physiques. Toutefois, ce choix comporte quelques défis, notamment par son utilisation limitée dans un contexte estuarien similaire au Québec et le manque de données pour bien calibrer le modèle.

Selon cette perspective et à la suite de plusieurs tests, il a malheureusement été établi que l'estuaire du Saint-Laurent est une zone trop complexe pour ces simplifications (nécessaires à la réalisation de l'analyse dans le cadre du projet) et la modélisation n'a par conséquent pas fourni les résultats escomptés quant à l'évaluation du risque de contamination des prises d'eau potable des villes de Québec et de Lévis par le déplacement potentiel du front salin pour les 20 et 50 prochaines années. Or, les données de conductivité récoltées dans le cadre de ce projet et la modélisation permettent de mettre au jour l'importance du mélange tourbillonnaire latéral et d'échanges verticaux dus à la rencontre des masses d'eau douce et salée, qui diffèrent en densité. Les travaux en cours réalisés par Pêches et Océans Canada et Environnement et Changements climatiques Canada permettront de mieux comprendre cette complexité.

Conclusions

Un système complexe qui requiert un effort important de modélisation et d'acquisition de données

Les résultats montrent que la ZTS se caractérise par des conditions hydrodynamiques complexes régies par des facteurs importants tels que la bathymétrie, les apports d'eau douce, la marée, le vent, etc. Le modèle développé en 2D est trop limité pour servir de base à la simulation de la sensibilité de la ZTS sur

plusieurs décennies en fonction du rehaussement marin. Ainsi, la question requiert une avancée scientifique pour obtenir un modèle plus complexe (par exemple 3D) capable de reproduire et prévoir la position du front salin.

Des estimations incertaines, mais une variabilité de la ZTS dans le temps et l'espace

Les résultats indiquent que les prises d'eau potable de la ville de Québec et de Lévis sont actuellement hors de portée de la ZTS. Par contre, bien qu'il soit difficile d'avoir une estimation précise de l'étendue du déplacement de la ZTS lié aux changements climatiques, en raison de la complexité du phénomène et de l'absence de suivi multi-annuel sur le terrain, il n'en demeure pas moins que des changements de conditions de salinité s'opéreront à moyen et long terme. Compte tenu que le débit du fleuve influence la position du front salin, ces variations représentent une source de préoccupation, qui est à surveiller, notamment lors des étiages importants (ex. $<8,000 \text{ m}^3/\text{s}$). À long terme, le rehaussement marin estimé entre 0 et 32 cm en 2050 au niveau de Québec, ajoutera une source de variabilité supplémentaire. Il n'est toutefois pas encore possible de statuer sur l'ampleur et la probabilité d'une avancée future de la ZTS en lien avec ce phénomène.

Pistes de solution recommandées

Malgré les défis rencontrés dans le cadre de cette 2e étape du projet, il est fort recommandé que des décisions d'adaptation soient prises même s'il existe des incertitudes quant à l'étendue du déplacement de la ZTS. À cet égard, le principe de précaution s'applique, en priorisant des activités sans regret, à faible coût ou facilement modifiables. Cette approche permet de limiter les choix irréversibles qui pourraient entraîner une maladaptation, évitant ainsi de rendre le secteur vulnérable si le climat évolue de manière négative.

Suivant ce principe, nous recommandons les actions suivantes aux acteurs du territoire de la CMQ. Ces recommandations sont en lien avec la vision métropolitaine de l'eau où les changements climatiques font partie des cinq piliers de la vision et du plan d'action de la TCR dans lequel la qualité de l'eau du fleuve est une priorité identifiée par le milieu. Voici quelques pistes d'action découlant de ce projet :

- Assurer une veille à la recherche

Suivre les travaux de modélisation en cours menés au gouvernement fédéral (Pêches et Océans Canada et Environnement et Changements climatiques Canada).

- Contribuer à la recherche

Soutenir des campagnes d'acquisition de connaissances sur le terrain à des intervalles réguliers (par ex. 5 ans) afin de bonifier le jeu de données actuel, détecter d'éventuelles tendances au changement dans la position du front salin, puis appuyer de façon ciblée la calibration des modèles numériques pour le secteur.

- Orienter les décisions selon les nouvelles connaissances

Maintenir le dialogue avec la recherche pour assurer l'intégration des nouvelles connaissances dans la prise de décision.

Par ailleurs, nous proposons d'autres analyses qui gagneraient à être explorées pour soutenir la prise de décision vers la résilience des communautés du territoire de la CMQ face à l'incertitude liée au déplacement du front salin. Voici quelques pistes d'analyse à privilégier :

- Évaluer la résistance des infrastructures aux extrêmes de salinité pour déterminer des seuils de tolérance ;
- Dénombrer les infrastructures qui pourraient être affectées selon les seuils de tolérance ;
- Analyser le portrait des populations autant que des activités potentiellement affectées par une rupture de service des prises d'eau potables pour déterminer les interdépendances, seuils de tolérance à la conjonction d'événements et sources de risque ;
- Réaliser un inventaire de solutions.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	ii
Résumé exécutif	iii
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
1. CONTEXTE	1
1.1 Mandat.....	1
1.2 Structure du rapport	2
1.3 Territoire à l'étude	2
2. PROGRAMME D'ÉCHANTILLONNAGE.....	3
2.1 Mandat et équipe de réalisation.....	3
2.2 Stratégie d'échantillonnage	3
2.2.1 Territoire à l'étude	3
2.2.2 Échantillonnage.....	4
2.2.3 Méthodologie et protocole.....	5
2.2.4 Variables mesurées	6
2.2.5 Analyses	7
2.3 Résultats et discussion	7
2.3.1 Configuration du front salin	7
2.3.2 Analyse des variables explicatives	9
2.3.3 Position du front salin aux marées hautes de vive-eau en 2018, 2019 et 2020	12
2.3.4 Analyses statistiques des déterminants physiques de la position du front salin	14
2.3.5 Reconstruction de la position du front salin pour l'année 2019	17
2.4 Conclusion.....	19
3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ.....	20
3.1 Mandat et équipe de réalisation.....	20
3.2 Méthodologie.....	21
3.2.1 Justification du choix du modèle	21

3.2.2	Hypothèses de simplification	22
3.2.3	Caractéristiques du modèle	22
3.2.3.1	Moteur dynamique et grille	22
3.2.3.2	Paramétrisations	24
3.2.3.3	Forçage.....	24
3.2.4	Données d'entrée.....	25
3.2.5	Projection de l'impact des changements climatiques pour les 25 et 50 prochaines années	26
3.2.5.1	Débit.....	26
3.2.5.2	Salinité à l'aval	26
3.2.5.3	Rehaussement marin	27
3.3	Résultats et discussion	27
3.3.1	Résolution des instabilités de Kelvin-Helmholtz.....	27
3.3.2	Calibration et comparaison avec les observations	28
3.3.2.1	Stratification.....	28
3.3.2.2	Signal de débit.....	30
3.3.3	Sensibilité de la position du front selon le débit et la marée	31
3.3.4	Sensibilité selon les autres paramètres	32
3.3.5	Solutions et prochaines étapes.....	32
3.4	Conclusion.....	33
	Références.....	34
	Annexes.....	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Territoire à l'étude	2
Figure 2. Localisation des stations échantillonnées dans le cadre du projet.....	4
Figure 3. Relation entre la bathymétrie (en haut), la conductivité spécifique (au centre) et la conductivité normalisée par la valeur maximale observée sur chacun des transects Nord-Sud (points blancs) à la pointe est de l'Île d'Orléans (en bas).	8
Figure 4. Progression de la conductivité spécifique entre la pointe Est de l'Île d'Orléans (Saint-Joachim) et l'Île-aux-Coudres (Baie Saint-Paul) lors du long transect effectué le 1er septembre 2020.	9
Figure 5. Débit fluvial à Québec pour la période 1962-2020 (moyenne en jaune, écart-type en gris) et les trois années d'échantillonnage (2018 en bleu, 2019 en vert, 2020 en rouge). Les cercles correspondent aux différentes dates d'échantillonnage pour chacune des années. Les débits sont estimés à partir de Bourgault et Matte (2020).	9
Figure 6. Hauteur prédite de la marée à l'étal (rouge) et au moment de l'échantillonnage (noir) à l'emplacement du front salin lors des sorties de 2018, 2019 et 2020. Les stations sont ordonnées en fonction du jour julien, sans égard à l'année.	10
Figure 7. Roses des vents (vitesse et direction) incluant toutes les données horaires de la station de l'Île-aux-Grues pour la période d'échantillonnage du 25 mai au 19 septembre 2020 (en haut) et le mois d'octobre pour la période 2005 – 2020 (en bas). Les graphiques ont été produits à l'aide de l'outil Environmental Mesonet de l'Iowa State University (https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/dyn_windrose.phtml).....	11
Figure 8. Conductivité spécifique en fonction de la profondeur le long du chenal Nord. La position la plus à l'ouest (distance de zéro) est en face de Château Richer.	13
Figure 9. Relation entre la position du front en surface et à la profondeur du maximum de conductivité. Les deux positions sont identiques le long de la ligne pointillée.....	14
Figure 10. Relations en la position du front salin en surface (distance de la prise d'eau Desjardins à Lévis), le débit fluvial à Québec (en haut à gauche) et trois modèles de régression multiple tenant compte du débit et de 1) la hauteur de marée (en haut à droite), 2) la hauteur de la marée et du vent soufflant dans l'axe du fleuve (en bas à gauche), et 3) la hauteur de la marée et du vent soufflant du Nord-est uniquement (en bas à droite). Dans le cas des régression multiples, le pouvoir prédictif du modèle s'évalue en comparant les valeurs prédites et observées. Plus les valeurs sont proches de la ligne pointillée, plus le modèle est robuste.	15
Figure 11. Position la plus à l'Ouest du front salin en surface (flèches bleues) selon les observations (été 2020) et telle que produite par la régression multiple pour une combinaison de valeurs historiques extrêmes de débit fluvial, de marée et de vent (période 1960 -2020).....	17

Figure 12. Reconstruction de la position du front salin (en haut) pour la surface (ligne noires) entre le 1er avril et le 15 octobre 2019 à chaque étal de marée basse et haute. Cette reconstruction est faite en utilisant la régression multiple et les données tirées des archives de hauteur de marée, de vents horaires et de débit journalier pour 2019. Le trait en gris donne l'intervalle possible de distance du front pour le maximum de conductivité en sous-surface (voir Figure 8). Le graphique du bas montre les données de conductivité enregistrées à Saint-Anne de Beaupré (en bas) durant une partie de la période.....	18
Figure 13. Domaine du modèle	23
Figure 14. Profils de forçage	25
Figure 15. Exemple pour calcul de D et M	25
Figure 16. Vorticité dans le plan X-Z du modèle ($\omega = du/dz - dw/dx$) pour trois cas d'une simulation idéalisée servant à calibrer la résolution. La colonne d'eau est initialisée avec deux couches de vitesses contraire. La résolution en X varie selon le cas, mais la résolution en Z est constante (1 m).	28
Figure 17. Stratification	30
Figure 18. Signal de débit	31
Figure 19. Convergence et non-convergence	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Statistiques de la régression multiple qui inclut le débit fluvial, la hauteur de marée et la vitesse des vents provenant du Nord-est comme variables explicatives de la position du front salin.	16
---	----

1. CONTEXTE

Depuis 1999, plusieurs études ont soulevé l'hypothèse que les effets des changements climatiques se traduiront par une hausse du niveau marin et par une baisse du débit du fleuve Saint-Laurent. Cette situation provoquerait un déplacement de la zone de transition saline (ZTS) vers l'amont du fleuve Saint-Laurent, ce qui pourrait compromettre l'alimentation des prises d'eau au fleuve de certaines municipalités de la CMQ. Par ailleurs, des pointes de salinité élevées ont été observées ces dernières années à l'usine de production d'eau potable de Sainte-Foy. Bien que les pointes se situent en deçà du seuil de potabilité, les villes de Québec et de Lévis sont préoccupées par cette situation.

C'est dans ce contexte que la CMQ, Ouranos, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) ainsi que les villes de Québec et de Lévis ont élaboré un projet visant à mieux comprendre la variabilité spatiale et temporelle actuelle et future de la salinité dans la ZTS. Le projet sur la salinité vise les objectifs suivants :

1. Analyser la variabilité temporelle et spatiale actuelle de la salinité de l'eau observée à proximité et à l'entrée des prises d'eau potable dans le fleuve et les rivières, et en identifier les causes. Cette première étape a été réalisée et fait l'objet de deux rapports disponibles en ligne ([hyperlien des rapports](#)).
2. Modéliser le déplacement du front salin selon des scénarios de hausses du niveau marin et des changements du débit fluvial d'ici 25 et 50 ans afin d'évaluer la possibilité qu'un tel phénomène puisse survenir.
3. Valoriser, diffuser et vulgariser les nouvelles connaissances aux utilisateurs et aux bénéficiaires potentiels.

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

1.1 MANDAT

Ouranos et Québec-Océan ont obtenu le mandat de réaliser la deuxième étape du projet qui vise à évaluer la probabilité et l'impact d'un éventuel déplacement du front salin sur l'approvisionnement des prises d'eau au fleuve des villes de Québec et de Lévis. Pour ce faire, une analyse de sensibilité, accompagnée d'une campagne d'échantillonnage dans le fleuve Saint-Laurent, a été réalisée. Pilotée par Ouranos, l'analyse de sensibilité a été réalisée à l'aide du modèle numérique, le MIT General Circulation Model (MITgcm), une première application en milieu estuarien au Québec. Pour renforcer les résultats de l'analyse, celle-ci s'appuie sur trois campagnes d'échantillonnage dans le fleuve Saint-Laurent réalisées par Québec-Océan en 2018, 2019, 2020.

2. PROGRAMME D'ÉCHANTILLONNAGE

2.1 MANDAT ET ÉQUIPE DE RÉALISATION

Québec Océan a obtenu le mandat de réaliser un plan et un programme d'échantillonnage afin de contribuer au deuxième volet du présent projet. Le programme d'échantillonnage se divise en trois phases (2018, 2019, 2020). Il vise à apporter des informations quantitatives quant à la position et à la configuration du front salin, afin d'alimenter les analyses ainsi que la réalisation de l'étude de sensibilité (section 3).

L'équipe de réalisation du programme d'échantillonnage au fleuve est composée des membres suivants de Québec-Océan :

Jean-Éric Tremblay	Direction du projet - Rédaction et analyse
Sylvain Blondeau	Coordination des opérations et navigation
Gabrièle Deslongchamps	Échantillonnage, Rédaction et analyse
Pascal Guillot	Contrôle de la qualité des données
Guillaume Cinq-Mars	Échantillonnage

Notons aussi la collaboration de Pascal Matte (Environnement Canada), et de Daniel Bourgault (ISMER) pour le partage de données et leur avis scientifique.

Cette section se divise en deux parties. Une description de la stratégie d'échantillonnage est présentée, suivie par une analyse des résultats.

2.2 STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

2.2.1 Territoire à l'étude

Le territoire à l'étude s'étend à partir du secteur Cap-Rouge-Saint-Nicolas à l'ouest (secteur ouest) jusqu'à la pointe de l'île-aux-Oies à l'est (secteur est) (Figure 2). La ZTS couvre approximativement la région entre l'île d'Orléans et L'Isle-aux-Coudres. Elle est composée de la partie inférieure de l'estuaire fluvial, caractérisée par des eaux douces, et par la partie supérieure de l'estuaire moyen où les eaux douces du fleuve se mélangent aux eaux salées.

