



Analyse des embâcles de glace sur le fleuve Saint-Laurent lors de l'hiver 2018-2019 et développement d'un outil d'évaluation des risques d'embâcles

Mémoire

Philippe Scalabrini

Maîtrise en génie des eaux - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

**Analyse des embâcles de glace sur le fleuve
Saint-Laurent lors de l'hiver 2018-2019 et
développement d'un outil d'évaluation des risques
d'embâcles**

Mémoire

Philippe Scalabrini

Sous la direction de :

Brian Morse, directeur de recherche

Résumé

Durant les mois de janvier et février 2019, trois embâcles ont forcé l'arrêt de la navigation commerciale vers le Port de Montréal. Ce mémoire présente les conditions météorologiques associées aux embâcles sur le fleuve Saint-Laurent de l'hiver 2018-2019.

Il explique que les embâcles se développent à la suite d'arrêts de glace dans le bief problématique du lac Saint-Pierre entre la courbe Louiseville et le bassin Yamachiche. Pour ce faire, l'étude considère la production de glace en amont jusqu'au lac Saint-Louis.

Il explique pourquoi ce bief est si vulnérable à l'initiation d'embâcles en présentant les neuf concepts de vulnérabilité du lac Saint-Pierre.

De plus, il propose quatorze recommandations concrètes pour améliorer la fiabilité de navigation hivernale en réduisant les risques d'embâcles. En considérant ces recommandations, différentes opportunités de télédétection et une interface utilisateur sont présentées.

L'opportunité de télédétection introduit la possibilité d'usage d'images de RADARSAT Constellation Mission et de photographies par drone afin d'évaluer des éléments clés comme la progression du couvert de glace, la largeur effective du chenal, la concentration de glace en transit et la vitesse de la glace.

L'interface est un prototype d'outil d'aide à la décision de source libre qui permet d'obtenir d'autres informations quantitatives sur les risques d'arrêts de glace et du même fait, d'embâcles de glace.

Abstract

In January and February 2019, three ice jams blocked commercial navigation to the Port of Montreal. This thesis presents the environmental conditions associated with the ice jams of winter 2018-2019 on the Saint Lawrence River.

It explains how the ice jams develop when an ice stoppage prevents the circulation of ice floes downstream. It focusses on the area that is most at risk of ice jams in the St. Lawrence River reach known as Lake St. Pierre (specifically between curve Louiseville and the Yamachiche basin). The study also accounts for the ice production in the river upstream (all the way to Lake St. Louis).

To do so, ice processes, historical information and ice management structures are analysed, and the vulnerability of the area is presented by discussing nine key concepts.

Using this information, 14 recommendations are proposed to improve the reliability of commercial winter navigation and to reduce the risks of ice jams. Considering the recommendations, different opportunities of remote sensing and of a data assimilation management tool are presented.

The opportunity for remote sensing introduces the possibility of using the images of *RADARSAT Constellation Mission* and *drone photography* to evaluate critical elements like the ice cover progression, the effective channel width, ice concentration and ice speed.

A data assimilation management tool is proposed using an open-source decision support system. The tool provides quantitative information about the risks of ice stoppages and ice jams as a function of degrading weather and hydro-cryological conditions.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Listes des figures	vii
Listes des tableaux	x
Liste des abréviations, sigles, acronymes	xi
Liste des symboles.....	xii
Remerciements	xiii
Introduction	1
Objectif.....	2
Source de données.....	3
Structure du mémoire.....	4
Chapitre 1 : Site de l'étude - Lac Saint-Pierre.....	5
1.1 Processus de la glace.....	5
1.1.1 Température de l'eau et production de glace	5
1.1.2 Glace de rive.....	6
1.1.3 Frasil et floes de glace	6
1.1.4 Arrêt de glace et embâcle	8
1.1.5 Résumé des processus généraux de formation des embâcles.....	10
1.2 Historique & Mitigation des embâcles de glace sur le Saint-Laurent	11
1.2.1 Inondations causées par les embâcles de glace.....	11
1.2.2 Services de déglçage.....	12
1.2.3 Structure hydraulique du site de l'étude.	12
1.2.4 Réseau d'observation des glaces de la Garde côtière canadienne	15
Chapitre 2 : La vulnérabilité du lac Saint-Pierre aux embâcles	17
2.1 Les neuf concepts en lien avec les arrêts et les embâcles de glace	18
2.1.1 La superficie à l'amont du lac Saint-Pierre contributive à la production de glace....	20
2.1.2 La vitesse d'écoulement réduite	22
2.1.3 Vestiges d'anciens travaux de dragage de capitalisation.....	22
2.1.4 Élargissement du chenal au bassin Yamachiche	23

2.1.5	La fuite du débit sous le couvert de glace de chaque côté du chenal maritime.....	23
2.1.6	Augmentation du niveau d'eau.....	23
2.1.7	La direction et la vitesse du vent.....	24
2.1.8	La présence de courbes du chenal maritime sur le bief	24
2.1.9	La largeur effective du chenal sur le bief problématique	25
2.2	Boucle d'événements transformant les arrêts de glace en embâcles	25
2.3	Études antérieures	27
2.4	Réduire les risques	32
2.4.1	Téledétection	32
2.4.2	Modèles.....	34
Chapitre 3 : Embâcles de l'hiver 2018-2019.....		38
3.1	Description des événements.....	38
3.2	Conditions générales de l'hiver 2018-2019.....	39
3.2.1	Degrés-jours de gel et évolution de la formation du couvert de glace.....	39
3.2.2	Estacades.....	40
3.2.3	Surface libre de glace	42
3.3	Analyses des embâcles.....	44
3.3.1	Conditions spécifiques des embâcles.....	44
3.3.2	Température	44
3.3.3	Vent	45
3.3.4	Précipitations	47
3.3.5	Débit du fleuve Saint-Laurent	49
3.3.6	Niveaux d'eau.....	50
3.3.7	Largeur effective du chenal maritime sur le bief problématique	51
3.4	Analyse des images de glaces.....	52
3.5	Résultats.....	64
3.5.1	Conclusion de l'analyse	64
3.5.2	Analyse des opportunités d'intervention opérationnelle pour réduire les risques d'arrêts et d'embâcles.....	65
3.6	Recommandations pour réduire les risques de formation des embâcles	67
Chapitre 4 : Proposition d'outils de prévention et de gestion des embâcles		70

4.1	Téledétection	70
4.1.1	Satellite.....	70
4.1.2	Drone.....	75
4.2	Outil d'aide à la décision	84
4.3	LSPRICE.....	85
4.3.1	Langage de programmation	85
4.3.2	Données d'entrée.....	86
4.3.3	Évaluation de la production de glace	89
4.3.4	Vitesse de la glace	91
4.3.5	Congestion.....	92
4.3.6	Fonction de régression pour l'estimation de la concentration de glace.....	94
4.3.7	Résumé de l'outil.....	98
	Conclusion et recommandations	99
	Conditions des embâcles de l'hiver 2018-2019	99
	Proposition d'outils	100
	Recommandations	101
	Bibliographie	102
	Annexe A - Interface.....	108
	Annexe B – Patrouille aérienne.....	112

Listes des figures

Figure 1: Structure du mémoire	4
Figure 2: Structure du mémoire - Lac Saint-Pierre	5
Figure 3: Embâcle bouée S63, lac Saint-Pierre vue de l'aval vers amont; 21 janvier 2019.....	9
Figure 4: Processus de la glace (inspiré de Hicks, 2016 et de Lindenschmidt,2020)	10
Figure 5: Inondation rue Des Commissaires : 1886 / Leclerc. - Reproduction le 13 janvier 1969. Source : Ville de Montréal. Section des archives, Cote CA M001 VM094-Y-1-17-D1709.....	11
Figure 6: Localisation du site de l'étude (Google Earth, s.d.)	13
Figure 7: Localisation des estacades et des différents secteurs amont du lac Saint-Pierre (selon les cartes d'observations des glaces de la Garde côtière canadienne) (Google Earth, s.d.)	14
Figure 8: Emplacement des réservoirs entre les Îles de Sorel (Inspiré de Morin et Côté, 2003, fig 6) (Google Earth, s.d.)	15
Figure 9: Structure du mémoire - Vulnérabilités.....	17
Figure 10: Carte de localisation du chenal maritime, des courbes et des structures (1991) sur le lac Saint-Pierre (Morse, 1993 ; fig. 3).	19
Figure 11: Boucle d'événement démontrant le cercle d'intensification des embâcles : début d'un arrêt de glace qui se transforme en embâcle.....	26
Figure 12: Structure du mémoire – Embâcles de l'hiver 2018-2019	38
Figure 13: Degrés-jours de gel lors des hivers de 2015 à 2019.....	39
Figure 14: Date de formation complète des couverts de glace en amont de chaque estacade en fonction des degrés-jours de gel.....	40
Figure 15:Date de formation des couverts de glace à l'amont des estacades en fonction des degrés-jours de gel lors des hivers de 2015 à 2019.....	42
Figure 16: Aire observée de surface libre qui contribue à la production de glace sur le fleuve Saint-Laurent du lac Saint-Louis jusqu'à Sorel lors de l'hiver 2019	43
Figure 17:Température de l'air moyenne (Ta) ajustée à Sorel pour l'hiver 2018-2019. (Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux).....	45
Figure 18:Vitesse et direction du vent sur le lac Saint-Pierre lors de l'hiver 2019	46
Figure 19:Vitesse du vent nord-est sur le lac Saint-Pierre lors de l'hiver 2019. (Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace (lignes pointillées) devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux (lignes solides)).....	47
Figure 20: Localisation des municipalités de Louiseville et de Pierreville par rapport au lac Saint-Pierre (Google Maps, s.d.)	48
Figure 21: Précipitation (neige) pour les municipalités de Louiseville et Pierreville lors des mois de janvier et février 2019. (Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux)	48
Figure 22: Débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle et de la rivière Mille-Îles lors de l'hiver 2018-2019. Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux.	49

Figure 23: Niveaux d'eau par rapport au zéro des cartes à différentes stations sur le fleuve Saint-Laurent. Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux.	50
Figure 24: Niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent pour les stations de Sorel et du Port Saint-François lors de l'hiver 2019.	51
Figure 25: estacade de Lavaltrie 15 janvier 2019.	52
Figure 26: progression du couvert de glace Lavaltrie et Lanoraie en janvier 2019 (Source : Cartes d'observation des glaces Environnement Canada)	53
Figure 27: Embâcle bouée S63 vers amont 21 janvier 2019.	54
Figure 28: Cartes d'observations des glaces du lac Saint-Pierre le 21 janvier 2019 pour trois moments différents.	55
Figure 29: Bief problématique, secteur Courbe no 1 (Louiseville). Photo prise vers amont 21 janvier 2019.	56
Figure 30: Fleuve Saint-Laurent, secteur Sorel, photo prise vers amont 21 janvier 2019.	57
Figure 31: île St-Ours 21 janvier 2019.	58
Figure 32: Fleuve Saint-Laurent, secteur Île St-Ours; photo prise vers l'amont 21 janvier 2019.	59
Figure 33: Fleuve Saint-Laurent, secteur de la Courbe Maskinongé; photo prise vers l'aval 22 janvier 2019.	60
Figure 34: Bief problématique du lac Saint-Pierre à la hauteur de la Courbe Yamachiche; photo prise vers l'aval 22 janvier 2019.	61
Figure 35: Cartes d'observations des glaces du lac Saint-Pierre le 22 janvier 2019 pour deux moments différents.	62
Figure 36: Navire pris par la glace dans le chenal le 24 janvier 2019.	63
Figure 37: Structure du mémoire – Proposition d'outils de prévention et de gestions des embâcles	70
Figure 38: Script python permettant d'évaluer le pourcentage du couvert de glace.	72
Figure 39: Pourcentage de couvert selon le script de traitement d'image.	73
Figure 40: Source de l'image (RCM 2020-02-19).	74
Figure 41: Performance du drone Contixo F22 (Contixo s.d.)	75
Figure 42: Zones de restriction de vol à considérer dans ce projet.	76
Figure 43: Script permettant de déterminer la concentration de glace en transit à l'aide d'images par drone.	79
Figure 44: Concentration de glace en transit selon le script de traitement d'image.	80
Figure 45: Exemple d'image réalisé par la séparation de la vidéo en image (3fps).	81
Figure 46: Exemple d'image 3D (vidéo 20 secondes, 2fps).	82
Figure 47: Exemple d'image 3D (vidéo 7 secondes, 3fps).	82
Figure 48: Potentiel de l'outil de mesure afin de caractériser un amas de glace.	83
Figure 49: Affichage d'accueil de l'outil d'aide à la décision LSPrICE.	85
Figure 50: Capture d'écran de l'outil: Pourcentage du couvert de glace.	86
Figure 51: Capture d'écran de l'outil: Concentration de glace en transit.	87
Figure 52: Capture d'écran de l'outil: Coefficient de transfert de chaleur, temps et température sous zéro.	87
Figure 53: Capture d'écran de l'outil: Vitesse et direction du vent.	88

Figure 54: Capture d'écran de l'outil: Précipitations de neige.....	88
Figure 55: Capture d'écran de l'outil: Vitesse du courant, radius des floes, épaisseur de glace et largeur efficace.....	89
Figure 56: Capture d'écran de l'outil: Histogramme de la production de la glace (exemple).	90
Figure 57: Capture d'écran de l'outil: Visualisation de la production de la glace sur le territoire. ..	91
Figure 58 : Capture d'écran de l'outil : Vitesse de la glace selon l'équation 10 [Morse (2003)] et l'équation 11 [Morin (2000)]	92
Figure 59: Capture d'écran de l'outil : Comparaison du débit de glace et de la capacité d'évacuation selon les modèles de vitesse de la glace et le secteur.	93
Figure 60: Capture d'écran de l'outil : Indicateur comparant du débit de glace et de la capacité d'évacuation selon les modèles de vitesse de la glace et le secteur.	93
Figure 61: Méthodologie de la régression de concentration de glace en transit future.	95
Figure 62: Python: Script utilisé afin d'obtenir la régression linéaire de la concentration future de glace en transit.....	96
Figure 63: Régression linéaire de la concentration future sur le tronçon problématique du lac Saint-Pierre.	97
Figure 64: Estimation de la concentration future de glace en transit (vecteur de vitesse = -20 et température = -20 avec une concentration initiale de 50% de glace en transit).	98
Figure 65: Patrouille aérienne en avion - estacade Yamachiche	112
Figure 66: Patrouille aérienne avion - Glace en transit.	112

Listes des tableaux

Tableau 1: Description de la glace selon le MANICE (2005).....	7
Tableau 2: Dates des embâcles sur le lac Saint-Pierre en 2019	38
Tableau 3: Dates de formation des couverts de glace complets en amont des estacades en fonction des années (hiver).....	41
Tableau 4: Informations sur les zones de restriction de vol à considérer dans ce projet (Osvd s.d.)	77

Liste des abréviations, sigles, acronymes

ECCC : Environnement et Changement climatique Canada

EPC : Estacade du pont Champlain

LSP : Lac Saint-Pierre

LSL : Lac Saint-Louis

MPO : Pêches et Océans Canada

MANICE : Manuel des glaces

PJCCI : Ponts Jacques-Cartier et Champlain incorporée

RC : Radio-Canada

RCM : RADARSAT Constellation Mission

RVC : Ressources Naturelles Canada

3DZF : 3DF Zephyr – logiciel de photogrammétrie

Liste des symboles

Paramètres	Symbole	Unité(s)
Aire	A	m ² ou km ²
Largeur effective du chenal	B_g	m
Concentration en glace de surface en mouvement	C	%
Direction du vent	D_v	
Direction du courant	D_w	
Débit d'eau	Q	m ³ /s
Coefficient d'efficacité pour le transfert de glace à travers les floes en circulation	f	
Force tangente	F_f	N
Force normale	F_N	N
Accélération gravitationnelle	g	m/s ²
Coefficient pour la capacité de transport maximal de glace	K_1, K_2	
Coefficient de transfert de chaleur en volume de glace	K_g	m ³ /°C km ²
Coefficient de rugosité Manning	n	
Débit unitaire de la glace	q_g	m ² /s
Débit de l'eau	Q	m ³ /s
Débit de glace de surface	Q_g	m ³ /s
Capacité de transport maximal/ d'évacuation	Q_{gc}	m ³ /s
Débit d'eau résiduel	Q_r	m ³ /s
Rayon des floes de glace	r	m
Pente longitudinale de l'écoulement	S	
Surface non couverte de glace de rive	S_e	m ²
Température	T	°C
Température de l'air pondérée	T_a	°C
Vitesse de l'eau	V	m/s
Vitesse de la glace	V_g	m/s
Vitesse de surface de l'eau	V_s	m/s
Vitesse du vent	V_w	m/s

Remerciements

J'aimerais remercier plusieurs individus m'ayant supporté lors de la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, j'aimerais remercier M. Brian Morse Ph.D. pour ses conseils, sa passion et sa patience dans le cadre de cette maîtrise. Un directeur de recherche qui m'a fortement encouragé et guidé durant les dernières années. Ensuite, M. Tadros Ghobrial Ph.D. pour avoir partagé ses idées et ses connaissances.

J'aimerais aussi remercier les employés de la Garde côtière canadienne pour leurs idées et pour avoir transféré des données et informations. Précisément M. Samir Gharbi, ing. Ph.D. de la Garde côtière pour sa direction, ses commentaires et ses suggestions. Je remercie aussi les employés d'Environnement Canada pour le transfert de données.

J'aimerais également souligner le travail des juges de ce mémoire qui ont grandement augmenté sa qualité avec leurs commentaires constructifs.

Il est d'intérêt de signaler le support de mes collègues à l'Université Laval pour les nombreuses discussions qui m'ont inspirées et dirigées lors de ce projet.

Finalement, j'aimerais remercier ma compagne, Catherine, et mes parents, Christine et Pierre, pour leur amour, support et encouragement. J'ai la chance de vous avoir comme modèles inspirants et je vous en remercie.

Introduction

Plusieurs catastrophes naturelles peuvent avoir des impacts socio-économiques majeurs, mais ce sont les inondations qui affectent le plus le Canada en termes de dégâts matériels (MSP, 2021).

Les inondations peuvent être engendrées par différents phénomènes tels que les ruptures de barrages, les crues et les embâcles de bois et de glace. Considérant que près de 60% des grands bassins versants de l'hémisphère nord sont influencés par les glaces de rivière (Robaya et coll. 2018), il est important de considérer ce dernier phénomène.

Son influence économique a d'ailleurs été étudié à plusieurs reprises au cours des dernières décennies. Selon Beltaos (2000), le montant annuel des dégâts associé à ce phénomène était de 60 millions de dollars au Canada (en 1990), tandis que Gerard et Davar (1995) estimaient cette valeur à 100 millions de dollars aux États-Unis. Les embâcles de glaces influencent aussi les voies navigables nord-américaines (USACE, 1994)

L'hiver 2018-2019 a marqué l'histoire de la navigation sur le fleuve Saint-Laurent. Selon Mme Nicole Trépanier, présidente-directrice générale de la Société de développement économique du Saint-Laurent, l'arrêt de la navigation du 21 au 26 janvier 2019 sur le lac Saint-Pierre est le plus long répertorié depuis 1993 (Codère, 2019). En 2019, deux autres arrêts de plus courte durée ont eu lieu sur le lac Saint-Pierre du 31 janvier au 1er février et du 14 au 15 février.