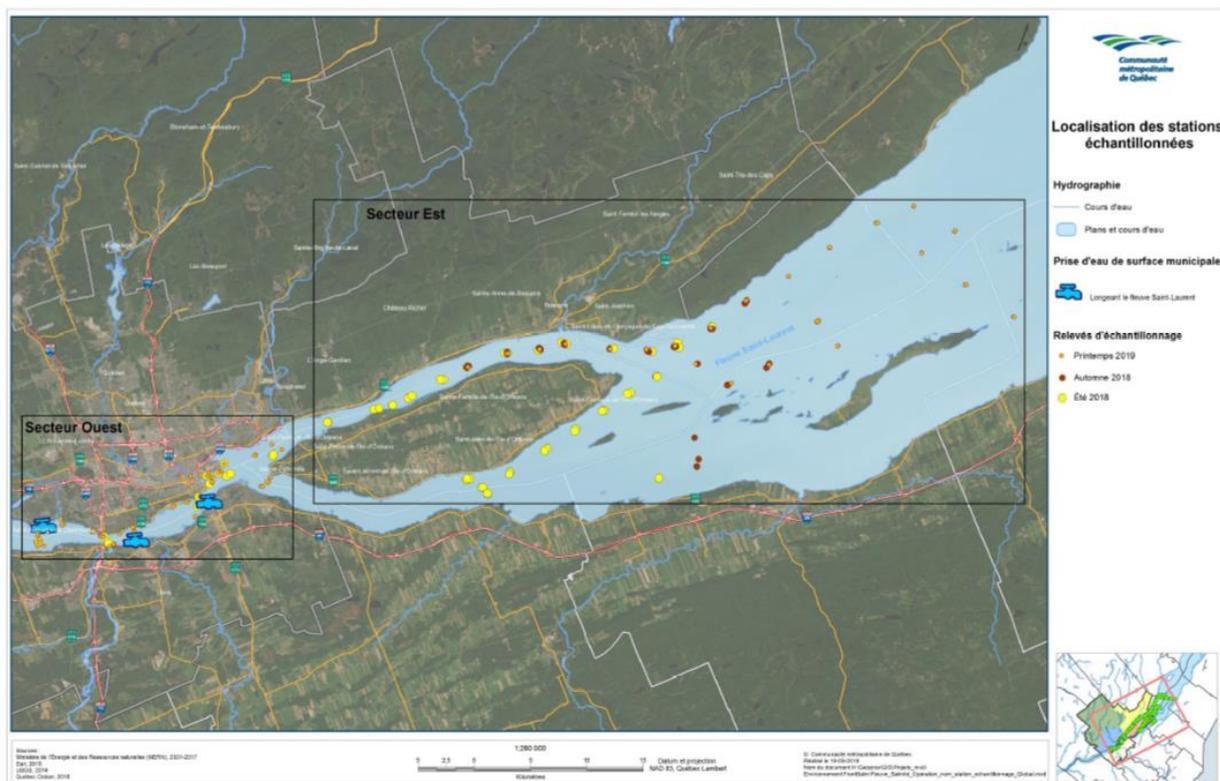


Figure 2. Localisation des stations échantillonnées dans le cadre du projet

2.2.2 Échantillonnage

Le programme d'échantillonnage est divisé en trois phases s'échelonnant entre 2018 et 2020. La stratégie d'échantillonnage des campagnes de 2018 et 2019 est décrite dans le [rapport 1.2](#). Elle est basée notamment sur trois périodes de mesures visant la période d'étiage estival (débit minimum), la crue printanière (débit maximum) et les débits intermédiaires de l'automne (lorsque les marées peuvent être particulièrement fortes sous l'action du vent), afin de dresser un portrait sur la variabilité de la salinité. 211 stations ont été échantillonnées en 2018 et 2019. La troisième campagne d'échantillonnage, réalisée en 2020, vise à compléter les données déjà acquises afin d'apporter des informations quantitatives quant à la position et à la configuration du front salin, puis d'alimenter les analyses ainsi que la réalisation de l'étude de sensibilité, notamment en confirmant la relation positive entre le débit fluvial à Québec et la distance qui sépare le front salin marin de la prise d'eau de Lévis à marée haute, hypothèse mentionnée dans le rapport 1.2. En effet, cette observation, bien qu'intuitive et plausible, était basée sur seulement trois moments d'échantillonnages (été 2018, automne 2018 et printemps 2019). L'échantillonnage du printemps 2019 s'est avéré particulièrement utile puisque les débits étaient alors exceptionnellement élevés par rapport à la moyenne à long terme. Toutefois, l'écart entre les points d'été et d'automne en termes de débit étant relativement faible, la régression linéaire obtenue dépendait essentiellement de deux valeurs extrêmes. Par ailleurs, les valeurs de débit avaient été estimées grossièrement à partir de hauteurs d'eau en amont de Québec puisque des reconstructions de débit journalier à Québec n'étaient

pas disponibles. Il est donc difficile d'évaluer la robustesse réelle de la relation et présumer de sa forme entre les deux extrêmes.

Afin de détecter les avancées les plus à l'ouest du front salin en 2020, les dates de chacune des sorties ont été établies pour correspondre aux marées hautes de vive-eau se produisant à un intervalle d'environ deux semaines. Bien qu'une couverture synoptique parfaite ne soit pas possible lors d'une sortie donnée (c'est-à-dire que l'embarcation doit échantillonner les stations de manière séquentielle en tenant compte d'un ensemble de considérations logistiques). En raison de la dérive variable durant la prise de mesure, les coordonnées exactes d'une même station peuvent différer entre les échantillonnages à marée haute et basse. Puisqu'une progression rapide entre les stations était nécessaire pour couvrir un stade de marée de la manière la plus synoptique possible, l'échantillonnage se concentrait sur l'extrémité ouest du front salin et une seule station était visitée pour une longitude donnée le long du chenal Nord du fleuve. Afin de bien confirmer que l'avancée du sel vers l'ouest est maximale à l'endroit du chenal, une cartographie de la configuration du front de part et d'autre du chenal Nord a été effectuée le 3 septembre 2020 à la pointe est de l'île d'Orléans. Le 1^{er} septembre, un échantillonnage s'étendant de la pointe est de l'île d'Orléans jusqu'à la pointe ouest de l'île-aux-Coudres a été réalisé pour confirmer que le gradient de sel observé à l'extrémité ouest du front s'inscrit en continuité avec l'ensemble de la transition saline amorcée loin en aval.

2.2.3 Méthodologie et protocole

L'équipe est sortie à plusieurs reprises avec une embarcation de type Boston-Whaler de Québec-Océan. Sur chaque site, des données ont été recueillies en déployant une cage protectrice contenant un profileur CTD (sonde conductivité-température-profondeur, Seabird SBE19 plus V2 #7815) préalablement calibré chez le fabricant. Des vérifications périodiques ont également été réalisées par Québec-Océan avec un salinomètre de laboratoire. Il faut souligner que la sonde de conductivité est très stable et dérive imperceptiblement sur une période de plusieurs mois. La dérive nominale est de l'ordre de 1 S/cm par année et la calibration chez SeaBird est effectuée une fois par an.

Le CTD était d'abord immergé en surface. Après un temps d'attente pour l'équilibrage, le profileur était descendu lentement jusqu'à environ un mètre au-dessus du fond. Afin de contrevérifier la calibration du CTD, des échantillons d'eau ont été prélevés en surface à un sous-ensemble de stations réparties le long de la zone frontale. Les mesures effectuées sur ces échantillons avec un salinomètre de laboratoire ont confirmé l'exactitude des données fournies par le CTD. Ces données, qui sont recueillies plusieurs fois par seconde par le profileur, ont ensuite été interpolées pour chaque demi-mètre de profondeur. Les valeurs montrées dans le présent rapport sont exprimées en conductivité spécifique (normalisée à 25 °C). Afin de bien cerner les facteurs physiques qui influencent la position du front, les données provenant de stations précédemment échantillonnées à marées haute et basse en 2018 et 2019 (voir rapport 1.2) ont été incluses lors des analyses statistiques. Au total, 222 stations ont été visitées pour l'ensemble du programme d'échantillonnage.

2.2.4 Variables mesurées

La position du front salin a été déterminée selon le critère de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ précédemment établi dans le rapport 1.2. Pour ce faire, nous avons considéré la forme de la relation entre la conductivité et la distance le long du chenal, puis déterminé par interpolation spatiale (linéaire ou autre selon la forme de la relation) l'endroit où la conductivité atteignait 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre deux stations.

Dans les analyses visant à expliquer la position du front salin, nous avons considéré comme variables potentiellement explicatives le débit, la hauteur de la marée et la vitesse du vent dans l'axe du fleuve. Le débit moyen journalier lors des sorties a été estimé en collaboration avec Pascal Matte (Environnement Canada) et Daniel Bourgeault (UQAR/ISMER) d'après la méthode qu'ils ont publiée récemment (Bourgeault et Matte 2020).

Le débit

Puisque la zone visée par ces estimations est à la hauteur de la ville de Québec, il y a un décalage spatial d'au moins 35 km avec la position du front, situé plus à l'est. Ce décalage correspond environ à environ une journée de transit selon la vitesse des courants moyens à Québec (estimés en divisant le débit moyen par l'aire de la section transversale du fleuve). Pour cette raison, nous avons utilisé le débit moyen de la journée précédant celle de l'échantillonnage dans les analyses. Lors des analyses statistiques, le pouvoir prédictif du débit au jour d'échantillonnage s'est en effet avéré légèrement inférieur à celui du débit au jour précédent.

La hauteur de la marée

Afin de calculer la hauteur de marée correspondant à la position du front salin et au moment où l'embarcation l'a croisé, les hauteurs de marée prédites pour les sites côtiers les plus proches qui encadraient cette position à l'est et à l'ouest ont d'abord été déterminées par interpolation temporelle des données horaires fournies par Environnement Canada pour chacun de ces sites. Ensuite, une interpolation spatiale a été faite pour déterminer la hauteur de marée prédite à la position du front salin.

La force du vent dans l'axe du fleuve

Les données horaires de vent ont été prises à la station de l'Île-aux-Grues d'Environnement Canada. Cette station a été privilégiée puisqu'elle est au centre du fleuve et bien exposée aux vents soufflant dans l'axe fluvial. La composante de vitesse parallèle à cet axe a été calculée par trigonométrie à partir de la direction et de la vitesse du vent enregistrées à la station. Une analyse exploratoire a indiqué qu'une moyenne des vents sur une période de 7 heures avant l'échantillonnage avait un pouvoir prédictif supérieur à des périodes plus courtes ou plus longues lors des analyses statistiques. Deux approches ont ensuite été testées : une première dans laquelle les vents soufflant de l'aval (valeurs positives) et de l'amont (valeurs négatives) sur un axe moyen de 40° ont été conservés pour les analyses, et une seconde dans laquelle les vents soufflant de l'amont ont été mis à zéro, et seule la vitesse des vents soufflant de l'aval sur un axe de 50° a été retenue. Cette dernière approche s'est avérée avoir un pouvoir prédictif légèrement supérieur, qui peut s'expliquer par le fait que la géographie régionale donne beaucoup moins d'emprise aux vents du sud-ouest sur la portion fluviale située entre l'Île d'Orléans et la côte de Beauport.

Puisque la friction appliquée par le vent à la surface de l'océan est proportionnelle au carré de sa vitesse, ce sont ces valeurs qui ont été utilisées dans les analyses.

2.2.5 Analyses

Des régressions simples ou multiples ont été employées pour évaluer l'effet du débit seul, puis du débit, de la marée et du vent sur la position du front salin. D'autres analyses exploratoires ont confirmé que le carré de la vitesse du vent avait un pouvoir prédictif supérieur à sa vitesse non transformée, et que le logarithme de la hauteur de marée à la position du front salin au moment de l'échantillonnage produisait de meilleurs résultats que la hauteur de marée non-transformée. Les données utilisées pour établir les régressions sont présentées au tableau 1 en annexe A.

2.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.3.1 Configuration du front salin

La

Figure 3 montre la relation entre la bathymétrie et la configuration spatiale du front salin établie lors de la sortie du 3 septembre 2020 à l'extrémité est de l'île d'Orléans. Afin de mieux visualiser la forme du front, une normalisation des données de conductivité, dans laquelle les valeurs observées à chaque station d'un transect Nord-Sud donné sont exprimées entre 0 et 1 (après division par la valeur maximale observée sur ce transect), a été ajoutée. L'ensemble de la

Figure 3 montre bien que le front est étroitement associé au chenal Nord. La conductivité diminue immédiatement au sud de ce chenal pour chacun des 4 transects et, pour le transect le plus à l'est, on voit également que la conductivité diminue au Nord du chenal. Les données confirment également l'absence d'une avancée significative de sel par le chenal Sud. Ce résultat confirme que les stations visitées lors de toutes les autres sorties (cercles blancs entourant les points sur la

Figure 3) sont positionnées adéquatement pour bien délimiter l'avancée du front salin vers l'ouest.

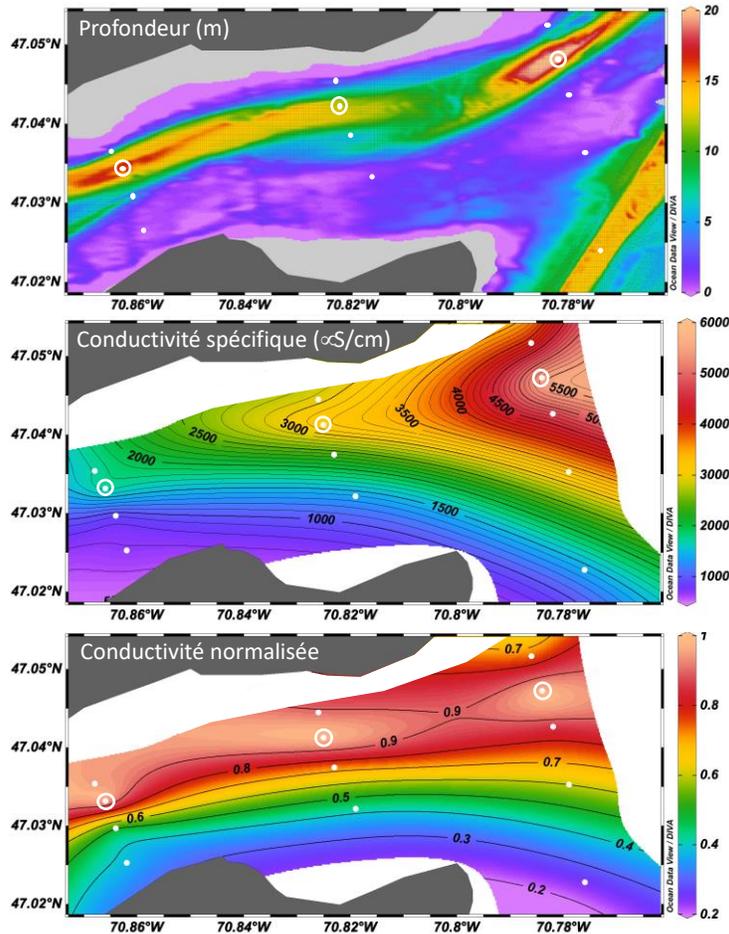


Figure 3. Relation entre la bathymétrie (en haut), la conductivité spécifique (au centre) et la conductivité normalisée par la valeur maximale observée sur chacun des transects Nord-Sud (points blancs) à la pointe est de l'île d'Orléans (en bas).

Les données récoltées dans le chenal Nord lors du long transect effectué le 1^{er} septembre 2020 montrent que la zone de transition saline s'étend de manière continue entre la pointe est de l'île d'Orléans et l'île-aux-Coudres (Figure 4). L'observation d'une progression relativement uniforme en profondeur le long du transect indique que la position du front, telle qu'établie avec le critère de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lors de l'ensemble des sorties, représente bien l'extrémité ouest de l'ensemble de la zone de transition. On constate également que l'écart des valeurs entre la surface et la profondeur est important à l'est, mais s'estompe à l'ouest.

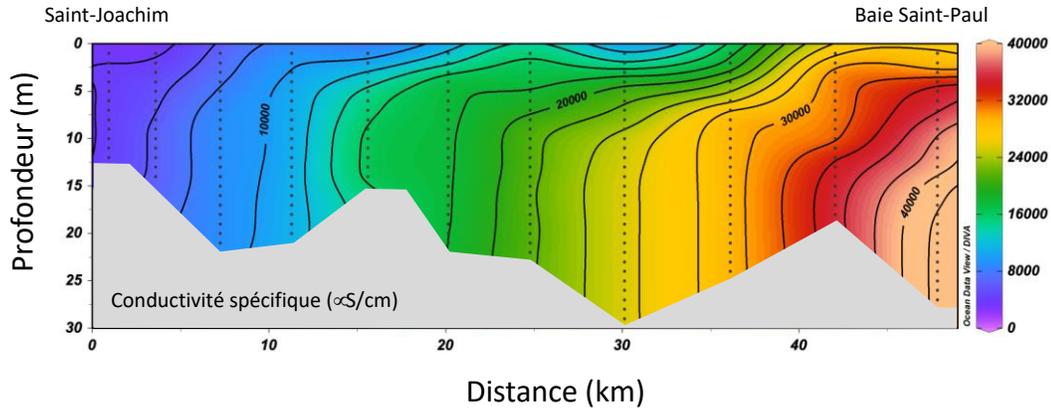


Figure 4. Progression de la conductivité spécifique entre la pointe Est de l'Île d'Orléans (Saint-Joachim) et l'Île-aux-Coudres (Baie Saint-Paul) lors du long transect effectué le 1er septembre 2020.

2.3.2 Analyse des variables explicatives

Débit fluvial

En période de crue printanière, les patrons de débit observés lors des trois années d'échantillonnage se sont révélés différents de la situation moyenne sur le long terme (Figure 5). Dans les trois cas, le débit maximum observé en période de crue était supérieur à la valeur moyenne à la même date pour la période 1960-2020. Ils étaient particulièrement élevés en 2018 et en 2019, puis se sont produits exceptionnellement tôt en 2020. Le débit estimé lors de l'unique sortie de 2019 (22800 m³/s) était représentatif des années de plus fortes crues (marge supérieure de l'écart-type pour la période 1962-2020). Toutes les autres sorties d'échantillonnage (2018 et 2020) ont eu lieu en période de débits faibles à intermédiaires (de 10600 à 15800 m³/s) qui, à l'exception d'octobre 2018, correspondent bien à la moyenne 1960-2020. Aucun débit particulièrement bas n'a été observé.

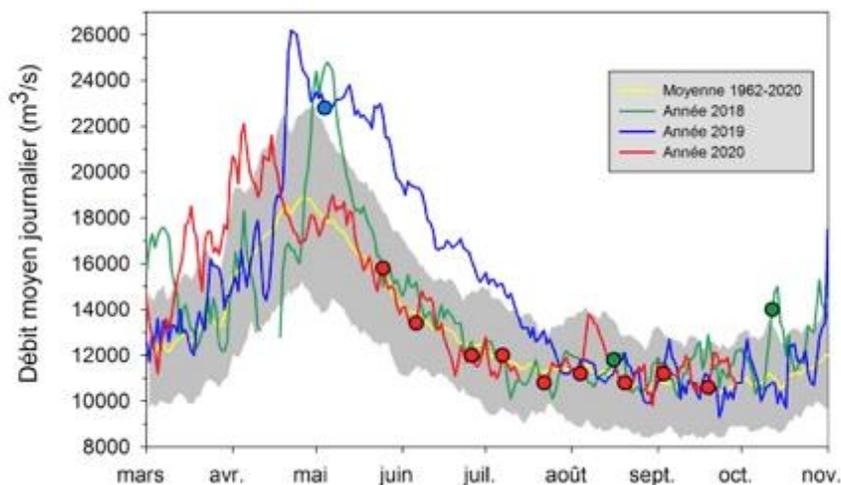


Figure 5. Débit fluvial à Québec pour la période 1962-2020 (moyenne en jaune, écart-type en gris) et les trois années d'échantillonnage (2018 en bleu, 2019 en vert, 2020 en rouge). Les cercles correspondent

aux différentes dates d'échantillonnage pour chacune des années. Les débits sont estimés à partir de Bourgault et Matte (2020).

Hauteurs de marées

Les hauteurs de marée prédites à la position du front salin ont varié de 4,5 mètres (mai 2019) à 6,2 mètres (juillet 2020) pour les sorties à marée haute, et de 0,3 à 0,7 mètres pour les sorties à marée basse (Figure 6). Ces hauteurs sont, en général, pratiquement les mêmes que celles prédites à l'étal, sauf pour le 25 mai 2020 où un ennui technique survenu lors de la première sortie de l'année a causé un écart appréciable. À titre indicatif, les plus fortes marées hautes prédites pour Saint-Anne-de-Beaupré n'excèdent pas 6,4 mètres.

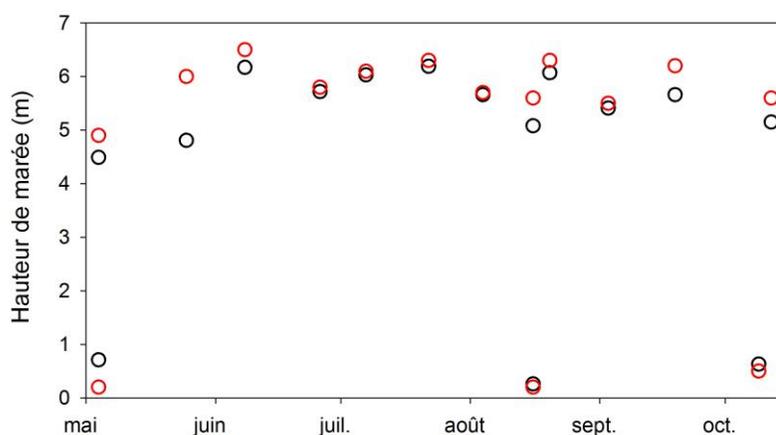


Figure 6. Hauteur prédite de la marée à l'étal (rouge) et au moment de l'échantillonnage (noir) à l'emplacement du front salin lors des sorties de 2018, 2019 et 2020. Les stations sont ordonnées en fonction du jour julien, sans égard à l'année.

Vitesse des vents

À la station météorologique de l'île-aux-Grues, les forts vents du Nord-est dans l'axe fluvial ont été peu fréquents (30 à 40 km/h pour < 1.5% du temps) entre mai et septembre 2020 (Figure 7). Le maximum observé sur une période de 7 heures précédant un échantillonnage fut de 37 km/h le 8 juin. Pour octobre, le mois de l'année où des vents plus forts coïncident avec des débits fluviaux encore faibles, des vents supérieurs à 40 km/h ont soufflé près de 2% du temps entre 2005 et 2020 (fenêtre de disponibilité des données sur Mesonet). Parmi les rares épisodes de vents très forts sur cette même période, mais pour tous mois confondus, on retrouve des pointes du Nord-est de 47-48 km/h (28 août 2011 et 15 octobre 2015), de 41 km/h (17 avril 2007) et de 40 km/h (26 mai 2013).

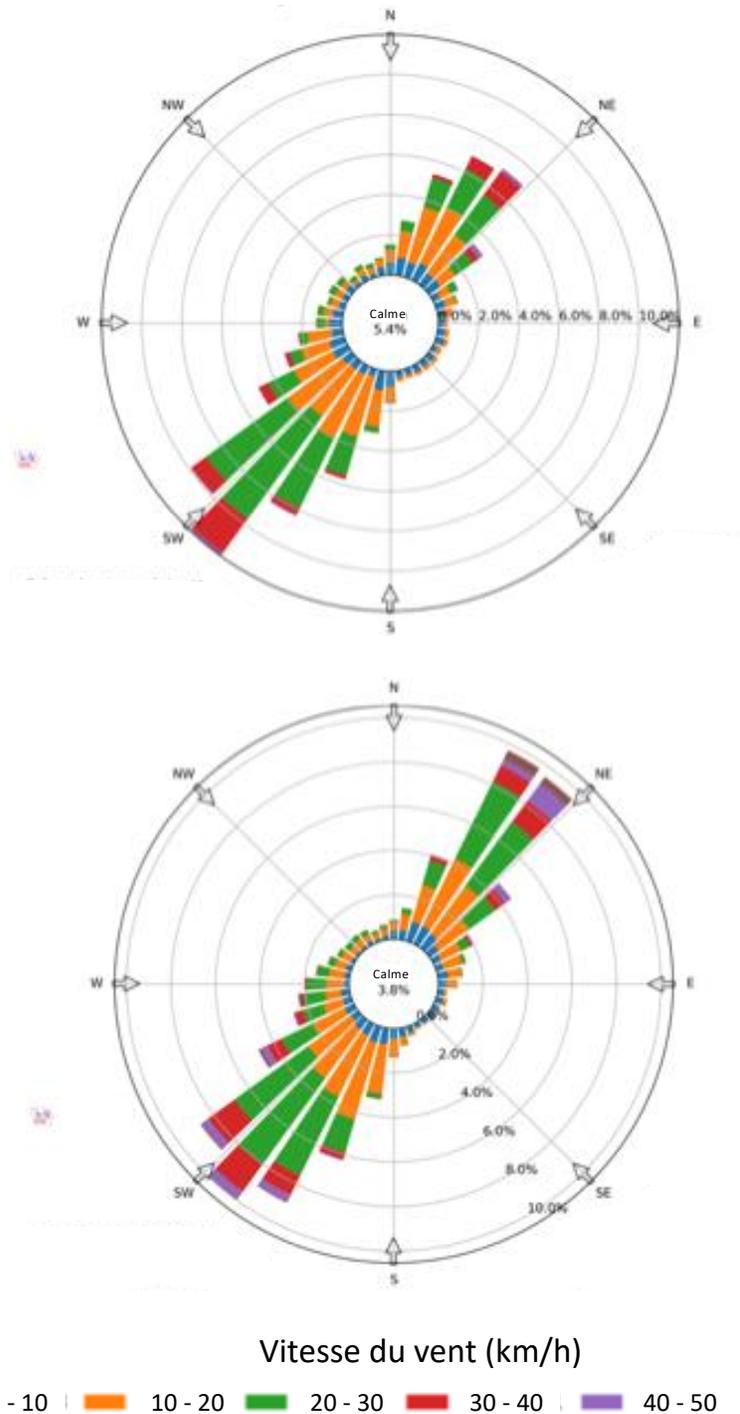


Figure 7. Roses des vents (vitesse et direction) incluant toutes les données horaires de la station de l'Île-aux-Grues pour la période d'échantillonnage du 25 mai au 19 septembre 2020 (en haut) et le mois d'octobre pour la période 2005 – 2020 (en bas). Les graphiques ont été produits à l'aide de l'outil Environmental Mesonet de l'Iowa State University (https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/dyn_windrose.phtml).

2.3.3 Position du front salin aux marées hautes de vive-eau en 2018, 2019 et 2020

Les données de conductivité spécifique récoltées le long du chenal Nord sont présentées à la Figure 8 pour les 12 sorties marée montante/haute. La distance séparant Château-Richer de la position du front salin, établie selon le critère de $500 \mu\text{S}/\text{cm}$, et la procédure décrite à la section 4, a varié de 9.3 à 31.3 km en surface et de 6.5 à 22.7 km pour le maximum de conductivité observé en profondeur. Cette différence est essentiellement due à la superposition du courant de sortie du fleuve, qui est maximal en surface, et au courant d'entrée des eaux salines, qui lui domine en profondeur. L'écart vertical de position entre la surface et le maximum s'avère important quand le front est situé plus à l'est, il se resserre pour devenir pratiquement nul quand le front en profondeur se situe entre 10 et 17 km de Château-Richer, puis augmente de nouveau ensuite (Figure 9).

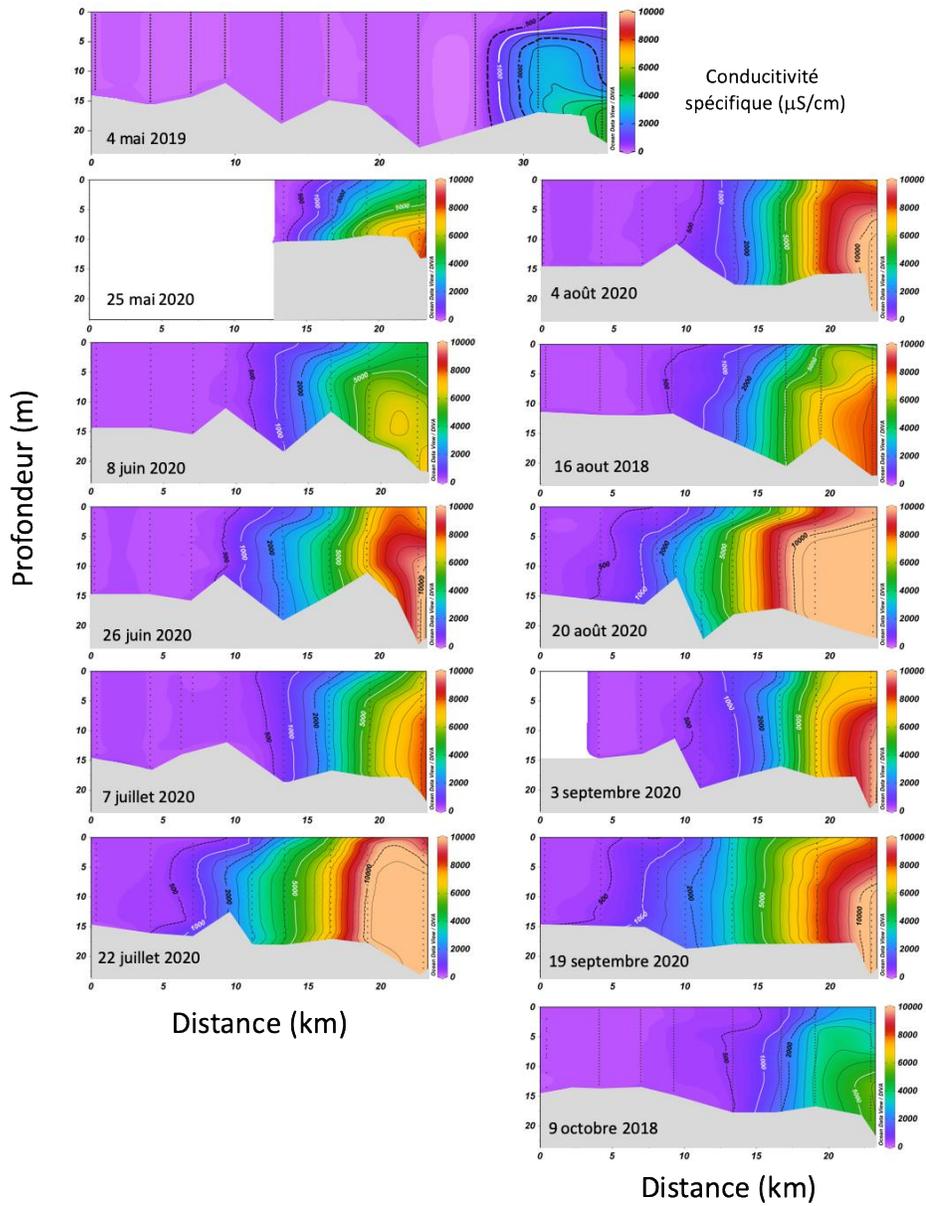


Figure 8. Conductivité spécifique en fonction de la profondeur le long du chenal Nord. La position la plus à l'ouest (distance de zéro) est en face de Château Richer.