Ces embâcles ont causé des impacts économiques particulièrement sur la réputation du fleuve Saint-Laurent (Codère, 2019). Cependant ces impacts sont différents de ceux discutés précédemment considérant qu'ils sont cette fois-ci associés au transport maritime. Par exemple, en 1993, des embâcles de glaces ont causé un arrêt du trafic maritime pour une période de 40 jours (Morse, 2001). L'impact économique de cet arrêt peut facilement atteindre 200 millions de dollars considérant que le Port de Montréal engendre des revenus annuels de 1 200 millions de dollars (Morse et Hicks, 2005). Ce mémoire présente une

compréhension de la vulnérabilité du lac Saint-Pierre par rapport aux embâcles, les principes physiques favorisant leur formation, une description générale des conditions de l'hiver 2018-2019, afin de faire l'analyse des embâcles et de proposer des recommandations relativement à leur gestion. À la suite de ces recommandations, différentes opportunités de surveillance sont présentées et discutées dont l'usage d'un outil d'aide à la décision afin d'évaluer les risques d'embâcles.

Objectif

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les embâcles de glace sur le lac Saint-Pierre afin de mieux comprendre les différents facteurs ayant influencé leur formation en 2018-2019. Il permet aussi d'identifier les paramètres les plus significatifs afin de réduire les risques de formations d'embâcles.

Plus précisément, il répond aux objectifs suivants:

1. Identifier les secteurs à risque en décrivant les événements de l'hiver 2018-2019.
2. Analyser les embâcles afin de comprendre les paramètres ayant influencé leurs formations.
3. Identifier les paramètres et mécanismes significatifs.
4. Prévenir la formation d'embâcles sur le lac Saint-Pierre.

Cette section du mémoire provient principalement du rapport professionnel suivant, réalisé dans le cadre de cette maîtrise:

« Morse, B., Scalabrini, P. 2020. Bilan des embâcles des glaces sur le fleuve Saint-Laurent Hiver 2018-2019. Rapport technique de l'Université Laval présenté à la Garde côtière canadienne. 45 p. »

Par la suite, les recommandations sont considérées afin de discuter de différentes opportunités de surveillance et le développement d'un outil d'évaluation des risques.

Source de données

Le fleuve Saint-Laurent est notable dans la culture du Québec et du Canada et une grande majorité de ses caractéristiques sont étudiées par différents centres de recherche et organismes. Dans le cadre de ce projet, les données climatiques proviennent du site d'Environnement Canada (www.climate.weatheroffice.gc.ca). Pour ce qui est du suivi du couvert de glace, il est possible de visualiser les images satellites fournies par l'agence spatiale canadienne à l'aide d'une plateforme fournie par Ressources Naturelles Canada ([Welcome to EODMS \(nrcan-rncan.gc.ca\)](http://Welcome%20to%20EODMS%20(nrcan-rncan.gc.ca))). Des cartes d'observations des glaces sont aussi réalisées par la coopération entre Pêches et Océans et Environnement Canada (www.marinfo.gc.ca). Ces cartes permettent d'obtenir de bonnes informations qualitatives sur les conditions des glaces sur le fleuve.

Dans le cadre de ce projet, l'assistance des différentes équipes de la Garde côtière canadienne a permis d'obtenir de plus amples informations sur les arrêts et les embâcles de l'hiver 2019.

Structure du mémoire

Cette section a pour objectif de présenter la structure du mémoire. Comme indiqué dans la figure ci-dessous, le mémoire est divisé en 3 thèmes distincts. Ces sections permettent une meilleure compréhension de la problématique des arrêts de glace sur le lac Saint-Pierre et présentent certaines opportunités.

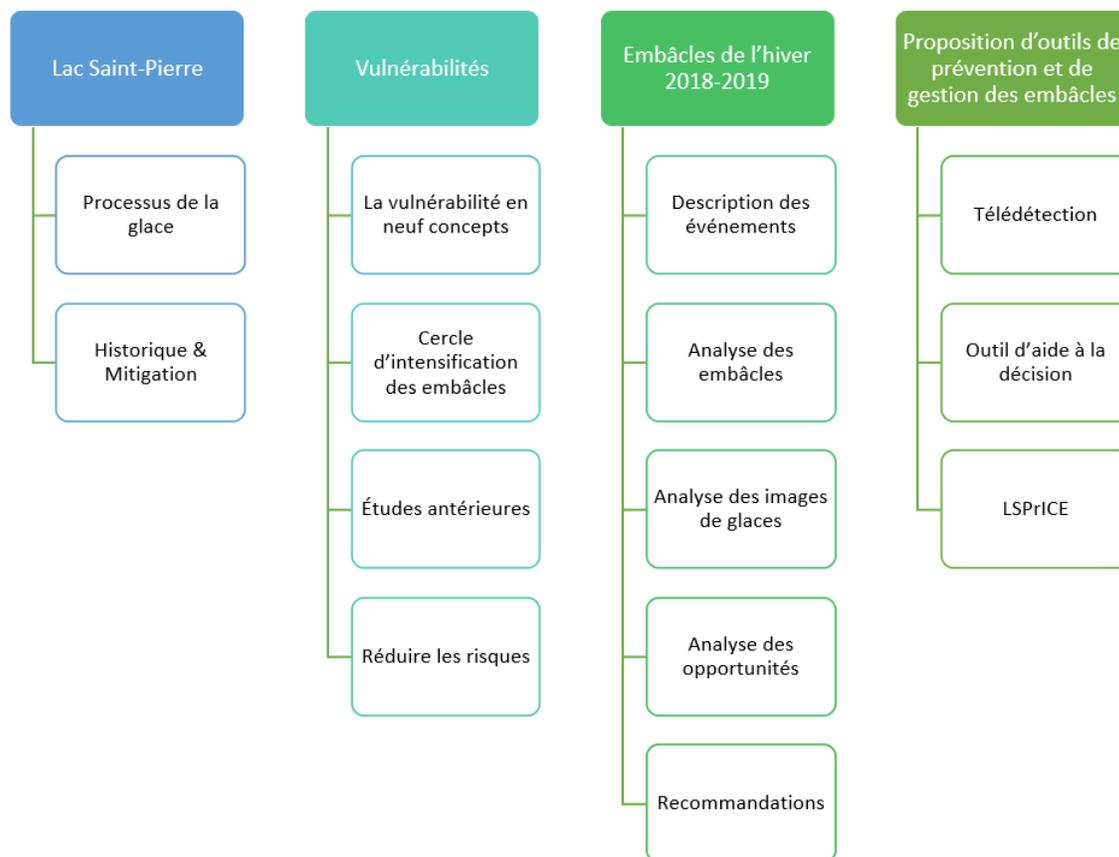


Figure 1: Structure du mémoire

Chapitre 1 : Site de l'étude - Lac Saint-Pierre

Cette section présente le lieu de l'étude ainsi que ses caractéristiques hivernales. Une introduction sur les processus de la glace permet de comprendre la formation des embâcles dans ce secteur tandis qu'un historique permet de comprendre ses vulnérabilités. Certains moyens de mitigation utilisés pour contrer ces vulnérabilités sont discutés. Une revue des études antérieures est présentée ainsi que des aspects permettant la réduction du risque.

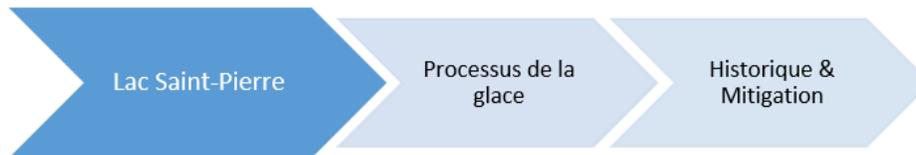


Figure 2: Structure du mémoire - Lac Saint-Pierre

1.1 Processus de la glace

Dans le cadre de la majorité des études sur les glaces, deux périodes distinctes sont souvent discutées, soit la période de gel et la période de dégel. La période de gel souligne la formation et l'évolution de la glace en période hivernale, tandis que la période de dégel se concentre sur la détérioration et l'évacuation de celle-ci lors du printemps.

Considérant le mandat de l'étude, ce mémoire se concentre principalement sur la première période, soit celle de gel puisque c'est durant cette période principalement qu'on observe des embâcles dans le secteur d'intérêt.

1.1.1 Température de l'eau et production de glace

Afin qu'il y ait production de glace dans une rivière ou tout autre cours d'eau, la température de l'eau doit atteindre le point de congélation. De ce fait, l'eau doit transmettre assez d'énergie à l'aide de perte de chaleur. Pour ce faire, la cause principale de perte de chaleur est le transfert d'énergie entre l'eau et l'air froid ambiant (Hicks, 2016). Les pertes de chaleur causées par les précipitations de neige et la température du lit du cours d'eau sont aussi à considérer (Hicks, 2016). Éventuellement, la température de l'eau diminue entre $-0,5\text{ °C}$ et 0

°C, ce qui permet alors la formation de petits cristaux de glace. Cette étape peut se traduire comme la période de surfusion de l'eau (Lindenschmidt, 2020).

1.1.2 Glace de rive

La première apparition observable de glace sur un cours d'eau est souvent ce qu'on appelle de la glace de rive. Une fine couche de glace se forme près des berges à l'endroit où la vitesse de l'eau est moindre (Lindenschmidt, 2020). Cette glace progresse horizontalement jusqu'à ce que la vitesse soit trop grande pour permettre sa formation (Michel et Drouin, 1970). Elle progresse aussi verticalement de diverses façons (Hicks, 2016).

Les pertes de chaleur peuvent augmenter l'épaisseur, ce qui produit une couche de couvert solide de forte résistance appelée glace noire (glace colonnaire). Par ailleurs, lorsqu'il y a la présence d'une couche de neige sur le couvert, la formation de glace noire cesse, car le transfert de chaleur vers la glace noire est interrompu.

La sloche se forme lorsque le poids d'une couche de neige immerge le couvert dans le cours d'eau. À ce moment, l'eau s'infiltré dans les pores de la neige et se solidifie par la suite. Cette glace de propriétés mécaniques moindres se nomme glace de neige (glace blanche).

Finalement, l'accumulation de frasil et de glace de fond sur la couche inférieure d'un couvert existant peut de nouveau augmenter l'épaisseur du couvert de glace. Cette glace est souvent caractérisée par la présence de débris et de sédiments transportés depuis le lit du cours d'eau. Considérant la progression de la formation de la glace de rive, il est fréquent que l'épaisseur du couvert de glace soit supérieure à l'endroit où elle débute sa formation, soit près des rives (Hicks, 2016).

1.1.3 Frasil et floes de glace

À la suite de la formation de cristaux de glace due à la surfusion de l'eau, ces cristaux s'agglomèrent à travers la colonne d'eau jusqu'à ce qu'il forme un bloc de glace d'une plus grande dimension. Ces blocs ayant une densité inférieure et une certaine flottabilité montent vers la surface. Ils continuent de s'agglomérer jusqu'à ce qu'ils forment des floes de glaces.

Le manuel des glaces MANICE du gouvernement du Canada utilise certaines terminologies pour la formation de nouvelle glace (MANICE, 2005). Ces différents types sont présentés dans le tableau ci-dessous prenant l'information du premier chapitre de ce manuel.

Tableau 1: Description de la glace selon le MANICE (2005)

Nom	Description
Frasil	Fines aiguilles ou plaquettes de glace en suspension dans l'eau
Sorbet	Stade de la congélation postérieur au frasil; les cristaux commencent à s'agglutiner pour former en surface une couche épaisse comme de la soupe. À ce stade, la mer réfléchit peu la lumière et prend une apparence mate.
Gadoue	Neige saturée et mélangée d'eau reposant sur la terre ou la glace ou masse visqueuse flottant sur l'eau après une forte chute de neige.
Shuga	Accumulation de morceaux de glace blanche et spongieuse ayant quelques centimètres de longueur; ils sont formés à partir de sorbet ou de gadoue et, quelquefois, de glace de fond remontant à la surface.
Glace en crêpes	Morceaux de glaces plutôt circulaires, ayant de 30 centimètres à 3 mètres de diamètre et jusqu'à 10 centimètres d'épaisseur, avec des bords relevés du fait du frottement des morceaux les uns contre les autres. Ils peuvent se former par houle faible à partir de sorbet, de gadoue ou de shuga ou du fait de la fragmentation de glace vitrée ou de nilas, ou encore à partir de glace grise s'il y a une forte houle ou de grosses vagues. La glace en crêpes se forme aussi parfois en profondeur, à l'interface entre deux masses d'eau ayant des caractéristiques physiques différentes, d'où elle remonte en surface. Elle peut rapidement couvrir de grandes étendues d'eau.

[Manuel des glaces MANICE : chapitre 1 - Canada.ca](#)

Ces floes et autres forment de glaces circulent dans le cours d'eau vers l'aval jusqu'à ce qu'ils soient arrêtés par un couvert de glace complet, une barrière ou une restriction quelconque (Lindenschmidt, 2020).

Une autre possibilité pour ces cristaux est de s'accumuler sur le lit de la rivière, ce qui forme la glace de fond. Cette glace se forme principalement de nuit lorsqu'il y a le plus de perte de

chaleur dans la colonne d'eau. Durant le jour, les radiations solaires peuvent fournir l'énergie nécessaire à l'interface glace et lit afin de détacher les blocs de glace de fond (Lindenschmidt, 2020). Ces blocs flottent vers la surface ou s'attachent à la partie inférieure d'un couvert de glace.

1.1.4 Arrêt de glace et embâcle

Lorsque les floes de frasil transitent dans le cours d'eau vers l'aval, différents phénomènes peuvent réduire leur vitesse drastiquement et occasionner un arrêt de glace. De Munk et coll. (2017) résume ces paramètres comme étant les suivants :

- Réduction de la pente
- Réduction de la largeur du chenal
- Présence de courbes, méandres, îles ou ponts
- Faible profondeur d'eau et hauts-fonds
- Présence d'un couvert de glace complet

Lorsque ces floes de glace s'arrêtent, une forme d'arche avec le sommet vers l'amont est souvent observée. Les floes s'attachent aux couverts de chaque côté du chenal en premier et à ce moment s'accumulent de plus en plus vers le centre du chenal afin de former l'arche.

L'arche de glace observable à la figure suivante est la forme typique que prend un arrêt de glace initialement.



Figure 3: Embâcle bouée S63, lac Saint-Pierre vue de l'aval vers amont; 21 janvier 2019

Un couvert de glace se produit lorsqu'une arche de glace force l'arrêt de l'écoulement des glaces de surface. Le débit de glace (Q_g) vient alors, compléter le couvert de glace en amont de l'arrêt et croit en longueur et épaisseur et peut prendre de l'ampleur jusqu'à devenir un embâcle. Selon la vitesse de l'eau, les propriétés du frasil et le nombre de Froude (nombre sans dimension qui est un rapport des forces d'inertie et de gravité), il arrive que les floes de glace progressent sous le couvert de glace (Hicks, 2016). Cette accumulation augmente l'épaisseur du couvert. Aussi, au fur et à mesure que le couvert s'allonge, les forces peuvent devenir suffisamment grandes pour causer l'effondrement de l'accumulation de glace ("secondary consolidation") et le couvert devient alors bien plus épais.

Ces embâcles ajoutent une nouvelle source de friction qui résiste au passage de l'eau, ce qui a pour conséquence d'augmenter le niveau d'eau en amont et de diminuer la vitesse moyenne de l'écoulement (Lindenschmidt, 2020). D'autres éléments pourraient réduire la vitesse de la glace comme la vitesse du vent. La vitesse du vent peut nettement influencer la vitesse des floes de glace en fonction de sa direction et de son intensité.

Dans le cas du lac Saint-Pierre, l'eau ainsi obstruée, est divergée à l'extérieur du chenal maritime sous les couverts de glaces adjacents (voir figure 3 qui montre une texture de glace très différente dans le chenal maritime (au centre de la figure) comparée à la texture de glace des couverts de glace adjacents au chenal). Cette diversion de l'eau réduit davantage les vitesses de l'eau dans le chenal maritime.

1.1.5 Résumé des processus généraux de formation des embâcles.

Ainsi, certains processus d'intérêt dans le cadre de cette étude se trouvent à l'aide de la figure ci-dessous qui présente les processus de formation de glace. Le refroidissement progressif de la température permet d'atteindre un niveau de surfusion de l'eau. À ce moment, de petits cristaux de frasil se forment et s'agglomèrent afin de former des floes. Ces floes peuvent remonter à la surface et former l'un des divers types de glaces présentés par le Manuel des glaces (frasil, sorbet, gadoue, shuga et glace en crêpes). Ils peuvent aussi atteindre le fond du cours d'eau, croître et former de la glace de fond. Finalement, la glace en transit continuera sa route vers l'aval jusqu'à tant qu'un événement ralentisse son élan. Ce ralentissement peut favoriser l'accumulation de glace de chaque côté du chenal, réduire sa largeur et éventuellement, former un arrêt. Cet arrêt de glace se solidifie dû à l'accumulation de glace et peut former un embâcle qui aura pour effet d'augmenter les niveaux d'eau en amont et de diminuer la vitesse d'écoulement moyen du cours d'eau en ajoutant une nouvelle source de friction.

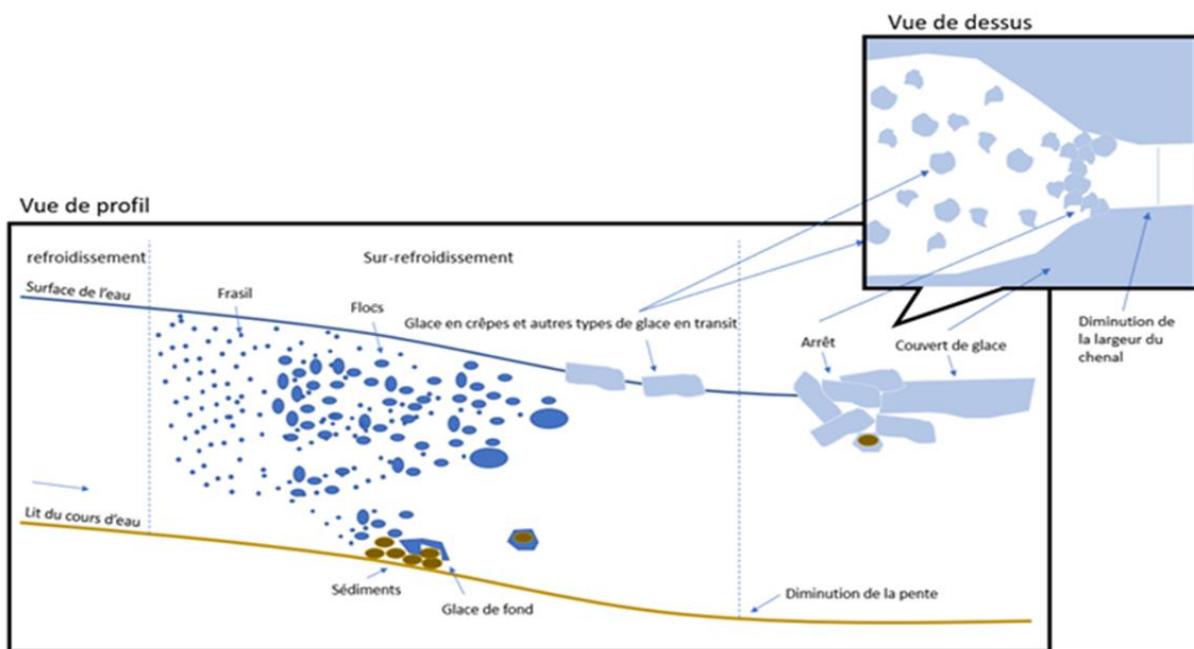


Figure 4: Processus de la glace (inspiré de Hicks, 2016 et de Lindenschmidt, 2020)

1.2 Historique & Mitigation des embâcles de glace sur le Saint-Laurent

1.2.1 Inondations causées par les embâcles de glace

Dans les années 1860, des inondations historiques ont marqué la ville de Montréal. L'une a augmenté le niveau d'eau de 7,25 m au-dessus du niveau usuel en 1861 et l'autre en 1866, a causé le décès de 50 personnes. (Danys, 1978)



Figure 5: Inondation rue Des Commissaires : 1886 / Leclerc. - Reproduction le 13 janvier 1969. Source : Ville de Montréal. Section des archives, Cote CA M001 VM094-Y-1-17-D1709.