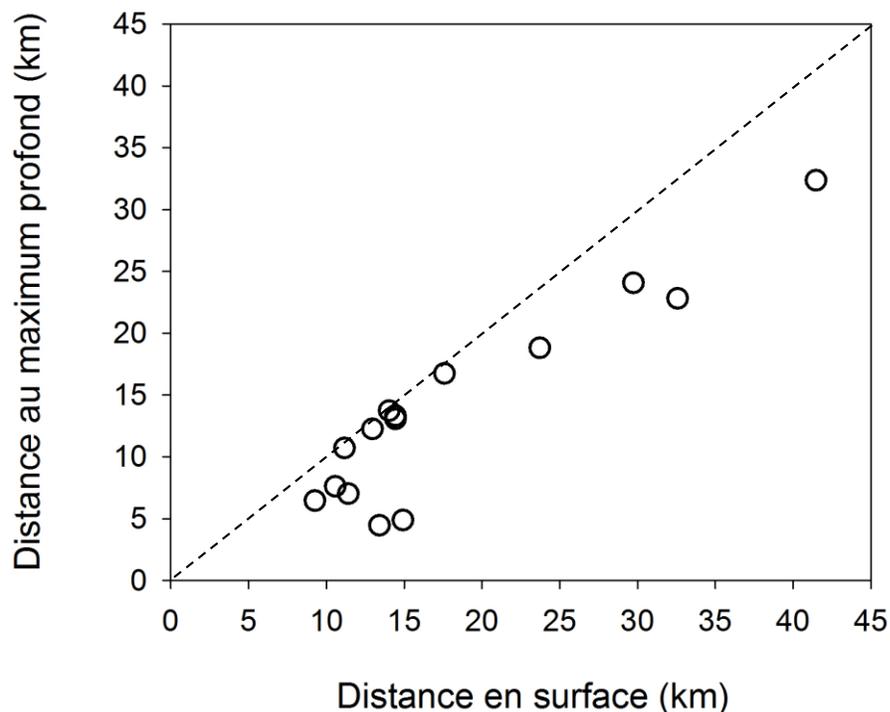


Figure 9. Relation entre la position du front en surface et à la profondeur du maximum de conductivité. Les deux positions sont identiques le long de la ligne pointillée.

2.3.4 Analyses statistiques des déterminants physiques de la position du front salin

La

Figure 10 présente une comparaison de différentes approches visant à expliquer la variabilité observée dans la position du front salin en surface. Ces analyses incluent les 15 positions déterminées à marées haute ou basse (les données utilisées sont présentées au Tableau 1 de l'annexe A). À lui seul, le débit fluvial explique environ 58% de la variabilité, tandis qu'un modèle tenant compte à la fois du débit et de la hauteur de marée performe nettement mieux en expliquant près de 96% de la variabilité. Ce modèle performe un peu moins bien qu'un second modèle qui inclut les composantes nord-est et sud-ouest du vent (98% de la variabilité), en particulier lorsque le front salin est très à l'ouest. Le meilleur et troisième modèle est semblable au second, mais ne considère que la composante Nord-est du vent (les vents du Sud-ouest y sont mis à zéro).

Les différentes statistiques du « meilleur » modèle multiple expliquant la position du front salin sont présentées au Tableau 1. À partir des coefficients bruts, il est possible d'établir l'équation suivante afin de faire une prédiction robuste de la position du front salin pour toute combinaison des trois variables explicatives à l'intérieur des gammes de valeurs observées lors de l'échantillonnage.

$$\text{Distance} = 30.010 + 0.0014 \text{ débit} - 13.76 \log \text{ marée} - 0.0044 \text{ vent}^2 \quad (\text{Équation 1})$$

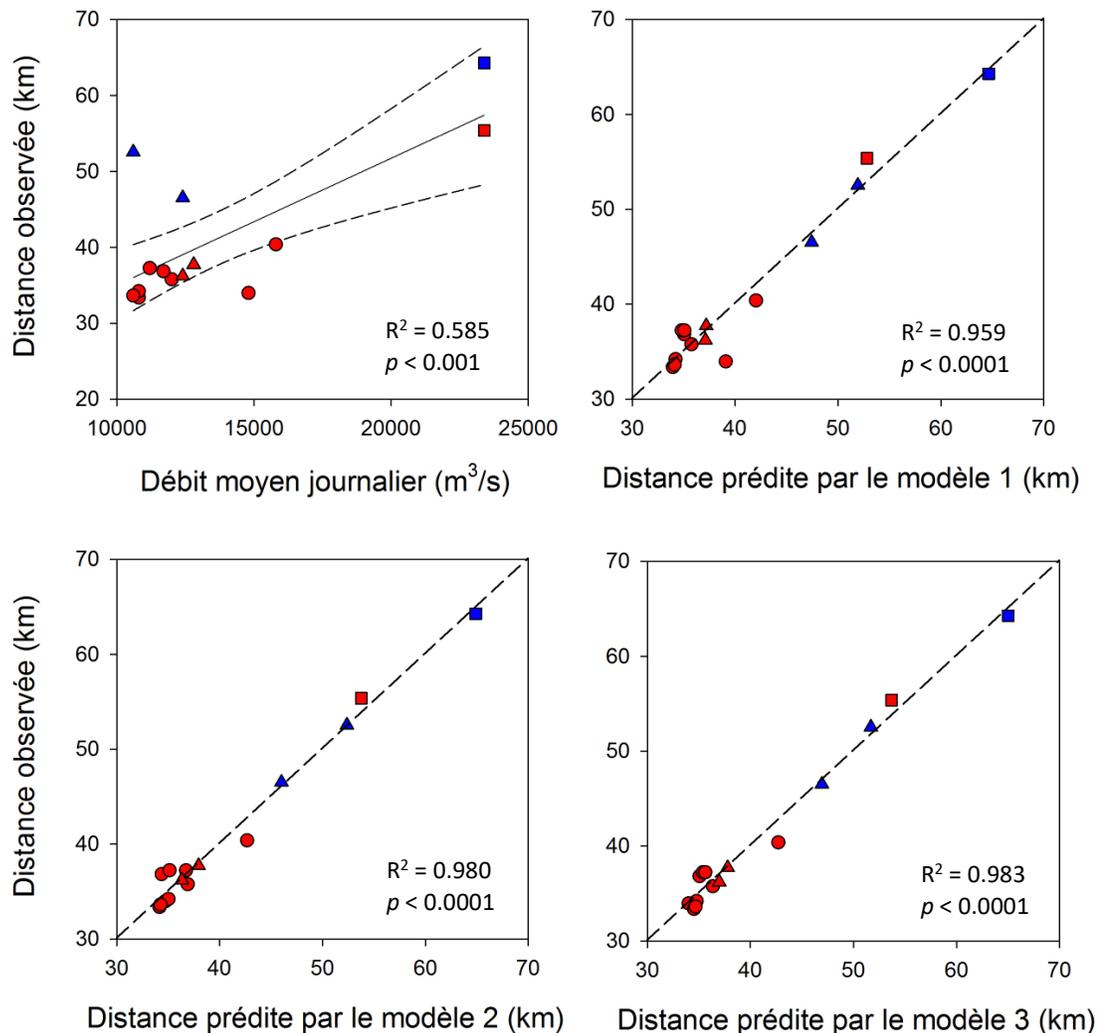


Figure 10. Relations entre la position du front salin en surface (distance de la prise d'eau Desjardins à Lévis), le débit fluvial à Québec (en haut à gauche) et trois modèles de régressions multiples tenant compte du débit et de 1) la hauteur de marée (en haut à droite), 2) la hauteur de la marée et du vent soufflant dans l'axe du fleuve (en bas à gauche), et 3) la hauteur de la marée et du vent soufflant du Nord-est uniquement (en bas à droite). Dans le cas des régressions multiples, le pouvoir prédictif du modèle s'évalue en comparant les valeurs prédites et observées. Plus les valeurs sont proches de la ligne pointillée, plus le modèle est robuste.

Tableau 1. Statistiques de la régression multiple qui inclut le débit fluvial, la hauteur de marée et la vitesse des vents provenant du Nord-est comme variables explicatives de la position du front salin.

Paramètre ou variable	Coefficient brut	Erreur standard	Seuil de probabilité	Coefficient standardisé
Ordonnée à l'origine (y0)	30.010	1.4549	< 0.0001	
Débit fluvial au jour -1	0.0014	0.0001	< 0.0001	0.333
Log (hauteur de marée)	-13.757	0.9394	< 0.0001	-0.323
Vent du Nord-est au carré	-0.0044	0.0011	< 0.005	-0.084

On voit ainsi que la distance qui sépare le front salin de la prise d'eau Desjardins en face de Lévis s'accroît lorsque le débit fluvial augmente et diminue lorsque la marée est plus haute et/ou que les vents provenant du Nord-est s'intensifient. Le poids quantitatif de chacune des trois variables peut être estimé à partir des coefficients standardisés. En considérant que le coefficient le plus faible (-0.084 pour le vent) a un poids de 1, le débit fluvial a une influence 3.98 fois supérieure, suivi de près par la marée avec un poids de 3.76. L'équation 1 peut être utilisée pour faire une analyse de sensibilité de l'impact de chacune des variables explicatives lors de l'été 2020. En fixant le débit et la hauteur de marée haute à leurs valeurs moyennes observées lors des sorties d'échantillonnage (12100 m³/s et 5.7 m, respectivement), il apparaît qu'en faisant varier uniquement la vitesse des vents du Nord-est de 0 à 37 km/h, la distance du front salin passe de 36.7 à 30.0 km, pour une avancée de 6.7 km. En fixant ensuite la composante Nord-est de la vitesse du vent à sa valeur moyenne (5 km/h), une augmentation de la hauteur de marée de 0.3 à 6.3 m fait passer le front salin de 54.3 à 35.8 km, pour une avancée de 18.5 km. Finalement, en fixant la hauteur de la marée haute à 5.7 m et la vitesse du vent à 5 km/h, une diminution de débit de 15800 à 10600 m³/s fait progresser le front salin de 41.5 à 34.4 km, pour une avancée de 7.2 km.

Pour fin de prédiction, une équation de régression ne peut être rigoureusement appliquée qu'à l'intérieur de la gamme de valeurs observées pour chacune des variables explicatives. Toutefois, et à titre indicatif, on peut évaluer l'impact potentiel de variations extrêmes en supposant que la forme générale du modèle prédictif est conservée à l'extérieur du domaine initial. Dans le cas présent, l'objectif d'une telle approche est de voir si certaines combinaisons historiques, présentes ou futures des 3 variables explicatives pourraient théoriquement amener le front salin à la prise d'eau Desjardins. Étant donné la nature de l'équation 1, cette approche cherche à explorer des combinaisons plausibles qui minimisent le débit fluvial et maximisent la hauteur de la marée et la vitesse des vents du Nord-est. Par exemple, si on combine la valeur minimum historique de débit journalier pour le Saint-Laurent à Québec (7007 m³/s le 28 mars 1965), la marée de vive-eau la plus haute (6,6 m) et des vents très forts du Nord-est (48 km/h), la distance entre la prise d'eau Desjardins et le front salin pourrait diminuer à 18.3 km (Figure 11). Il convient de noter qu'aucune coïncidence temporelle de ces trois conditions n'a été mise en évidence avec les données historiques. Il semble donc très peu probable pour l'instant que le front salin puisse avancer au-delà de la municipalité d'Ange Gardien, à moins que des perturbations soudaines ou des changements majeurs ne se produisent dans la dynamique de la circulation fluviale. Il n'est pas possible à partir des données

récoltées ici d'évaluer l'impact du rehaussement du niveau de la mer sur la position du front salin. Bien que ce rehaussement attendu (GIEC, 2019) se traduirait par des hauteurs de marées sensiblement plus importantes, il pourrait aussi entraîner des changements dynamiques qui ne peuvent être évalués en ajoutant, par exemple, quelques mètres à la marée dans le modèle de régression multiple. L'impact du niveau de la mer doit être évalué par modélisation et confirmé par un suivi multi-annuel et standardisé sur le terrain.



Figure 11. Position la plus à l'Ouest du front salin en surface (flèches bleues) selon les observations (été 2020) et telle que produite par la régression multiple pour une combinaison de valeurs historiques extrêmes de débit fluvial, de marée et de vent (période 1960 -2020).

2.3.5 Reconstruction de la position du front salin pour l'année 2019

En 2019, une sonde de conductivité a été déployée à Saint-Anne-de-Beaupré, et les données récoltées peuvent être comparées avec une reconstruction de la position du front salin effectuée avec la régression multiple. La reconstruction indique que la position journalière moyenne du front est contrôlée par le débit fluvial entre avril et août (Figure 12). Ensuite, la position oscille principalement en fonction des cycles de marée et du vent. La comparaison avec les données de Saint-Anne de Beaupré (en bas) montre que les

pics de conductivité se produisent lorsque la position probable du front en sous-surface (critère de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est clairement à l'ouest du site. La correspondance est particulièrement claire dans le cas du fort pic observé à la fin septembre.

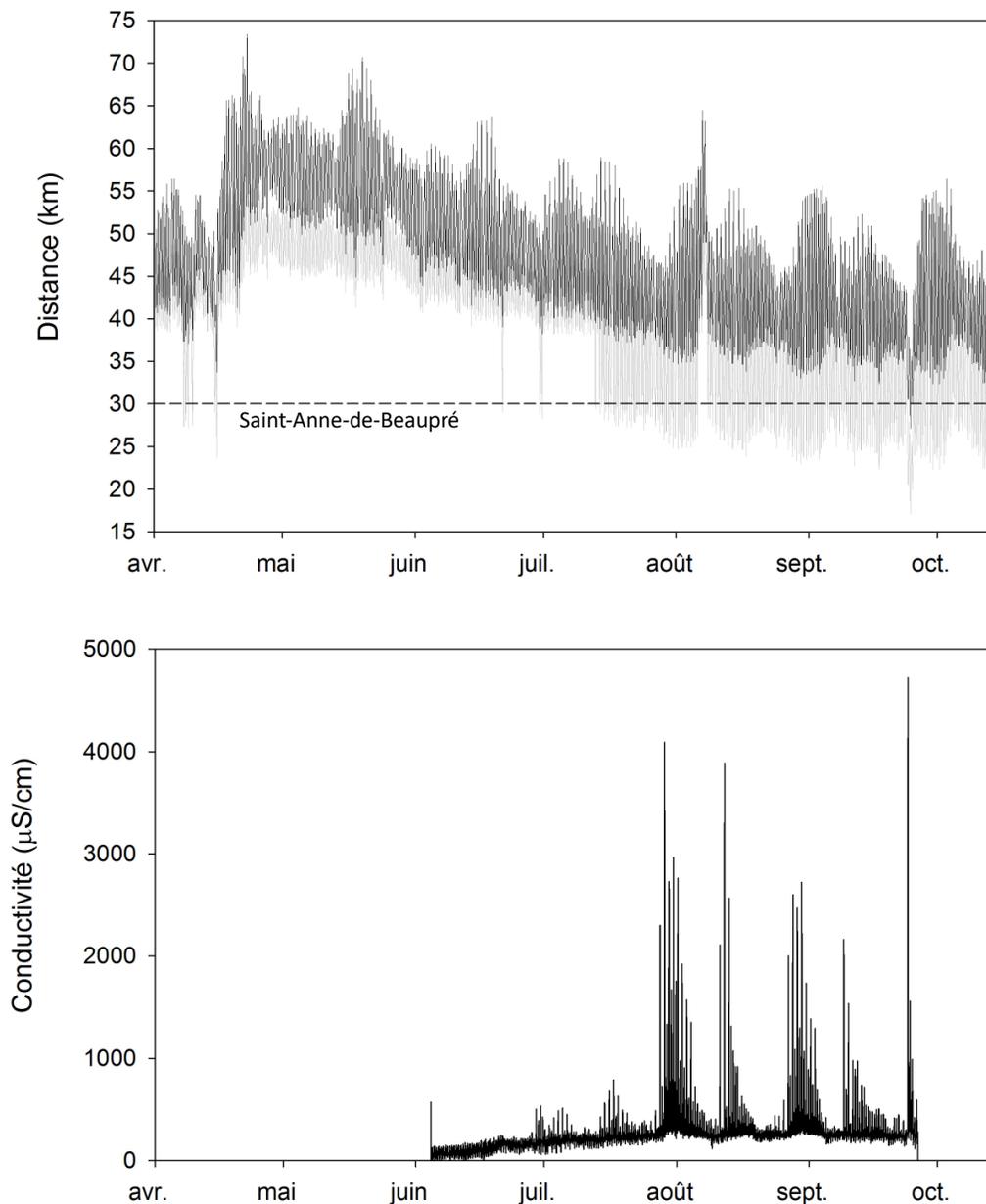


Figure 12. Reconstruction de la position du front salin (en haut) pour la surface (lignes noires) entre le 1er avril et le 15 octobre 2019 à chaque étal de marées basse et haute. Cette reconstruction est faite en utilisant la régression multiple et les données tirées des archives de hauteur de marée, de vents horaires et de débit journalier pour 2019. Le trait en gris donne l'intervalle possible de distance du front pour le maximum de conductivité en sous-surface (voir Figure 8). Le graphique du bas montre les données de conductivité enregistrées à Saint-Anne de Beaupré (en bas) durant une partie de la période.