Quelques décennies plus tard, le désir de contrôler la formation de barrière de glace a incité le gouvernement canadien à utiliser les brise-glaces *Lady Grey* et *Montcalm* afin de déloger l'embâcle de Cap-Rouge (Danys, 1978). Cependant, ce n'est qu'à la suite d'une inondation particulièrement grande en 1928 à Montréal que des opérations de déglacage de plus grandes envergures furent commencées (Danys, 1978). L'objectif de ces opérations était de permettre l'évacuation de la glace en réalisant un chenal de Trois-Rivières jusqu'à Montréal avant l'arrivée de la crue printanière (Danys, 1978).

1.2.2 Services de déglacement

Ce n'est qu'en 1953 que les opérations de déglacement furent instaurées pour l'ensemble de l'hiver. Cette décision avait un avantage économique pour le commerce maritime et a prouvé être plus efficace pour le contrôle des risques d'inondation liés aux embâcles (Danys, 1978). Depuis les niveaux de services, des opérations de déglacement ont changé. Dorénavant, leurs objectifs comprennent (GCC, 2010):

- Faciliter la circulation sûre et rapide des navires en les aidant à franchir ou à contourner des eaux recouvertes de glace
- Minimiser les risques d'embâcles, et donc d'inondations, sur le fleuve Saint-Laurent
- Aider au réapprovisionnement des collectivités nordiques où il n'y a pas de service commercial.

Ils ont d'ailleurs pour niveau de service d'avoir un délai d'intervention cible de 5 heures pour ce qui est des interventions sur le fleuve Saint-Laurent (GCC, 2010).

En 2018, le gouvernement du Canada a d'ailleurs acheté trois brise-glaces de taille moyenne, soit le *NGCC Captain Molly Kool*, le *NGCC Jean Goodwill* et le *NGCC Vincent Massey*.

Le chenal navigable sur le lac Saint-Pierre a été dragué à l'endroit où la profondeur d'eau était supérieure à l'époque. De ce fait, il y a plusieurs courbes dans ce tronçon, ce qui est un facteur pouvant augmenter les risques d'embâcles.

1.2.3 Structure hydraulique du site de l'étude.

Le lac Saint-Pierre se situe dans la province du Québec au Canada entre les villes de Montréal et Québec. Plus précisément, il s'agit d'un élargissement du fleuve Saint-Laurent entre Sorel et Trois-Rivières (voir figure 6). D'une longueur d'environ 30 km et d'une largeur d'environ 13 km, le lac Saint-Pierre comprend près de 7000 ha de milieux humides (Morin et Côté, 2003).

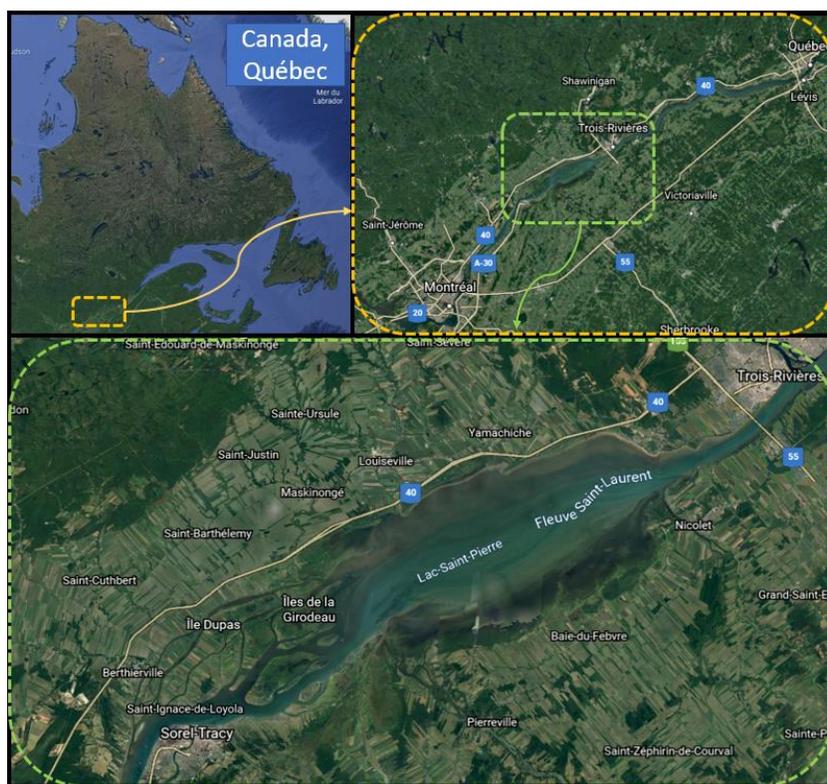


Figure 6: Localisation du site de l'étude (Google Earth, s.d.)

Afin de limiter la production de glace dans le lac Saint-Pierre, l'estacade Yamachiche favorise la formation d'un couvert de glace du côté nord du chenal (voir figure 8). La formation de ce couvert est aussi favorisée par la présence des îlots artificiels. D'autres îlots sont aussi présents du côté sud afin de favoriser la formation du couvert sud. Les îlots jouent aussi un rôle de stabilisation des couverts de glace lors des périodes de redoux et des événements hydrologiques associés.

Les estacades mobiles de Lavaltrie et de Lanoraie ont aussi pour rôle de réduire la production de glace. Pour l'instant, les estacades discutées sont des structures nécessitant une installation à l'automne et ils sont désinstallés au printemps afin de réaliser leur entretien.

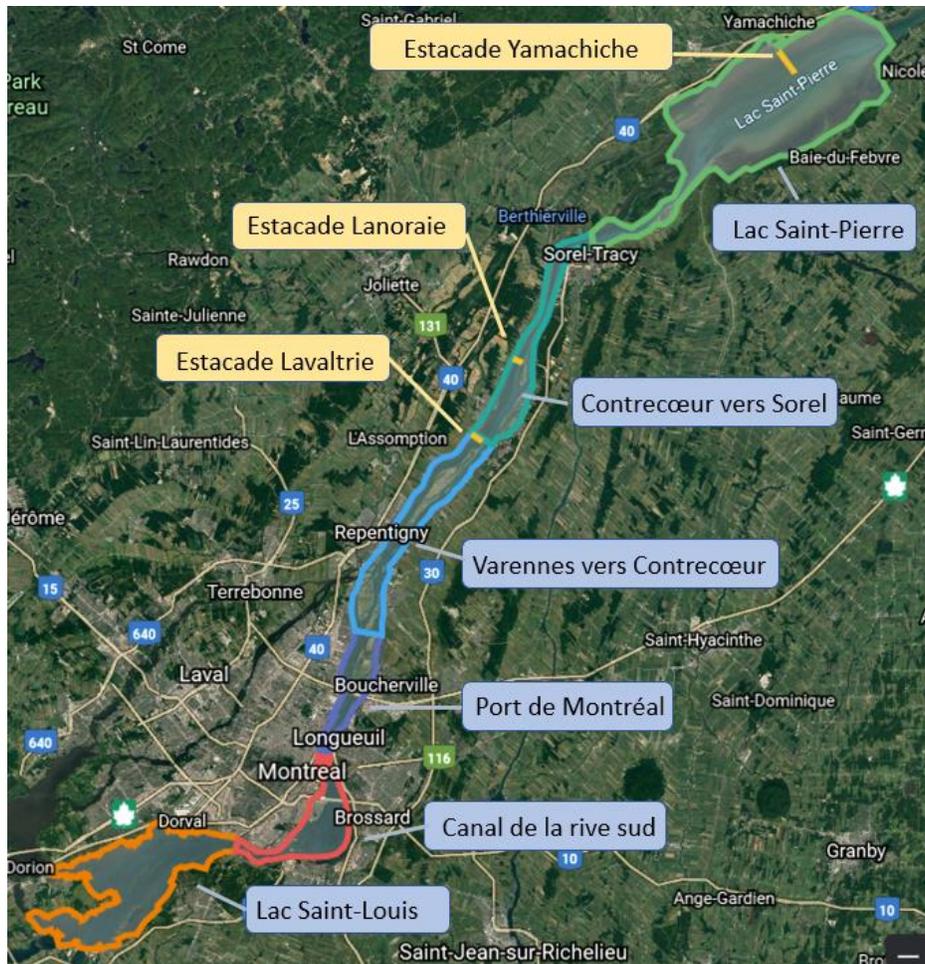


Figure 7: Localisation des estacades et des différents secteurs amont du lac Saint-Pierre (selon les cartes d'observations des glaces de la Garde côtière canadienne) (Google Earth, s.d.)

Notons aussi qu'il y a plusieurs années, des réservoirs (seuils semi-submergés) furent réalisés entre les îles de Sorel ce qui a permis d'augmenter la vitesse du courant dans le chenal de navigation et d'augmenter la capacité d'évacuation de la glace. En effet, les barrages ont diminué la vitesse du courant entre les îles, ce qui a facilité la production d'un couvert de glace. La localisation de ces structures est présentée à la figure suivante.

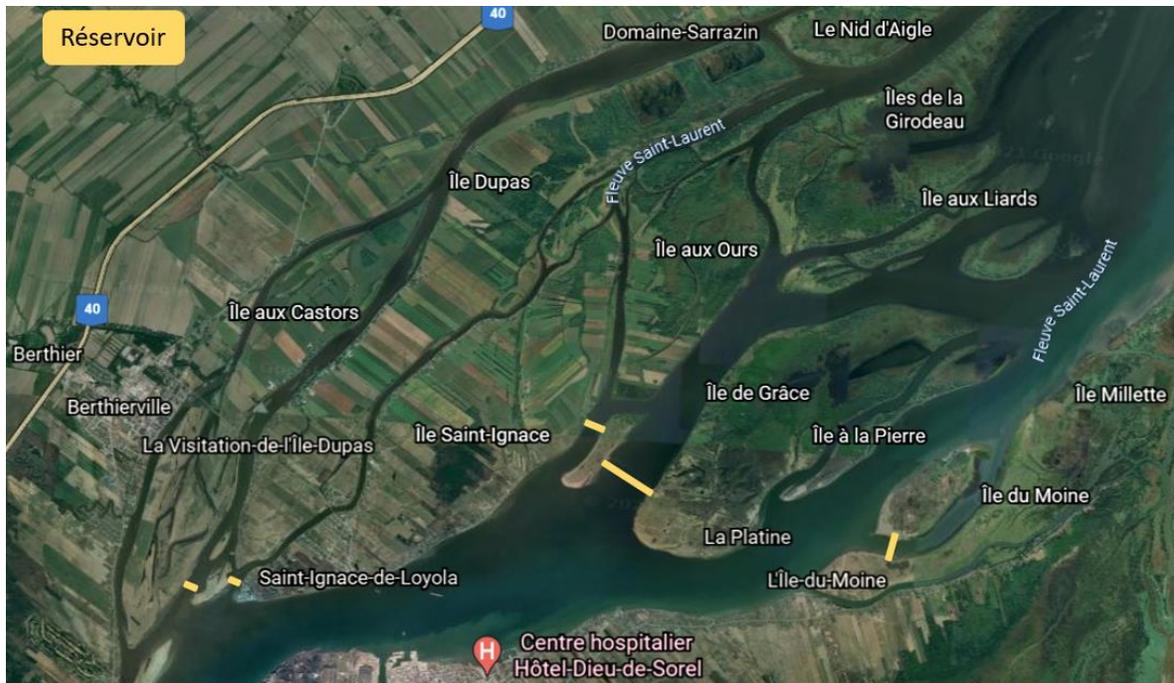


Figure 8: Emplacement des réservoirs entre les Îles de Sorel (Inspiré de Morin et Côté, 2003, fig 6) (Google Earth, s.d.).

L'estacade fixe en amont du pont Champlain est une structure permanente ayant pour fonction de favoriser la formation d'un couvert sur le bassin La Prairie et de retenir ce couvert afin de protéger Montréal et surtout les îles d'Expo 67 (PJCCI s. d.) (EPC 2020).

Pour ce qui est du lac Saint-Louis, de nombreux hauts-fonds se trouvent du côté nord du chenal navigable. La formation du couvert du côté sud est facilitée par la présence de la réserve nationale de faune des Îles de la Paix. Finalement, les barrages de Beauharnois et de Carillon sont les structures les plus en amont des secteurs d'intérêt.

1.2.4 Réseau d'observation des glaces de la Garde côtière canadienne

La Garde côtière canadienne a pour niveau de service de minimiser les risques d'embâcles. Pour parvenir à un tel résultat, différentes interventions sont réalisées par leurs professionnels.

Tout d'abord, les cartes d'observations quotidiennes des glaces sont des cartes regroupant des informations qualitatives sur la présence du couvert de glace et de la glace en transit. Elle

comprend une cote de couleur permettant d'identifier la concentration et l'épaisseur estimée de la glace présente sur le Saint-Laurent. Ces cartes sont souvent réalisées par patrouille aérienne pour différents secteurs (voir figure 7) (MANICE, 2005).

Ensuite, il y a l'utilisation de caméras de surveillance. En effet, lors de la surveillance de la glace, il est possible de visualiser la concentration de glace en transit et de potentiellement percevoir la présence d'un arrêt de glace. Parfois, l'absence de glace sur une caméra à l'aval indique de l'accumulation en amont. Les caméras sont un outil clé afin d'atteindre leur objectif de minimiser les risques d'embâcles.

Les cartes d'analyses des images sont des interprétations visuelles de l'état des glaces conçues à partir d'images satellitaires telles ERS, RADARSAT ou ENVISAT (MANICE, 2005). Comme les cartes d'observations quotidiennes, ces cartes permettent d'identifier la présence d'un couvert de glace ou de glace en transit.

Plus d'informations sur les méthodologies et les différents services sont disponibles dans le manuel des normes d'observation des glaces (MANICE, 2005)

Chapitre 2 : La vulnérabilité du lac Saint-Pierre aux embâcles

Ce chapitre permet d'introduire les neuf concepts importants qui expliquent la vulnérabilité du Lac Saint-Pierre aux embâcles de glace. Il présente comment les différents paramètres morphologiques et hydrométéorologiques interviennent dans le cercle d'intensifications des embâcles et fait une revue des études antérieures réalisées sur la problématique. Finalement, une section sur la réduction des risques présente des méthodes de télédétection et d'application de modèles.



Figure 9: Structure du mémoire - Vulnérabilités

Cette analyse aborde la question des arrêts des embâcles de glace alors, il est important de faire la distinction entre les deux. Pour diverses raisons qui seront présentées ci-dessous la vitesse de la glace qui est normalement en transit essentiellement à la même vitesse que l'eau peut ralentir et éventuellement tomber à zéro. Dans ce cas, le débit de glace (Q_g) tombe à zéro et on dit qu'il y a un "arrêt de glace". Un arrêt de glace n'est pas, en soi, un problème, car il est fort possible que les navires naviguent facilement à travers le site de l'arrêt et qu'il n'y a pas d'inondations associées. Un arrêt temporaire pourrait même passer inaperçu.

Si l'arrêt de glace provoque une accumulation de glace qui devient si importante que les navires ont de la difficulté à passer à travers et/ou que les niveaux d'eau montent suffisamment pour causer des inondations, alors il y a un « embâcle » présent sur le fleuve. Un embâcle se définit comme une accumulation de glace importante qui cause des problèmes pour la navigation hivernale et/ou pour les riverains considérant les inondations.

Typiquement, il y a la séquence suivante pour la formation d'un embâcle : (1) conditions propices à des arrêts de glace; (2) arrêt de la glace qui était en transit; (3) début d'une accumulation locale de glace qui était en transit; (4) formation d'embâcle; (5) intensification de l'embâcle local; (6) problèmes de navigation commerciale; (7) agrandissement vers

l'amont de l'étendue de l'embâcle; (8) impact sur l'industrie maritime; et (9) inondation des riverains.

Cette séquence démontre que la clef pour ne pas avoir d'embâcles est de ne pas avoir d'arrêts de glace. Pour cette raison, ce mémoire présente plusieurs éléments reliés aux arrêts de glace. Ce mémoire met beaucoup d'emphase sur la question des arrêts de glace, car l'hypothèse principale est qu'un embâcle est causé par un arrêt. Ainsi, pour éviter les embâcles, il faut éviter les arrêts de glace.

Ensuite, la séquence démontre que la sévérité de l'embâcle (impacts) dépend de sa durée. Ce mémoire n'aborde pas beaucoup cet aspect parce qu'une fois un embâcle formé, sa durée dépendra de l'efficacité des opérations de déglacage, de la gestion du trafic maritime et des conditions météo. En général, ces aspects n'ont pas été étudiés, car il s'agit ici des éléments de gestion des opérations.

2.1 Les neuf concepts en lien avec les arrêts et les embâcles de glace

Certains tronçons du fleuve Saint-Laurent possèdent des conditions favorables à la formation d'arrêts et d'embâcles. En fait, certains ponts sur le fleuve sont à risques de former des embâcles. Le pont Laviolette à Trois-Rivières et le pont de Québec à Québec en sont des exemples. Mais c'est surtout le bief sur le lac Saint-Pierre entre la « Courbe no 1 » (« Courbe Louiseville ») et le Bassin/Courbe Yamachiche où les arrêts de glace initient les embâcles (Figure 10).

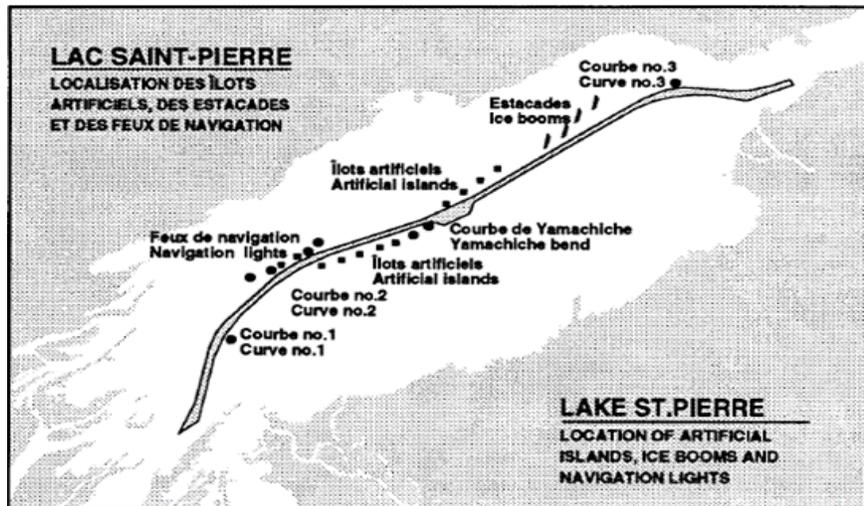


Figure 10: Carte de localisation du chenal maritime, des courbes et des structures (1991) sur le lac Saint-Pierre (Morse, 1993 ; fig. 3).

Dans des conditions difficiles sur le fleuve, sur ce bief problématique, la capacité d'évacuation de la glace (Q_{gc}) devient inférieure au débit de glace en transit (Q_g) à l'entrée du lac. Cette sous-capacité d'évacuation cause la congestion de la glace qui mène à un ralentissement et des arrêts de glace. Si la capacité reste réduite un certain temps, les arrêts se transforment en accumulations qui se développent ensuite en embâcles (Morse, 1993).

Les embâcles nuisent à la navigation maritime dans le chenal du Saint-Laurent et génèrent une augmentation des niveaux d'eau amont. Si les embâcles persistent, les remontées peuvent causer des inondations. Historiquement, il y a eu plusieurs inondations causées par des embâcles. Mises à part des faibles inondations causées par des embâcles en 1993, depuis la gestion efficace des glaces (1970) sur le fleuve Saint-Laurent par la Garde côtière canadienne, les inondations importantes ont cessé. Il est important de rappeler que la problématique des embâcles de l'hiver 2018-2019 a eu un impact négatif sur la navigation hivernale, mais elle n'a pas causé d'inondation.