2.4 CONCLUSION

Les données récoltées sur le terrain montrent bien que la position du front salin est influencée par le débit fluvial, la hauteur de marée et le vent soufflant dans l'axe du fleuve vers l'amont. L'importance de chaque facteur varie en fonction du moment de l'année. Le débit exerce une influence majeure entre la mi-avril et la fin juillet tandis que la marée, toujours importante, domine fortement en dehors de cette période. Le vent étant de nature épisodique, son action peut se manifester à tout moment même si la probabilité de forts vents du Nord-est est supérieure en automne. Les données récoltées à l'été 2020, en particulier, ont permis une analyse fine de l'influence des trois facteurs pendant la dernière moitié de la période de crue printanière et l'étiage d'été, moment où le faible débit fluvial maximise la probabilité de pénétration du front salin vers l'ouest. Grâce à ce jeu de données, une régression multiple tenant compte du débit, de la hauteur de marée et du vent, a permis d'expliquer 98% de la variabilité dans la position observée du front. Bien que cette dernière fût à l'est de Saint-Anne de Beaupré lors de toutes les sorties effectuées, l'application de la régression multiple à l'ensemble des conditions de débit, de marée et de vents enregistrées en 2019 (année pour laquelle les résultats peuvent être comparés à ceux d'une sonde de conductivité immergée au Quai de Saint-Anne) suggère que le front a épisodiquement pu s'avancer jusqu'à cette municipalité. Cette possibilité a été confirmée par les données de la sonde. La régression multiple n'est rigoureusement valable qu'à l'intérieur de la gamme des valeurs observées pour chacun des trois facteurs explicatifs, mais peut quand même être utilisée à titre indicatif pour voir si une coïncidence hypothétique de valeurs extrêmes (débit minimum, marée maximum et vent maximum tirés des données historiques 1960-2020) serait susceptible de fortement altérer la position du front. Cette analyse suggère que l'avancée du front vers l'ouest ne peut pas dépasser l'Ange Gardien en l'état actuel du niveau de la mer, soit une distance d'environ 18km de l'UPE la plus à l'est (UPE Desjardins). Enfin, les données recueillies ne peuvent pas être utilisées pour prévoir l'impact d'un rehaussement du niveau de la mer, mais pourront servir de référence pour calibrer un modèle numérique et/ou pour détecter des changements éventuels dans le cadre d'un programme de suivi à long-terme sur le terrain.

3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

3.1 MANDAT ET ÉQUIPE DE RÉALISATION

Ouranos a obtenu le mandat de réaliser une analyse de sensibilité pour répondre aux objectifs du deuxième volet de ce présent projet. Le modèle numérique simplifié MIT General Circulation Model (MITgcm) (Marshall et al., 1997) a été choisi pour simuler la dynamique estuarienne selon les paramètres hydroclimatiques actuels et projetés afin d'évaluer le risque de contamination des prises d'eau potable des villes de Québec et de Lévis par le déplacement potentiel du front salin.

L'équipe de réalisation de l'analyse de sensibilité a été composée des membres suivants :

Pascal Bourgault, Ouranos Rédaction et analyse

Louis Philippe Nadeau, ISMER Expert-conseil

Notons aussi la collaboration de David Huard (Ouranos), de Richard Turcotte (MELCC) et de Pascal Matte (Environnement Canada) pour le partage de données et leur avis scientifique.

Cette section se divise en deux parties. Une description de la méthodologie est présentée, suivie par une analyse des résultats.

3.2 MÉTHODOLOGIE

3.2.1 Justification du choix du modèle

Le choix du modèle approprié a été limité par des contraintes physiques et géographiques. Il est clair, selon la littérature existante, que le mélange à petite échelle est primordial dans la simulation d'une zone de transition saline (Geyer & MacCready, 2014). Ainsi, le modèle doit résoudre ce phénomène en possédant plusieurs niveaux minces dans la direction verticale et de petites cellules horizontales. Selon les observations, il est aussi clair que la structure verticale du front salin varie temporellement. De plus, toute la région de transition saline, actuelle et future, doit être couverte, en incluant toutes les phases de marées. En se basant sur les estimés qui étaient disponibles au début du projet, cela signifie un domaine allant de La Malbaie en aval jusqu'aux prises d'eau de Québec et Lévis en amont, soit une longueur d'environ 140 km.

Au moment de commencer cette partie du projet, deux modèles hydrodynamiques de la région existaient, mais aucun n'était en mesure de répondre à la question. Le modèle développé par Environnement Canada (Matte et al., 2017) a d'abord été écarté, car sa grille est bidimensionnelle dans l'horizontale, ne permettant ni de résoudre le mélange vertical, ni de représenter la structure verticale du front. Deux autres modèles océanographiques tridimensionnels de la région sont aussi en usage ou en développement du côté de Pêches et Océans Canada. L'un se concentre sur le Golfe du Saint-Laurent, mais utilise une grille trop grossière (≈ 500 m) pour résoudre les phénomènes voulus (Saucier et al., 2003; Saucier & Chassé, 2000). Le second, à plus haute résolution, semblait plus prometteur, mais l'avancement et l'échéancier du développement ne correspondaient pas aux besoins du présent projet.

Ainsi est apparue la nécessité de développer un modèle spécifique pour cette analyse de sensibilité. Bien que le développement d'un modèle complet comporte des défis, trois choix ont d'abord été explorés :

- Des solutions implicites d'équations différentielles d'un modèle de type "shallow water"

Ce modèle "théorique" ne nécessite pas de grandes ressources computationnelles, mais dépend énormément des données d'observations qui le calibrent. La partie 2 de ce rapport présente un modèle similaire. Une version plus analytique (et plus complexe) pourrait être basée sur le travail de (Xu et al., 2019).

- Un modèle numérique dynamique tridimensionnel

La solution classique plus sûre, mais aussi la plus longue et lourde à développer et rouler. C'est d'ailleurs le travail déjà en cours à Environnement Canada et à Pêches et Océans Canada. Même en se basant sur un modèle généraliste déjà existant (tel que le MITgcm ou Delft3D), et même si nous ne nous intéressons réellement qu'à une seule variable (la position du front salin), le développement d'un tel modèle aurait nécessité plus de ressources et de temps qu'en avait ce projet.

- Un modèle numérique dynamique bidimensionnel (dimensions longitudinale et verticale)

Comme compromis entre une extrapolation des observations et une simulation “complète” de l’estuaire, il a été décidé, pour les fins du projet, de tenter certaines simplifications au problème qui pourraient permettre de réduire l’effort et la lourdeur du modèle. Les hypothèses expliquées à la section 3.2.2 permettent de retirer la dimension transversale (à travers le fleuve), obtenant ainsi un modèle 2D beaucoup plus facile à tester et à développer. Ce pari est tout de même risqué, car, comme dit précédemment, le mélange est primordial dans le problème et cette modélisation retire le mélange purement horizontal, ainsi que la turbulence tridimensionnelle. Ce fut néanmoins la voie choisie pour le projet ; celle offrant le plus grand potentiel selon les ressources disponibles.

Peu importe le type de modèle choisi, le plan était le suivant :

- calibrer le modèle à l’aide des observations disponibles, puis faire varier les paramètres selon les valeurs prévues dans les différentes projections climatiques ;
- par la suite, si certaines de ces valeurs montrent une situation où le front salin atteint les prises d’eau des villes, estimer la probabilité et les conditions nécessaires pour que ces projections se réalisent dans les 50 prochaines années.

3.2.2 Hypothèses de simplification

L’hypothèse a été faite que la position longitudinale du front salin, ainsi que son profil vertical, sont principalement le résultat d’un équilibre entre le débit du fleuve et le courant de marée. Ainsi, nous pensons que les instabilités du type Kelvin-Helmholtz sont les principales sources de mélange vertical et longitudinal, donnant ainsi une bonne estimation, au premier ordre, de la situation dans l’estuaire. Cette hypothèse se base en partie sur les travaux précédents de Bourgault et al. (2001) dans l’estuaire du Saint-Laurent et de Tedford et al. (2009) dans celui du fleuve Fraser.

L’élimination de la dimension transversale pose plusieurs embûches et exclut de la simulation plusieurs phénomènes (turbulence 3D, tourbillons horizontaux) qui sont très certainement importants dans la dynamique du front salin. Cependant, le pari a été fait qu’un modèle simplifié permettrait tout de même de résoudre le déplacement du front avec une incertitude acceptable pour estimer la vulnérabilité des prises d’eau de Québec et de Lévis pour les 50 prochaines années.

3.2.3 Caractéristiques du modèle

3.2.3.1 Moteur dynamique et grille

Le modèle est une configuration non-hydrostatique du logiciel MITgcm, un modèle océanique dynamique versatile, puissant et utilisé par une large communauté scientifique (Marshall et al., 1997). Nous appellerons “X” la dimension longitudinale, qui suit le chenal principal du fleuve, et “Z” la dimension verticale. La Figure 13 résume la configuration du modèle décrite ici. Dans le but de résoudre au mieux les instabilités de Kelvin-Helmholtz, une résolution assez fine de 15 m est utilisée pour la partie centrale du domaine, là où le front salin doit se retrouver. Aux extrémités du modèle, une résolution plus grossière est utilisée pour réduire le nombre de points simulés, tout en gardant une bonne distance entre le front

et les frontières du modèle. La résolution est de 30 m en amont et de 45 m en aval, et la transition entre les zones se fait de manière continue pour éviter les instabilités numériques. Le pas de temps est de 1 s et la plupart des diagnostics sont sauvegardés 10 fois par cycle de marées de 12.4 h (voir plus bas).

La grille est ainsi constituée de 70 couches de 1 m en Z et 10 400 points en X. Le plan 2D du modèle s'étend sur 180 km de Neuville à La Malbaie, en suivant le chenal principal du fleuve, passant par le sud de l'Île d'Orléans. C'est le long de cette ligne que la bathymétrie est extraite du produit NONNA-100 du Service Hydrographique Canadien (SHC). Les données brutes, d'une résolution de 100 m, sont lissées avec une moyenne mobile de 500 m pour éliminer les petites irrégularités qui auraient introduit du bruit numérique dans les simulations. Cette bathymétrie a comme référence verticale le « zéro des cartes », qui varie le long du domaine. À l'aide des repères de stations du SHC, la bathymétrie est convertie pour avoir le référentiel vertical CGVD28, et la pente dans le modèle reflète ainsi mieux la pente réelle. Il est à noter que cette transformation n'a pas un grand impact sur le produit final, la variation du « zéro des cartes » étant d'environ 6 m sur tout le domaine. Bien qu'il n'y ait qu'une seule couche transversale, l'épaisseur de celle-ci varie tout de même le long de X, dans le but que l'aire de coupe transversale du domaine imite celle du fleuve (voir figure). Le calcul est fait en incluant les deux chenaux autour de l'Île d'Orléans, dans une optique de conservation du volume total.

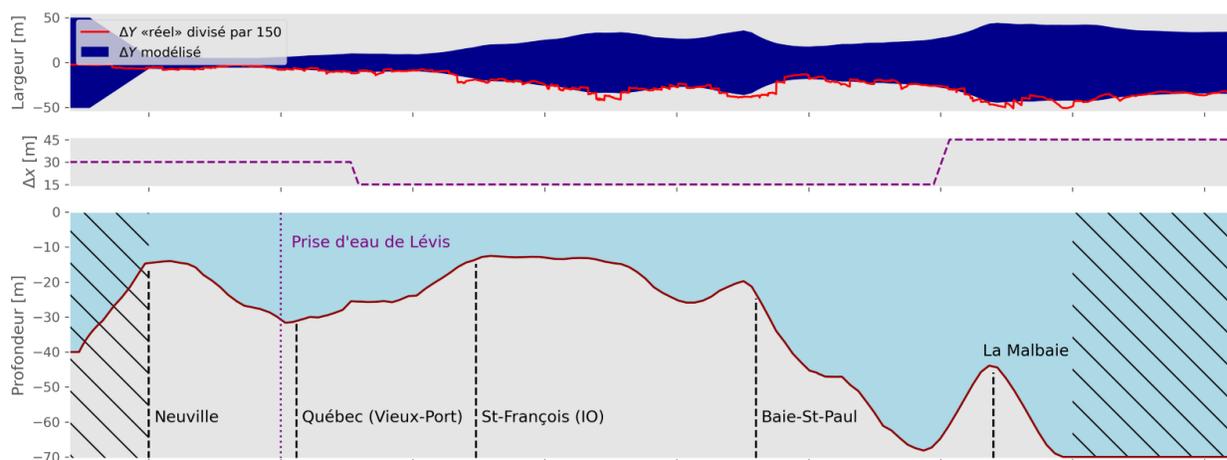


Figure 13. Domaine du modèle

Dessus : Largeur du domaine (ΔY) simulé, comparée à une largeur dérivée de la bathymétrie réelle. Les différences proviennent surtout du lissage des données qui réduit potentiellement le bruit numérique.

$\Delta Y = A / (Z * 150)$, où A est l'aire de coupe réelle fleuve [m^2] et Z est la profondeur du modèle [m].

Le modèle est en fait 150x plus mince que la "réalité", simplement pour une meilleure stabilité numérique. Tous les résultats de ce rapport qui font intervenir l'aire transversale ont été multipliés par ce facteur.

Milieu : Résolution spatiale de la grille (ΔX). Les simulations où le front salin sort de la zone centrale à haute résolution ont été rejetées, car les zones frontières ne permettent pas de simuler le mélange correctement.

Dessous : Bathymétrie du modèle et points de repères géographiques. Les zones hachurées sont les extensions permettant de réduire les effets de bords, où la bathymétrie est artificielle. L'extension de l'amont est ouverte et approfondie pour simuler l'effet de réservoir du reste de l'estuaire fluvial non simulé.

3.2.3.2 Paramétrisations

Des zones tampons sont ajoutées en amont et en aval pour réduire les effets dus aux limites du domaine. La zone tampon de l'aval est une simple extension de 40 km au fond plat, mais celle de l'amont est plus complexe. Pour amortir les ondes de marées et tenter de répliquer l'effet de réservoir que le reste de l'estuaire fluvial non-simulé peut avoir sur la dynamique dans la région de Québec, un bassin artificiellement large et profond est ajouté. Les conditions de radiation d'Orlanski (Orlanski, 1976) sont tout de même utilisées à la frontière amont pour limiter au maximum la réflexion des ondes de marées à cet endroit.

La surface libre est simulée implicitement avec une équation linéarisée. Un coefficient de friction quadratique est utilisé au fond. La viscosité de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963) est activée dans l'horizontale, alors qu'une viscosité harmonique est utilisée pour les mouvements verticaux. Outre ces modifications aux équations de base, aucune diffusion implicite ni aucune autre forme de paramétrisation n'est activée dans le modèle. Ce choix a été fait pour réduire le nombre de paramètres à calibrer (et donc le temps et les ressources requis pour le faire). La résolution du domaine est choisie justement parce qu'elle permet de résoudre correctement les instabilités de type Kelvin-Helmholtz.

3.2.3.3 Forçage

Durant les simulations, une vitesse longitudinale (u) est imposée à la limite aval seulement. La Figure 14 montre la forme du profil. Le forçage simplifie les marées à leur composante principale (M2), faisant varier le profil sinusoïdalement sur une période de 12.4 h. Le débit moyen du fleuve est imposé à même ce forçage en lui additionnant un second profil, de forme similaire, mais moins profond. Dans la suite du rapport, ces forçages seront discutés en termes de débit (en m^3/s). Le débit moyen (D) est calculé à partir de la moyenne de u sur un cycle de marée complet et l'amplitude du débit de marée (M) est calculée à partir des vitesses maximale et minimale sur la même période, voir Figure 15. À l'amont, ce sont les conditions de radiation d'Orlanski qui s'occupent du courant (u), comme mentionné précédemment. Ce forçage, comme toute la configuration d'ailleurs, est fortement inspiré de (Stenström, 2004), qui utilise le même modèle (MITgcm) pour un problème similaire, mais avec une configuration tridimensionnelle.

Le vent de surface, bien qu'ayant certainement un rôle dans la dynamique, a été négligé dans cette modélisation. Les résultats de la partie précédente du rapport semblent d'ailleurs confirmer l'apport mineur de la trainée de surface.

Des profils-types de salinité, dérivés des observations, servent au forçage de la température (T) et de la salinité (S) à l'aval. Il était prévu de faire les simulations avec des profils représentatifs des conditions estivales et hivernales, mais ceci n'a pas été réalisé étant donné les résultats décevants décrits plus bas. À la frontière amont, des valeurs constantes $10^\circ C$ et 0 PSU sont forcées uniformément sur toute la colonne.

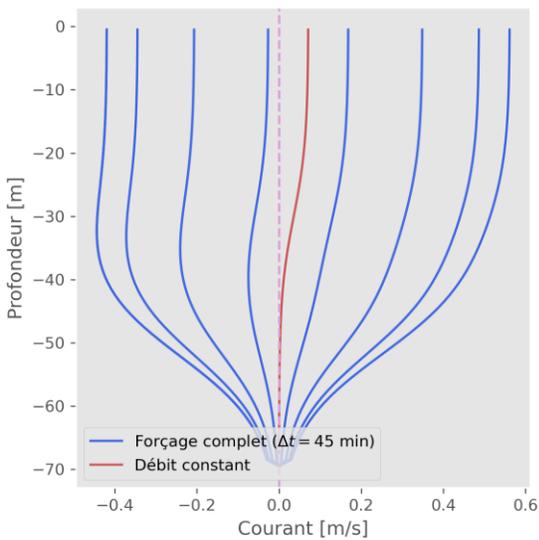


Figure 14. Profils de forçage

Les profils de forçage du courant à l’aval du modèle. La ligne rouge représente le débit constant imposé (ici, l’équivalent de $D = 22\,000\text{ m}^3/\text{s}$) et donc, la moyenne du forçage sur un cycle de marée. Les lignes bleues sont des instantanés du forçage incluant la marée (ici, $\pm 0.5\text{ m/s}$, $M \cong 46\,000\text{ m}^3/\text{s}$ à Québec).

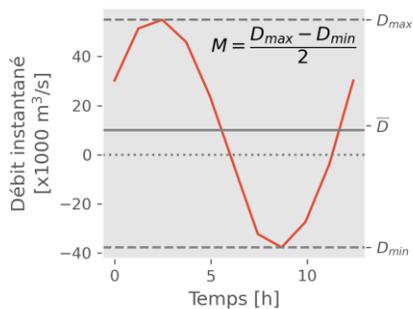


Figure 15. Exemple pour calcul de D et M

Le graphique montre le débit instantané calculé à Québec pour un cycle de marée et schématise le calcul des paramètres D et M qui seront utilisés dans le reste du rapport.

3.2.4 Données d’entrée

Les profils de forçage de température et de salinité à l’aval sont dérivés des observations faites dans la région de Baie-Saint-Paul par ce projet-ci (Section 2), ainsi que d’autres profils provenant d’expéditions passées dans la région entre La Malbaie et Saint-Siméon, obtenus par l’entremise du catalogue de l’Observatoire Global du Saint-Laurent (OGSL).

Les premières simulations ont aussi été initialisées avec une interpolation X-Z de salinité dérivée des multiples profils recueillis lors de la phase 2 du projet tout le long du domaine d’étude. Cette initialisation permet d’accélérer la convergence vers la situation à l’équilibre que l’on espère similaire aux observations.

Malheureusement, très peu de données de courants sont disponibles pour calibrer ou forcer le modèle. Le profil forcé décrit ci-haut (Figure 14) est une estimation à partir de modèles théoriques de la littérature (Geyer & MacCready, 2014), mais sa force, en m/s, n'est pas basée sur des mesures réelles de courants. C'est plutôt le débit (D , l'intégrale verticale et "transversale" de u , en m^3/s) qui est imposé.

Dans les premières itérations du modèle, un problème de conservation du volume (les débits simulés étaient différents entre l'amont et l'aval) a monopolisé une bonne partie du temps de développement prévue pour cette étape-ci du projet. Les conditions de radiation d'Orlanski, mal optimisées pour la configuration utilisée, étaient au centre du problème. L'introduction du bassin artificiel à l'aval du domaine est venue rétablir la situation.

La marée, quant à elle, est restée le point faible du modèle puisqu'elle était basée sur un profil très simplifié, avec une force choisie grâce aux opinions d'experts plutôt qu'à partir d'observations réelles. Vers la fin du projet, cependant, nous avons pu comparer l'amplitude du débit de marée que le modèle simulait autour de Québec avec les données horaires dérivées du modèle Qmec de (Bourgault & Matte, 2020a, 2020b). La divergence entre les deux nous a demandé de recommencer une bonne partie des simulations, dans un espace de paramètres non-exploré jusqu'à ce moment-là, et donc pour lequel le modèle n'avait pas encore été calibré. Les conséquences en sont discutées dans la prochaine section.

3.2.5 Projection de l'impact des changements climatiques pour les 25 et 50 prochaines années

Les projections hydroclimatiques, pour les fins de l'analyse de sensibilité, se font sur 3 plans : le débit du fleuve Saint-Laurent, la salinité à l'aval et le niveau de la mer.

3.2.5.1 Débit

Le débit du fleuve pourrait diminuer si le volume de décharge des Grands Lacs diminue dans un futur proche. Même si la littérature ne montre pas une diminution claire dans la moyenne de la décharge, une intensification de la saisonnalité, avec une diminution des minimums annuels, semble toutefois probable (Music et al., 2015). De plus, le débit du fleuve étant en partie contrôlé par des barrages, et donc dépendant de décisions humaines, il est difficile de se fier aux modèles climatiques seuls pour établir une projection. Dans ce contexte, le but de l'analyse est plutôt de trouver quelles valeurs de débits sont suffisamment petites pour que le front salin atteigne les prises d'eau municipales.

3.2.5.2 Salinité à l'aval

Le profil de la salinité à l'aval change déjà selon la saison, mais si le golfe devenait de plus en plus salin, avec les changements climatiques, la question de l'effet sur la zone de transition saline pourrait se poser. Des simulations avec des profils de salinité augmentés sont prévues. Toutefois, l'analyse des modèles climatiques globaux actuels semblent plutôt montrer le contraire, pour le moment. En effet, le rapport de (Lavoie et al., 2020) indique plutôt que, selon trois modèles de l'expérience CMIP5 tous forcés selon le scénario de forçage radiatif RCP8.5, la salinité dans l'estuaire marin change peu et même diminue pour

l'horizon 2061-2080, comparé à 1991-2010. Une salinité plus basse à l'aval a peu de chance d'entraîner une progression du front salin vers l'amont, bien au contraire.

3.2.5.3 Rehaussement marin

La hausse du niveau de la mer est plus difficile à intégrer à la configuration du MITgcm développée pour le projet. Un moyen simple est de descendre la bathymétrie en entier. Des simulations avec +0.5 et +1 m sont prévues dans l'analyse. Ces chiffres sont des scénarios extrêmes pour l'horizon 2100, selon les études de (James et al., 2021).

3.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Malheureusement, la modélisation n'a pas fourni les résultats escomptés. À l'intérieur du court laps de temps alloué pour le développement du modèle, il n'a pas été possible d'obtenir de configuration permettant de reproduire assez correctement la dynamique actuelle du fleuve. Les prochaines sections discuteront des défis et de ce qui peut être retiré des résultats obtenus.

3.3.1 Résolution des instabilités de Kelvin-Helmholtz

Selon l'hypothèse de départ, les instabilités se formant verticalement entre les masses d'eau de densité et de vitesse différentes seraient à la source de suffisamment de mélange pour recréer une image approximative du front salin. Comme le profil de forçage et la bathymétrie imposent un cisaillement dans la vitesse horizontale le long de la colonne d'eau, les instabilités de Kelvin-Helmholtz sont celles qui devraient être primordiales à ce mélange. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre trois plans de simulations de calibration, où des instabilités ont été forcées, pour trois résolutions différentes dans la dimension longitudinale (X). La résolution verticale est la même (1m) pour les trois cas. On voit bien comment la résolution des tourbillons propres à ces instabilités se dégrade à mesure que ΔX augmente. À partir d'une analyse spectrale sur la vitesse 2D (u et w) (qui n'est pas montrée ici), il fut conclu que $\Delta X = 15$ m était la valeur optimale, soit le meilleur compromis entre l'utilisation des ressources numériques et la résolution du mélange.

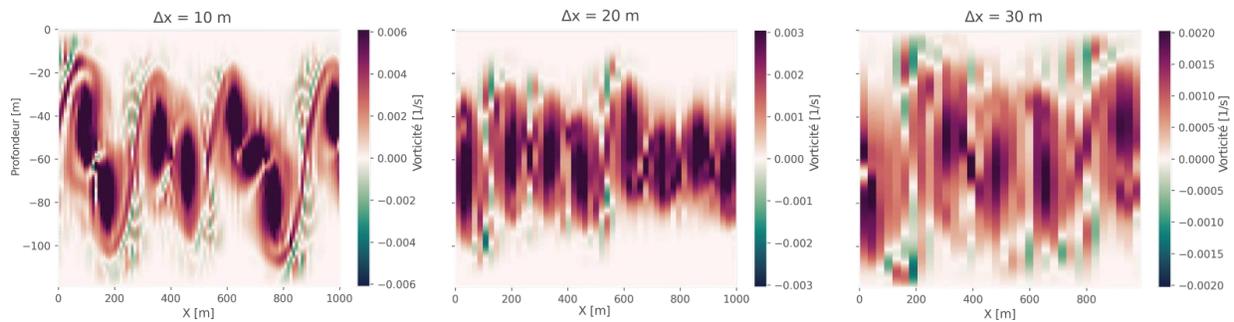


Figure 16. Vorticité dans le plan X-Z du modèle ($\omega = du/dz - dw/dx$) pour trois cas d’une simulation idéalisée servant à calibrer la résolution. La colonne d’eau est initialisée avec deux couches de vitesses contraire. La résolution en X varie selon le cas, mais la résolution en Z est constante (1 m).

3.3.2 Calibration et comparaison avec les observations

D’entrée de jeu, les simplifications imposées à la modélisation et le manque de données d’observation rendent la calibration du modèle plus compliquée. Pour l’analyse finale présentée ici, nous nous attarderons à un diagnostic majeur, soit la stratification (N^2), et à un autre, mineur, qui est le signal de débit.

3.3.2.1 Stratification

La manière la plus courante d’évaluer la stratification en océanographie est par le calcul de la fréquence de Brunt-Väisälä, qui détermine la fréquence des ondes de gravité se propageant à l’horizontale entre deux masses d’eau de densités différentes. Le calcul s’écrit :

$$N^2 = -(g/\rho) (\partial\sigma/\partial z) [s^{-2}]$$

Où g est la constante d’accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$), ρ est la densité moyenne de l’eau (ici 1000 kg/m^3) et σ est sa densité in situ [kg/m^3]. Ainsi, N^2 est grand là où il y a de grands écarts de densité entre deux masses d’eau superposées. En général, le mélange vertical vient réduire ces écarts et diminuer N^2 . La valeur maximale de N^2 dans la colonne d’eau (le long de Z) a été prise comme premier diagnostic de comparaison entre le modèle et les observations. Dans l’un comme dans l’autre, toute la zone en amont du front salin montre évidemment des valeurs minimales de N^2 : la colonne d’eau y est presque homogène et les variations de densité verticales sont négligeables étant donné les valeurs extrêmement faibles de salinité. Cependant, la zone en aval du front est plus complexe. Dans la région entre Baie-Saint-Paul et la limite aval du domaine, les observations recueillies par ce projet montrent des valeurs maximales de N^2 oscillant entre $0,002$ et $0,010 \text{ s}^{-2}$. Cependant, les profils sont pris dans une petite région tout juste à l’aval de la zone de transition saline ; ce n’était pas le but de la campagne d’échantillonnage de couvrir un plus grand domaine. On obtient une plage de valeurs similaire, allant de 0.002 à 0.020 s^{-2} , si l’on combine ces données avec les multiples profils disponibles dans la base de données de l’ISMER. La Figure 17 montre l’étendue de cette variabilité. Il est à noter que le présent rapport ne prétend pas faire une climatologie de la stratification dans l’estuaire. Plutôt, cette analyse sert à donner une idée très générale de ce que serait une stratification « normale » dans l’estuaire. Tous les profils utilisés sont pris

dans le chenal principal du fleuve. La plupart des points de l'ISMER proviennent de campagnes menées en fin d'été/début d'automne et au milieu de l'hiver. Ainsi, les résultats sont biaisés en faveur des périodes de faibles débits. Ce sont toutefois ces mêmes périodes, lorsque le front salin est le plus en amont, que nous tentons ici de simuler.

Toutefois, dans les simulations, cette plage de valeurs de stratification n'est atteinte que lorsque M dépasse $140\,000\text{ m}^3/\text{s}$, soit plus de trois fois la moyenne observée. En d'autres termes, le modèle nécessite des marées extrêmes pour que la colonne d'eau soit autant mélangée que dans l'estuaire réel. En contrepartie, lorsque des valeurs réalistes de forçage sont utilisées en entrée du modèle, la stratification augmente considérablement et la colonne d'eau se divise presque en deux masses distinctes, comme le montre la Figure 17. La comparaison entre les champs de salinité des deux cas, l'un extrême et l'autre plus réaliste, montre néanmoins que le modèle est capable de simuler une structure de transition saline similaire, du moins au premier ordre, à ce que l'on retrouve dans l'estuaire. La nécessité de fournir une énergie de forçage énorme et irréaliste rend en revanche cette similarité inutile pour la question qui nous préoccupe.