Cette section énonce les neuf raisons pour lesquelles ce bief problématique du lac Saint-Pierre est vulnérable aux arrêts de glace et les raisons pour lesquelles ils se transforment en embâcles s'ils ne sont pas rapidement contrôlés.

N.B. Le « bief problématique » ou tout simplement le « bief » est défini comme étant le chenal maritime entre la Courbe no 1 (maintenant nommée la Courbe Louiseville) et le bassin

Yamachiche. C'est dans ce bief que les arrêts de glace ont lieu qui se transforment éventuellement en embâcles qui peuvent (si la durée est assez importante) graduellement remonter jusqu'à Sorel et encore plus haut (Montréal).

Selon Morse et Scalabrini (2020), les principaux concepts sont :

1. La grande superficie contributive à la production de glace;
2. La vitesse d'écoulement réduite dans le bief;
3. Les vestiges d'anciens travaux de dragage de capitalisation juste à l'amont du bief;
4. L'élargissement du chenal au bassin Yamachiche qui est situé vers la fin du bief;
5. La fuite du débit sous le couvert de glace de chaque côté du chenal maritime sur le bief ;
6. L'augmentation du niveau d'eau sur le lac;
7. La direction et la vitesse du vent sur le lac;
8. La présence de courbes du chenal maritime sur le bief et
9. La largeur du chenal dans le bief.

2.1.1 La superficie à l'amont du lac Saint-Pierre contributive à la production de glace

L'ensemble de la glace produite sur le fleuve Saint-Laurent se dirige vers l'océan. Dans des conditions normales (sans embâcles), le débit de la glace de surface (Q_g) (mélange de frasil, nilas, etc.) qui est à la dérive sur le fleuve augmente de plus en plus vers l'est, en s'éloignant de Montréal. Ceci est dû au fait que la glace a de plus en plus de temps et d'espace pour se former lors des températures froides. Le débit de glace en transit produit à un secteur donné peut être estimé par la formule suivante :

$$Q_g \approx K_g T_a S_e (1 - f C) \quad (1)$$

Où K_g est un coefficient de transfert de chaleur en volume de glace ($\approx 0.059 \text{ m}^3/\text{°C km}^2$); S_e est la surface du fleuve non couverte de « glace de rive » en amont du secteur d'intérêt (dans

notre cas, le Lac) en km^2 ; C est la concentration de la glace de surface en mouvement (-); f est un coefficient d'efficacité (≈ 0.8) pour tenir compte du transfert de chaleur à travers les floes en circulation; et T_a est la température de l'air pondérée sur les quatre jours précédents (pondération de 0.30, 0.30, 0.25, 0.10, 0.05 aux températures $T, T_{-1}, T_{-2}, T_{-3}, T_{-4}$; soit la température actuelle et ensuite les moyennes journalières des températures des dernières 24h, 24h-48h, 48h-72h et 72h-96h; (Morse et coll. 2003).

Le débit de glace actuellement en circulation à un certain endroit est:

$$Q_{gt} \approx t_g B_g V_g \quad (2)$$

Où t_g est l'épaisseur moyenne des floes de glace en en circulation, B_g est la largeur du chenal d'écoulement de la glace et V_g est la vitesse de l'écoulement de la glace. La valeur B_g est essentiellement la largeur disponible entre la glace de rive présente de chaque côté du chenal maritime.

La marée, présente à partir de Trois-Rivières et en aval, améliore la capacité de transport de glace à partir de cet endroit. Le lac Saint-Pierre (situé en amont de Trois-Rivières) est le dernier secteur n'étant pas significativement influencé (à peine 5 à 10 cm) par cette dynamique externe. De ce fait, la capacité de transport de glace (Q_{gc}) est limitée en amont de Trois-Rivières et, dans des conditions difficiles, elle est inférieure à la glace en transit et la glace arrête par congestion :

$$\text{Si } Q_g > Q_{gc}, V_g \downarrow Q_{gc} \downarrow \text{risque } \uparrow \quad (3)$$

Quand le débit de glace (Q_g) est supérieur au débit d'évacuation de la glace (Q_{gc}), il y a un risque de formation d'embâcles (Beltaos, 1995). La vitesse de la glace diminue à zéro. Le débit d'évacuation tombe à zéro, cause un arrêt et une accumulation de glace initie un embâcle.

2.1.2 La vitesse d'écoulement réduite

Lorsqu'il n'y a pas de congestion de glace, la vitesse de la glace est proportionnelle à la vitesse de surface de l'eau (V_s) qui est proportionnelle à la vitesse moyenne de l'eau (V) :

$$\text{Si } C < 0.9; \quad V_g \propto V_s \propto V \quad (4)$$

où

$$V = Q / A \quad (5)$$

et Q est le débit d'eau dans le fleuve, A est l'aire de la section d'écoulement.

Considérant un débit constant et les superficies des sections d'écoulement (A) du lac Saint-Pierre très grandes, il y a réduction de la vitesse selon l'équation 5. Alors sur le lac, le transport de glace (Q_g) et la capacité de transport de glace (Q_{gc}) sont réduits puisqu'ils sont influencés par la vitesse de l'écoulement.

2.1.3 Vestiges d'anciens travaux de dragage de capitalisation

Morin et Côté (2003) ont étudié les modifications anthropiques réalisées sur le lac Saint-Pierre. Parmi ces modifications se trouvent les travaux de dragage de capitalisation du chenal de navigation (approfondissement et/ou élargissement) dans le secteur en amont de la Courbe no 1.

Les travaux de dragage de capitalisation effectués ont eu pour impact de diriger une partie du débit à l'extérieur du chenal de navigation en amont de la Courbe no 1. Du même fait, le débit résiduel dans le chenal est moindre. Comme observé à l'aide de l'équation 5, une diminution du débit implique une diminution de la vitesse pour une même section et alors selon l'équation 4, V_g est réduite et selon l'équation 2, Q_{gt} et Q sont réduits. Ainsi, une augmentation des risques d'arrêts et d'embâcles est observée en amont de la Courbe no 1.

2.1.4 Élargissement du chenal au bassin Yamachiche

Selon l'équation 5, une augmentation de la section d'écoulement (A) aura pour impact de réduire la vitesse d'écoulement. À l'approche du bassin Yamachiche, l'aire du chenal devient de plus en plus large. Alors, l'eau transitant dans le chenal perd de la vitesse. La diminution de la vitesse (V) implique une diminution V_g et ainsi Q_{gt} et Q_{gc} sont réduits provoquant une augmentation du risque d'arrêts et d'embâcles de glace.

2.1.5 La fuite du débit sous le couvert de glace de chaque côté du chenal maritime

Contrairement à une situation sur une rivière typique où l'eau passerait simplement en dessous de la congestion de glace, lorsque la concentration (C) de glace de surface en transit devient élevée sur le bief et la vitesse de surface (V_g) est réduite, l'eau du fleuve s'échappe en dessous du couvert de chaque côté du chenal maritime. Lorsque le débit fuit le chenal, la vitesse de glace dans le chenal est ralentie davantage. La diminution de la vitesse (V) implique une diminution V_g et ainsi Q_g est réduit qui cause une réduction dans Q_{gc} et ainsi une augmentation des risques des arrêts et la formation des embâcles.

2.1.6 Augmentation du niveau d'eau

Lorsqu'il y a un embâcle sur le lac, les niveaux d'eau du lac augmentent ouvrant encore plus d'espace pour l'eau de fuir vers les grandes étendues de chaque côté du bief. La diminution de la vitesse (V) implique une diminution V_g et ainsi Q_g est réduit ce qui cause une réduction dans Q_{gc} et ainsi une augmentation des risques d'arrêt et la formation des embâcles.

2.1.7 La direction et la vitesse du vent

À faible concentration, la vitesse de la glace (V_g) est normalement égale à la vitesse de surface de l'eau ($V_g \approx V_s$). Mais lorsque le vent souffle (V_W), il exerce une force sur la glace en transit. Si la direction du vent (D_W) est dans la même direction du courant ($D_W \approx D_V$), la vitesse de la glace augmente et conséquemment, le transport de glace (Q_g) et la capacité de transport de la glace (Q_{gc}) augmentent. Si la direction du vent est dans le sens contraire ($D_W \approx -D_V$), V_g est réduite souvent significativement, ce qui implique que la capacité de transport de la glace (Q_{gc}) chute pareillement.

Sur le lac, cet effet est particulièrement intense puisque le chenal à cet endroit est orienté dans une direction nord-est et les vents proviennent souvent de cette direction. C'est lors de ces conditions que le lac est très vulnérable aux arrêts de glace et à la formation d'embâcles. De plus, le vent sur les surfaces d'eau peut facilement être 10% plus fort que sur terre (Smith, 1995), car il n'y a pas d'obstructions (arbres, maisons, etc.) sur le lac.