Toute cette analyse confirme les craintes soulevées au départ, mais qui, en l'absence de modèle adéquat déjà implanté dans l'estuaire, découlaient de simplifications nécessaires afin de pouvoir réaliser l'analyse dans des temps raisonnables pour l'échéancier du projet : le retrait de la dimension transversale est une sur-simplification du problème. Sans cette dimension, la turbulence 3D et les tourbillons horizontaux ne peuvent pas être simulés et le mélange en est drastiquement réduit. Cela infirme donc l'hypothèse initiale ; les instabilités de Kelvin-Helmholtz seules ne semblent pas une source assez importante de mélange pour le développement d'un front.

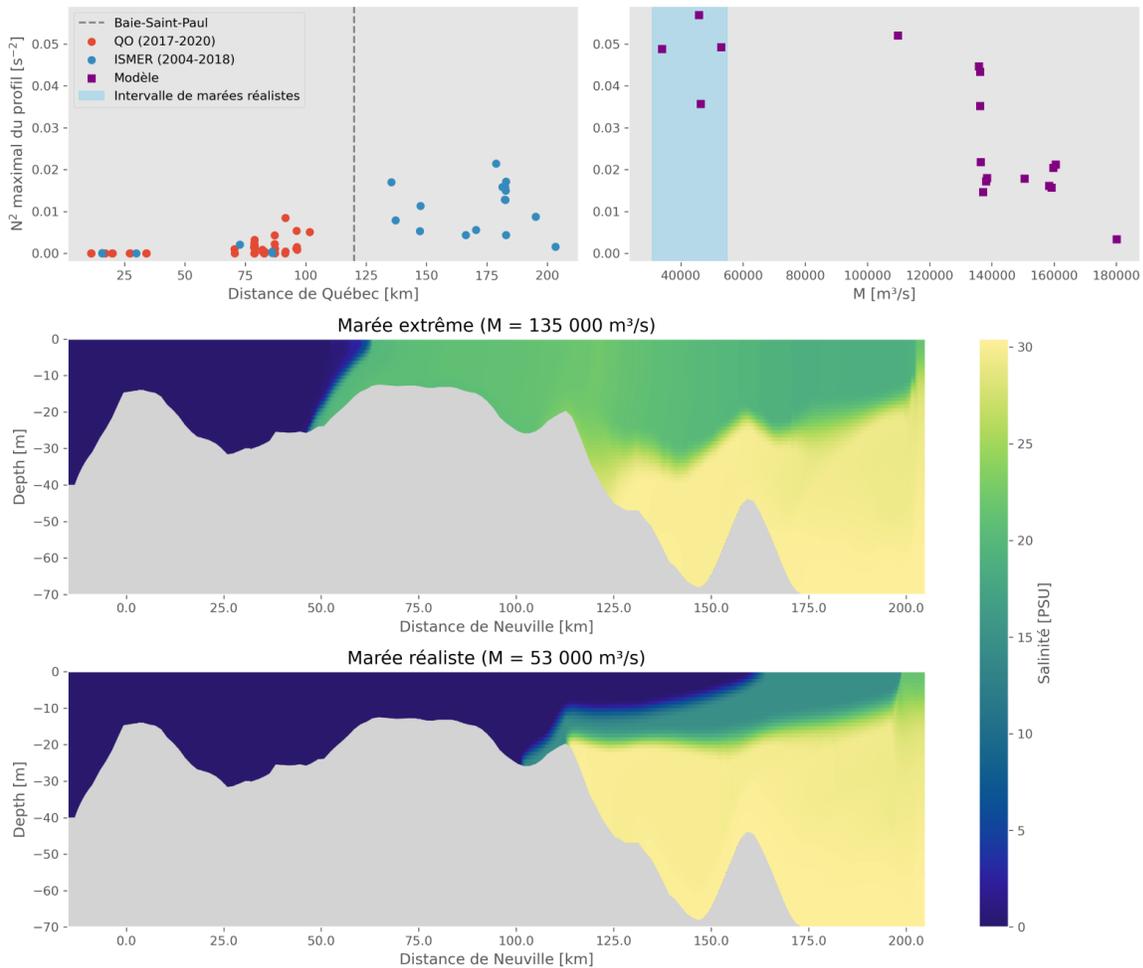


Figure 17. Stratification

En haut à gauche : Maximum de stratification dans les observations

Tous les points proviennent de profils dans le chenal principal.

En haut à droite : Maximum de stratification dans le modèle, selon M

La zone colorée est l'intervalle de marée couvert par les observations de l'autre panneau. Les profils sont pris à la hauteur de Baie-Saint-Paul.

Au milieu : Salinité dans le modèle à marée haute pour une simulation à forçage "extrême"

En bas : Salinité dans le modèle à marée haute pour une simulation à forçage "réaliste"

3.3.2.2 Signal de débit

Le long estuaire fluvial en amont de Québec crée un effet de réservoir qui influence de manière significative la forme du signal de la marée. On peut le voir dans les séries de niveau (η), mais tout particulièrement dans les séries du débit horaire (Figure 18). À la hauteur de Québec, par exemple, l'oscillation du débit horaire est telle que le jusant dure plus longtemps que le flot, en plus d'être légèrement asymétrique : la fin du jusant étant plus graduelle que son début. La Figure 18 compare des courbes de débit instantané entre notre modèle et le produit dérivé d'observations de (Bourgault & Matte, 2020b). Les courbes ont été normalisées par leur valeur maximale et alignées sur le milieu du jusant. La courbe de forçage à l'aval, un sinus parfait, est montrée comme point de comparaison. Un

observateur optimiste pourrait se dire que le signal simulé semble tendre vers une forme correcte, mais il est plus sûr de dire qu'il manque encore substantiellement de peaufinage pour y arriver. Pour avoir une idée de premier ordre de la dynamique du front salin, il n'est toutefois probablement pas nécessaire de répliquer la courbe parfaitement. De plus, cette forme asymétrique dans le signal de marée est encore visible dans les niveaux horaires à l'aval (Baie-Saint-Paul). Ceci suggère qu'en modifiant le forçage selon cette asymétrie, on pourrait obtenir de meilleurs résultats.

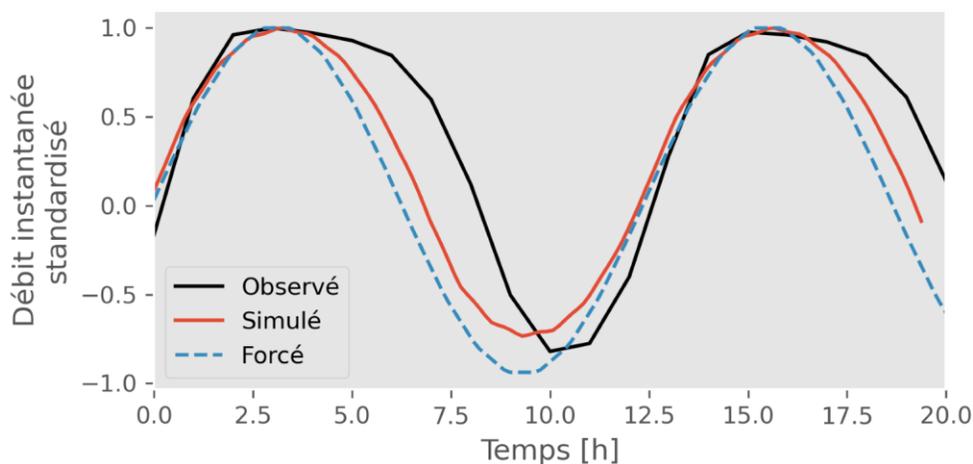


Figure 18. Signal de débit

Débit horaire à Québec. Les courbes ont été standardisées pour avoir le même maximum, en même temps.

3.3.3 Sensibilité de la position du front selon le débit et la marée

À la lumière des considérations mentionnées de la section précédente, il ne serait pas recommandé d'essayer d'extraire une relation quantitative entre le débit, la marée et la position du front salin. Pour des débits et des marées très énergétiques, trois fois les normales, la position du front suit une évolution similaire à ce que l'on attendait du modèle. À débit de marée (M) constant, l'augmentation du débit moyen (D) fait descendre le front vers l'aval, tandis qu'à D constant, l'augmentation de M le fait remonter vers l'amont, ce qui n'est pas vraiment étonnant. L'étude de l'espace des paramètres (D , M) (Figure 19), les simulations convergentes demandent toutefois des marées 2 à 3 fois plus fortes que la réalité, ce qui démontre encore une fois que le mélange est inadéquat dans le modèle.

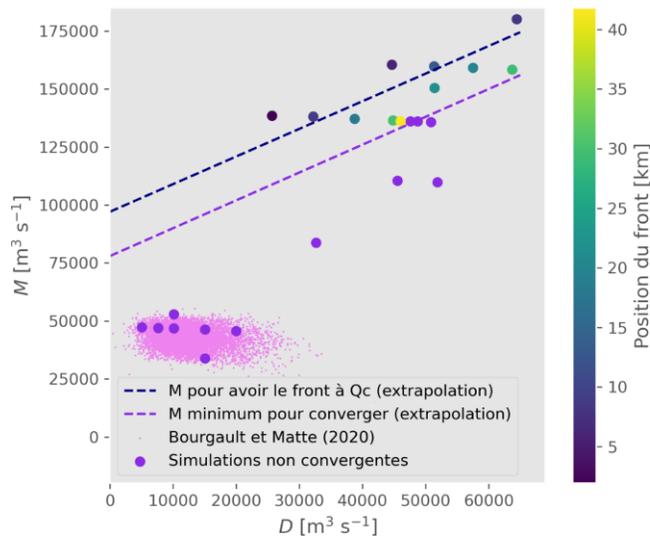


Figure 19. Convergence et non-convergence

Les différentes simulations complétées dans l'espace D-M. Les points des simulations qui présentent un front salin à l'équilibre sont colorés selon la position de celui-ci, c'est-à-dire la distance qui le sépare de la prise d'eau de la ville de Lévis. Les autres simulations sont en mauve alors que les observations sont représentées par le nuage de points roses. Les deux droites montrent une estimation approximative du M minimal nécessaire dans le forçage du modèle pour 1) (bleu) que le front atteigne la prise d'eau et 2) (mauve) que la simulation converge vers un équilibre.

3.3.4 Sensibilité selon les autres paramètres

La plupart des expériences de sensibilité aux paramètres autres que le débit ou la marée n'ont jamais eu lieu, étant donné qu'une configuration finale du modèle n'a jamais été obtenue. Quelques expériences où les profils de salinité à l'aval étaient changés ont été effectuées avec sa configuration la plus stable, mais elles ne furent pas concluantes. L'effet du rehaussement marin n'a pas été étudié.

3.3.5 Solutions et prochaines étapes

Le manque de mélange constaté plus haut pourrait peut-être être pallié par l'ajout de diffusion numérique et de paramétrisations de mélange. Des paramétrisations comme celles de (Gent & McWilliams, 1990) ont justement été développées pour forcer un plus grand mélange entre les couches d'eau, quand la résolution et la disposition du modèle l'empêche. Le temps et les ressources manquent par contre au projet pour continuer ce type de développement. De tels ajouts demandent plus de calibration puisqu'ils introduisent de multiples nouveaux paramètres et cette tâche prend alors une ampleur qui va au-delà du présent projet. De même, un passage à la 3D devrait pouvoir résoudre plusieurs problèmes du présent modèle, mais les ressources nécessaires pour le faire rouler augmenteraient alors considérablement. Dans les deux cas, le présent modèle pourrait être un bon point de départ, une bonne partie de sa calibration étant déjà effectuée.

3.4 CONCLUSION

À ce jour, il n'existe pas de modèle disponible pour simuler la position et l'évolution du front salin dans l'estuaire fluvial du fleuve Saint-Laurent. Toutefois, pour les fins du projet et dans le but d'offrir une première appréciation de l'impact que pourraient avoir les changements climatiques sur la position du front salin, une version simplifiée d'un modèle océanique a été élaborée avec le modèle MITgcm. Malheureusement, les résultats peu probants illustrés et expliqués précédemment empêchent de statuer de manière robuste sur la vulnérabilité future des prises d'eau de Québec et de Lévis.

De nombreux défis se sont présentés durant le projet, le plus important étant certainement le manque de données pour aider à la calibration du modèle. Si la base de données de l'OGSL offre une bonne quantité de profils verticaux pris à divers endroits de l'estuaire, il est très difficile de trouver des séries temporelles à des points fixes pour les différentes variables nécessaires à la modélisation (température, salinité). La vitesse du courant, en surface comme en profondeur, est certainement la variable pour laquelle nous avons trouvé le moins d'observations. La plupart des ensembles de données trouvés sont limités temporellement et spatialement, et peu sont disponibles sur les plateformes de partage de données scientifiques (comme celles de l'OGSL ou de Canada Ouvert).

Paradoxalement, la recherche de données pour calibrer le modèle a mené à l'analyse de certains ensembles fort intéressants, mais pas encore utilisés pour étudier la salinité aux alentours de Québec. Décrites par (Galbraith et al., 2006), les mesures de thermosalinographes embarqués sur des navires transitant par le Saint-Laurent pourraient offrir un complément intéressant pour l'analyse d'observations présentée dans la section précédente.

La modélisation bidimensionnelle du front salin s'est avérée l'option à privilégier étant donné les ressources disponibles et les échéanciers du projet. Or, pour résoudre adéquatement la complexité du domaine, une modélisation tridimensionnelle serait donc requise. En effet, la modélisation d'un système aussi complexe que l'estuaire est un sujet de recherche en soi et les phénomènes individuels ne peuvent être étudiés en isolation, comme l'ont montré les résultats présentés précédemment ; l'approche doit être plus holistique. Malgré tout, avec les modifications au modèle discutées plus haut, il est possible qu'il puisse éventuellement donner une image correcte de la situation. Toutefois, il n'est pas clair que l'effort requis en vaille la peine, puisque le développement d'un tel modèle est déjà en cours dans les centres de recherches d'Environnement Canada et Pêches et Océans Canada. Au lieu de doubler les efforts, il semblerait plus judicieux d'attendre les avancements de ce projet, voire d'y participer activement via des projets d'études graduées en collaboration avec ces centres de recherches et les universités.

RÉFÉRENCES

- Bourgault, D., & Matte, P. (2020a). *Qmec : a Matlab code to compute tidal river discharge from water level* (No. v1).
- Bourgault, D., & Matte, P. (2020b). A Physically Based Method for Real-Time Monitoring of Tidal River Discharges From Water Level Observations, With an Application to the St. Lawrence River. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(5). <https://doi.org/10.1029/2019JC015992>
- Bourgault, D., Saucier, F. J., Lin, C. A. (2001). Shear instability in the St. Lawrence Estuary, Canada: A comparison of fine-scale observations and estuarine circulation model results. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5), 9393– 9409, <https://doi.org/10.1029/2000JC900165>.
- Galbraith, P., Saucier, J., Michaud, N., Lefavre, D., Corriveau, R., Roy, F., Pigeon, R., & Cantin, S. (2006). Shipborne monitoring of near-surface temperature and salinity in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. *Atlantic Zone Monitoring Program Bulletin*, 2, 26–30.
- Gent, P. R., & McWilliams, J. C. (1990). Isopycnal Mixing in Ocean Circulation Models. *Journal of Physical Oceanography*, 20(1). [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<0150:imiocm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<0150:imiocm>2.0.co;2)
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The Estuarine Circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46(1), 175–197. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302>
- James, T. S., Robin, C., Henton, J. A., & Craymer, M. (2021). Relative sea-level projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG national crustal velocity model. *Geological Survey of Canada. Open File*, 8764.
- Lavoie, D., Lambert, N., Rousseau, S., Dumas, J., Chassé, J., Long, Z., Perrie, W., Starr, M., Brickman, D., & Azetsu-Scott, K. (2020). *Projections of future physical and biogeochemical conditions in the Gulf of St. Lawrence, on the Scotian Shelf and in the Gulf of Maine*.
- Marshall, J., Adcroft, A., Hill, C., Perelman, L., & Heisey, C. (1997). A finite-volume, incompressible navier stokes model for, studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 102(C3). <https://doi.org/10.1029/96JC02775>
- Matte, P., Secretan, Y., & Morin, J. (2017). Hydrodynamic Modeling of the St. Lawrence Fluvial Estuary. I: Model Setup, Calibration, and Validation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000397](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000397)
- Music, B., Frigon, A., Lofgren, B., Turcotte, R., & Cyr, J. F. (2015). Present and future Laurentian Great Lakes hydroclimatic conditions as simulated by regional climate models with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Climatic Change*, 130(4). <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1348-8>
- Orlanski, I. (1976). A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *Journal of Computational Physics*, 21(3). [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(76\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(76)90023-1)

- Saucier, F. J., & Chassé, J. (2000). Tidal circulation and buoyancy effects in the St. Lawrence Estuary. *Atmosphere - Ocean*, 38(4). <https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649658>
- Saucier, F. J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P., & Ritchie, H. (2003). Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(8). <https://doi.org/10.1029/2000jc000686>
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3).
- Stenström, P. (2004). Hydraulics and mixing in the Hudson River estuary: A numerical model study of tidal variations during neap tide conditions. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 109(4). <https://doi.org/10.1029/2003JC001954>
- Tedford, E. W., Carpenter, J. R., Pawlowicz, R., Pieters, R., and Lawrence, G. A. (2009). Observation and analysis of shear instability in the Fraser River estuary, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C11). <https://doi.org/10.1029/2009JC005313>.
- Xu, Y., Hoitink, A. J. F., Zheng, J., Kästner, K., & Zhang, W. (2019). Analytical model captures intratidal variation in salinity in a convergent, well-mixed estuary. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4309–4322. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4309-2019>

ANNEXES

ANNEXE A – TABLEAUX ET FIGURES COMPLÉMENTAIRES

Données utilisées dans les analyses de régressions multiples reliant la position du front salin (distance à partir de la prise d'eau Desjardins) au débit fluvial à Québec (moyenne pour le jour précédent l'échantillonnage), à la marée (hauteur prédite à la position du front salin au moment où cette dernière a été établie) et à la vitesse du vent mesurée à la station météorologique de l'Île-aux-Grues (composante orientée dans l'axe du fleuve à 50°, les valeurs positives dénotent des vents du Nord-est soufflant de l'aval du fleuve).

Date	Distance (km)	Débit journalier (m ³ /s)	Hauteur de marée (m)	Vitesse du vent (km/h)
2020-05-25	40,4	15800	4,8	-15,7
2020-06-08	34,0	14800	6,2	36,1
2020-06-26	35,8	12000	5,7	-18,6
2020-07-07	36,8	12000	6,0	11,4
2020-07-22	33,4	10800	6,2	-16,8
2020-08-04	37,2	11200	5,7	-12,6
2020-08-20	34,2	10800	6,1	-17,8
2020-09-03	37,2	11200	5,4	-22,3
2020-09-19	32,1	10600	5,7	-12,1
2018-08-16	36,2	12400	5,1	11,1
2018-10-12	37,7	12800	5,2	-13,6
2019-05-04	55,4	23400	4,5	-6,1
2018-08-16	46,5	12400	0,7	11,2
2018-10-09	52,0	10600	0,3	-23,2
2019-05-04	64,3	23400	0,6	-8,9

ANNEXE B – DONNÉES DES CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGES

Les données présentées en annexe représentent la valeur de conductivité spécifique minimale et maximale enregistrée pour chacune des stations. Pour visualiser l'ensemble des données, nous invitons le lecteur à consulter l'atlas environnement de la CMQuébec à l'adresse suivante :

<https://www.atlasstat.cmquebec.qc.ca/Atlasenviro/>

Station	Date (mm/jj/aaaa)	Heure UTC	Longitude Est	Latitude Nord	Profondeur (m)	Température (deg C)	Conductivité spécifique (µS/cm)
Q38	05/25/2020	11:45:04	-70,6590	47,1467	1	10,55	6885
					17	9,16	13681
Q31	05/25/2020	12:12:08	-70,7010	47,1106	0	10,53	6485
					8	9,88	9836
Q31 (bis)	05/25/2020	12:38:53	-70,7010	47,1106	0	10,58	6442
					9	9,91	9818
Q18	05/25/2020	12:58:58	-70,7220	47,0852	0	11,19	3710
					13	10,25	7924
Q19	05/25/2020	13:19:29	-70,7530	47,0611	0	11,15	2184
					9	10,58	5989
Q20	05/25/2020	13:29:30	-70,7840	47,0566	0	11,20	976
					10	10,95	3434
Q21	05/25/2020	13:38:59	-70,8220	47,0403	0	11,52	220
					11	11,20	392
Q18	06/08/2020	11:40:09	-70,7260	47,0844	0	14,82	4271
					18	14,42	6418
Q19	06/08/2020	11:59:06	-70,7530	47,0621	0	15,11	3043
					16	14,56	5749
Q20	06/08/2020	12:10:13	-70,7840	47,0511	0	15,31	1513
					7	14,96	3850
Q21	06/08/2020	12:20:29	-70,8240	47,0403	0	15,56	860
					10	15,38	1229
Q22	06/08/2020	12:32:15	-70,8740	47,0299	0	15,56	252
					9	15,45	343
Q23	06/08/2020	12:41:05	-70,8990	47,0189	0	15,47	231
					13	15,49	247
Q24	06/08/2020	12:49:45	-70,9320	47,0063	0	15,47	231
Q25	06/08/2020	12:59:40	-70,9690	46,9838	0	15,48	229
Q25B	06/08/2020	13:07:17	-70,9780	46,9876	0	15,44	211
Q18	06/26/2020	12:52:31	-70,7230	47,0848	1	18,30	7534
Q19	06/26/2020	13:09:52	-70,7530	47,0604	1	18,69	6381
					9	18,36	7297

Q20	06/26/2020	13:20:47	-70,7840	47,0506	1	20,02	2792
					8	19,39	4412
Q21	06/26/2020	13:34:48	-70,8240	47,0407	1	20,67	1335
					6	20,15	2498
Q22	06/26/2020	13:51:03	-70,8740	47,0295	1	21,15	388
					6	21,00	525
Q23	06/26/2020	14:02:20	-70,9000	47,0186	1	21,30	267
					5	21,25	287
Q24	06/26/2020	14:14:34	-70,9320	47,0060	1	21,33	254
Q25	06/26/2020	14:28:32	-70,9700	46,9831	1	21,60	252
Q18	07/07/2020	10:58:51	-70,7220	47,0865	1	19,20	6182
					16	18,69	7997
Q19	07/07/2020	11:11:58	-70,7510	47,0620	1	19,98	3471
					17	19,39	5676
Q20	07/07/2020	11:22:31	-70,7840	47,0503	1	20,57	1841
					7	20,31	2763
Q21	07/07/2020	11:32:22	-70,8230	47,0405	1	20,98	870
					3	20,96	880
Q22	07/07/2020	11:43:08	-70,8730	47,0298	1	21,25	283
					6	21,21	344
Q23	07/07/2020	11:50:15	-70,8990	47,0190	1	21,17	270
					5	21,21	274
Q23	07/07/2020	12:01:25	-70,9090	47,0174	0	21,24	274
					10	21,28	283
Q24	07/07/2020	12:08:26	-70,9320	47,0063	0	21,32	268
					4	21,32	270
Q25	07/07/2020	12:17:07	-70,9690	46,9844	0	21,31	265
Q18	07/22/2020	10:42:02	-70,7210	47,0864	1	20,51	9074
					13	19,78	11340
Q19	07/22/2020	10:57:54	-70,7540	47,0613	1	20,49	9157
					17	20,11	10335
Q20	07/22/2020	11:06:51	-70,7840	47,0507	0	21,80	5117
					13	21,29	7010
Q21	07/22/2020	11:16:44	-70,8230	47,0404	1	22,41	3367
					10	22,10	4549
Q22	07/22/2020	11:32:51	-70,8730	47,0297	1	23,19	767
					6	22,86	2084
Q21.5	07/22/2020	11:42:32	-70,8510	47,0352	1	23,10	888
					9	22,52	3257
Q23	07/22/2020	11:52:39	-70,8990	47,0187	1	23,24	455
					6	23,24	816

Q23.5	07/22/2020	12:00:15	-70,9090	47,0250	1	23,07	1019
Q24.5	07/22/2020	12:09:01	-70,9370	47,0105	1	23,23	550
Q24	07/22/2020	12:14:22	-70,9320	47,0062	0	23,26	331
					12	23,30	464
Q25	07/22/2020	12:23:45	-70,9690	46,9838	1	23,23	277
					6	23,24	278
Q26	07/22/2020	12:33:34	-70,9930	46,9662	0	23,25	277
					21	20,54	10710
Q19	08/04/2020	09:56:49	-70,7540	47,0603	0	21,86	6989
					15	21,64	7781
Q20	08/04/2020	10:05:39	-70,7840	47,0506	0	23,20	3239
					6	22,79	4574
Q21	08/04/2020	10:13:23	-70,8230	47,0403	0	23,89	1425
					7	23,89	1551
Q22	08/04/2020	10:23:51	-70,8740	47,0297	0	24,54	287
					5	24,39	372
Q21.5	08/04/2020	10:31:20	-70,8520	47,0366	0	24,35	457
					12	24,17	846
Q23	08/04/2020	10:40:22	-70,9000	47,0185	0	24,44	268
					6	24,54	285
Q24	08/04/2020	10:47:03	-70,9320	47,0064	0	24,66	260
Q25	08/04/2020	11:00:37	-70,9720	46,9828	0	24,68	258
Q18	08/20/2020	10:43:36	-70,7210	47,0869	1	19,93	9813
					16	18,90	13064
Q19	08/20/2020	11:02:24	-70,7550	47,0602	0	20,57	8053
					16	19,61	11137
Q20	08/20/2020	11:13:40	-70,7840	47,0505	1	21,41	5613
					9	20,36	9164
Q21	08/20/2020	11:27:01	-70,8240	47,0402	1	22,19	3193
					10	21,53	5708
Q21.5	08/20/2020	11:38:23	-70,8520	47,0367	1	22,70	1415
					14	22,11	3886
Q22	08/20/2020	11:48:15	-70,8730	47,0299	1	22,96	795
					10	22,48	2643
Q22.5	08/20/2020	11:57:28	-70,8880	47,0240	1	22,99	515
					8	22,72	1792
Q23	08/20/2020	12:03:42	-70,8990	47,0189	1	22,99	616
					5	23,00	983
Q24	08/20/2020	12:13:54	-70,9310	47,0063	1	22,92	339
					12	23,10	518

Q25	08/20/2020	12:25:30	-70,9690	46,9843	0	23,06	279
					11	23,14	298
Q50	09/01/2020	21:22:54	-70,4470	47,3945	0	11,82	27993
					27	6,06	42628
Q49	09/01/2020	21:34:01	-70,4700	47,3448	0	12,66	26151
					18	8,88	35365
Q48	09/01/2020	21:45:02	-70,5080	47,2981	0	15,52	17468
					15	11,16	29291
Q47	09/01/2020	21:56:58	-70,5460	47,2511	0	17,09	12044
					27	12,54	25493
Q42	09/01/2020	22:09:42	-70,5890	47,2129	0	16,41	14479
					16	13,92	21701
Q41	09/01/2020	22:19:28	-70,6280	47,1813	0	17,20	11076
					21	15,05	18038
Q38	09/01/2020	22:29:38	-70,6600	47,1476	0	18,12	8912
					13	15,55	16478
Q31	09/01/2020	22:39:10	-70,6950	47,1171	0	18,05	8721
					19	17,18	11256
Q18	09/01/2020	22:48:45	-70,7220	47,0857	0	18,42	6529
					21	17,76	9089
Q19	09/01/2020	23:12:24	-70,7530	47,0618	0	19,14	3254
					10	18,42	6365
Q20	09/01/2020	23:19:17	-70,7840	47,0508	0	19,16	3302
					12	18,89	4585
Q18	09/03/2020	10:29:47	-70,7220	47,0858	0	18,19	6635
					19	17,47	9603
Q19	09/03/2020	10:45:25	-70,7540	47,0608	1	18,47	5661
					9	18,25	6648
Q20	09/03/2020	10:55:59	-70,7840	47,0507	1	19,27	2204
					7	19,05	3319
Q21	09/03/2020	11:07:39	-70,8240	47,0403	0	19,49	1206
Q21.5	09/03/2020	11:17:37	-70,8530	47,0365	1	19,64	452
					7	19,62	591
Q22	09/03/2020	11:27:04	-70,8740	47,0297	1	19,57	333
					7	19,62	422
Q23	09/03/2020	11:37:52	-70,9000	47,0187	0	19,72	290
					2	19,73	294
Q24	09/03/2020	11:51:10	-70,9330	47,0060	0	19,75	263
					5	19,76	265
Q18	09/19/2020	10:51:00	-70,7220	47,0860	0	15,10	7965
					14	14,60	10580

Q19	09/19/2020	11:02:36	-70,7540	47,0617	0	15,46	6173
					14	15,23	8038
M1	09/19/2020	11:11:15	-70,7860	47,0517	0	15,96	3182
					5	15,93	4263
M2	09/19/2020	11:14:53	-70,7840	47,0473	0	15,86	3874
					23	15,62	6010
M3	09/19/2020	11:21:27	-70,7820	47,0427	0	15,90	4705
					6	15,88	4775
M4	09/19/2020	11:26:27	-70,7790	47,0353	1	16,22	3320
					6	16,21	3370
M5	09/19/2020	11:31:28	-70,7760	47,0228	0	16,92	1045
					20	16,63	2098
M9	09/19/2020	11:41:24	-70,8190	47,0322	0	16,32	1399
M8	09/19/2020	11:45:20	-70,8230	47,0375	0	16,23	2021
					10	16,27	2481
M7	09/19/2020	11:49:56	-70,8250	47,0413	0	16,13	3216
					12	16,13	3438
M6	09/19/2020	11:54:56	-70,8260	47,0445	0	16,06	2976
					1	16,06	2980
Q21.5	09/19/2020	12:00:30	-70,8520	47,0366	0	16,37	1333
					9	16,27	2157
M10	09/19/2020	12:06:44	-70,8680	47,0354	1	16,18	1539
					8	16,12	1929
M11	09/19/2020	12:11:25	-70,8660	47,0332	0	16,44	1123
					10	16,22	1974
M12	09/19/2020	12:17:16	-70,8640	47,0297	1	16,66	452
					12	16,40	1445
M13	09/19/2020	12:21:33	-70,8620	47,0253	0	16,63	712
Q22.5	09/19/2020	12:27:15	-70,8870	47,0241	0	16,43	424
					8	16,36	1277
Q23	09/19/2020	12:31:56	-70,8990	47,0190	0	16,50	565
					10	16,44	986
Q24	09/19/2020	12:39:02	-70,9310	47,0064	0	16,39	373
					14	16,52	548
Q25	09/19/2020	12:47:11	-70,9700	46,9840	0	16,55	315
					11	16,52	339