2.1.8 La présence de courbes du chenal maritime sur le bief

Les courbures « no 1 et no 2 » du chenal navigable forcent la glace qui dérive à changer de direction en augmentant la force normale appliquée sur la glace. La force normale appliquée (F_N) augmente la force de friction tangente (F_f) et freine ainsi l'avancement de la glace. Ce ralentissement réduit la capacité de transport de glace (Q_{gc}), augmentant ainsi les risques d'arrêts et d'embâcles. L'équation (6) indique la séquence logique du phénomène :

$$F_N \uparrow F_f \uparrow V_g \downarrow Q_{gt} \downarrow Q_{gc} \downarrow \quad (6)$$

2.1.9 La largeur effective du chenal sur le bief problématique

La capacité de transport de la glace est proportionnelle à la largeur disponible pour le transport de glace ($Q_{gc} \sim B_g^a$), où B_g est la largeur entre les deux couverts de glace présents de chaque côté du chenal maritime et où « a » est un exposant ayant une valeur d'environ 1.346. Si les couverts sont bien retenus par les îlots artificiels, la largeur effective pour le transport de la glace (B_g) correspondant généralement à la largeur entretenue du chenal ($B_g \approx B_e$). Cependant, en conditions de glace difficiles, en absence d'intervention et avec une réglementation de vitesse du trafic maritime restreignant la vitesse des navires en transit, la largeur effective du chenal entre les couverts de glace (B_g) peut facilement devenir plus étroite. Alors, selon l'équation 2, le débit de glace diminuera (équation 7):

$$\text{Réduction de vitesse de navires} \downarrow B_g \downarrow Q_g \downarrow \quad (7)$$

Et, comme il sera vu dans la prochaine section, la capacité de transport diminue plus drastiquement, causant ainsi une vulnérabilité aux arrêts et embâcles (équation 8):

$$B_g \downarrow Q_{gc} \downarrow \downarrow \quad (8)$$

2.2 Boucle d'événements transformant les arrêts de glace en embâcles

Les 9 éléments spécifiques au lac Saint-Pierre peuvent favoriser la formation d'arrêts et d'embâcles. Leurs interactions sont visualisées à l'aide de la figure 11 qui démontre qu'un arrêt tombe rapidement dans un cercle d'intensification des embâcles qui initie et intensifie leurs formations :

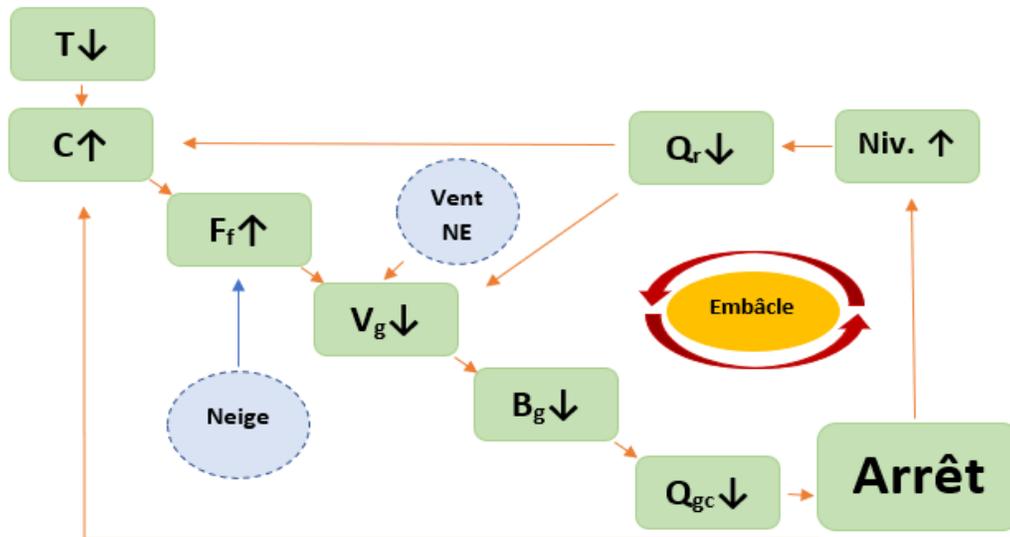


Figure 11: Boucle d'événement démontrant le cercle d'intensification des embâcles : début d'un arrêt de glace qui se transforme en embâcle.

Le cercle d'intensification des embâcles peut se décrire comme suit :

- Période de froid augmente la production de glace en amont du lac et du même fait, le débit de glace (Q_g).
- Ce débit de glace augmente la concentration de glace (C) qui augmente la friction (F_f).
- Cette friction réduit la vitesse de la glace (V_g), qui réduit éventuellement la largeur effective du chenal (B_g).
- Ces phénomènes diminuent la capacité de transport de glace (Q_{gc}) pour finalement provoquer un arrêt.
- En plus d'augmenter la concentration en glace, l'arrêt augmente le niveau d'eau (N) qui diminue le débit d'eau dans le chenal (Q_c) et augmente l'aire du chenal (A_c)
- Ainsi, diminue la vitesse dans le chenal (V) ce qui se traduit en une diminution de la vitesse de la glace (V_g) et provoque l'accumulation de la glace.
- Devient un embâcle qui s'intensifie.
- Pendant tous ces problèmes, un vent NE réduit drastiquement V_g et la boucle d'événement devient plus intense.
- Avec un ajout de neige, il y a augmentation de la masse de glace à transporter et l'ajout de coefficient de friction qui rend les conditions encore plus difficiles.

La neige ainsi que les 9 éléments spécifiques au bief problématique du lac Saint-Pierre rendent le bief problématique de la Courbe no 1 au bassin Yamachiche très vulnérable à l'initiation d'embâcles.

2.3 Études antérieures

Afin d'identifier les paramètres les plus significatifs à la formation d'arrêts et d'embâcles sur le lac Saint-Pierre, la revue des études antérieures se concentre sur les publications suivantes :

- Morse (1993) présente une compréhension de l'embâcle 1993 et des recommandations;
- Morin et coll. (2000) présentent une équation de capacité de transport de glace basée sur des simulations numériques.
- Morse et coll. (2003a) présentent les caractéristiques de la glace observées sur le bief problématique;
- Morse et coll. (2003b) présentent un modèle réseau neuronal artificiel (ANN) qui simule les conditions de glace observées sur le bief problématique.
- Turcotte et coll. (2012) émettent trois hypothèses par rapport à l'influence de la neige sur un cours d'eau
- Ackerman et Shen (1983) pour l'évaluation de la capacité de transport selon des simulations en laboratoire.

Morse, 1993 :

L'étude de Morse (1993) sur les embâcles de 1993 sur le Saint-Laurent souligne la nécessité d'avoir des estacades à Lanoraie et Lavaltrie pour former des couverts de glace le plus rapidement possible et ainsi réduire la surface d'eau libre (S_e) et limiter le débit de glace (Q_g) qui entre sur le lac.

Elle soutient que l'estacade Yamachiche est essentielle pour augmenter les vitesses d'écoulement (V) dans le bief problématique du lac Saint-Pierre ainsi que pour limiter

l'incursion de grandes plaques de glace dans le chenal qui risqueraient de faire de l'obstruction au libre écoulement des glaces en aval de Yamachiche.

Morse et coll. 2003a :

Morse et coll. (2003b) démontrent qu'il y a deux éléments significatifs qui déterminent les arrêts de glace. Le premier est la température de l'air actuelle et celle des 4 jours antécédents (T_a) ainsi que la vitesse du vent (V_w) et sa direction (D_w). Le modèle neuronal (ANN) développé par Morse et coll. n'avait que ces deux intrants, mais il a réussi à modéliser sur le bief problématique, les épaisseurs moyennes de glace de surface (t_g), leurs concentrations (C), leurs vitesses (V_g) et les débits unitaires de transport de glace ($q_g = Q_g/B_g$). La démonstration s'est réalisée sur deux hivers (2000-2001 et 2001-2002) et les résultats ont démontré que les simulations concordaient avec les observations.

Cette étude a mis en évidence les intrants importants suivants :

- Les températures sont principalement responsables de la création de la glace qui doit être évacuée et
- La vitesse du vent et sa direction sont principalement responsables du débit de glace transporté.

Malgré cette démonstration de la prédominance de l'importance de la température de l'air et du vent sur le transport de glace sur le lac, le modèle demeure empirique et ne peut qu'interpoler puisque le modèle est constitué d'un réseau de neurones artificiels. De plus, le modèle n'est pas nécessairement valable, sauf pour les conditions pour lesquelles il a été développé et validé.

Plus spécifiquement, il n'y avait pas d'embâcles durant la période simulée. Alors pour en apprendre davantage sur ce sujet spécifique, il faut chercher d'autres éléments dans la littérature scientifique.

Premièrement, quelques observations historiques semblent indiquer que les arrêts de glace peuvent aussi être influencés par les précipitations de neige. Il faudrait une analyse quantitative pour valider cette hypothèse, mais, théoriquement, il est possible de noter que

les précipitations peuvent augmenter la cohésion entre les floes, ce qui augmente implicitement la force de friction tangente (F_f):

$$F_f = \text{Force cohésive} + F_N \tan(\theta) \quad (9)$$

où θ est l'angle de friction entre les morceaux de glace à dérive.

Turcotte et coll. 2012 :

En effet, Turcotte et coll. (2012) émettent trois hypothèses par rapport à l'influence de la neige sur un cours d'eau. Tout d'abord, la chaleur absorbée par la fonte de la neige dans l'eau réduit radicalement la température de l'eau (Prowse, 1995). Ensuite, l'accumulation de gadoue (MANICE, 2005) à la suite d'une forte précipitation de neige peut s'accumuler sur les côtés du chenal lorsque la vitesse est moindre. Finalement, considérant qu'un mélange eau-glace permet une meilleure migration verticale du froid par rapport à l'eau, l'hypothèse est que c'est aussi le cas pour un mélange eau-neige. De ce fait, un mélange de gadoue gèlera plus rapidement que la production de glace par échange thermique (Turcotte et coll. 2012).

Morin et coll. 2000 :

Par ailleurs, la modélisation réalisée par le Centre national de recherche du Canada a explicitement évalué la capacité de transport de la glace (Q_{gc}). Leurs simulations numériques démontrent que la capacité de transport (Q_{gc}) est moins importante dans une courbe douce et encore beaucoup moins importante dans une courbe aiguë (Morin et coll. 2000; figure 6).

Ensuite, l'équation suivante résume les résultats des simulations décrivant la capacité maximale du débit de glace (Q_{gc} ; m^3/s) pour un chenal rectiligne :

$$Q_{gc} = B_g * t_g (-123.335 + 0.52306B_g + 145.0389V - 16.7897C + 17.224t_g + 0.8124r + 2.481 \vec{V}_w) \quad (10)$$

Où \vec{V}_w est la composante de la vitesse du vent dans la direction de l'écoulement et r est la valeur médiane des rayons des morceaux de glace. Selon cette équation, une augmentation des rayons se traduit par une augmentation de la capacité du transport. Cependant, puisque

l'équation (13) d'Ackerman et Shen indique le contraire (voir ci-dessous), Morse et Scalabrini (2020) croient que ce paramètre (r) est plutôt un élément artificiel dans le modèle numérique et pas réellement une incidence sur la capacité du transport de glace.

L'équation (10) indique la dépendance principale de la capacité de transport sur la largeur efficace (B_g) et l'épaisseur de glace (t_g) ainsi que la vitesse de l'eau (V). Ce résultat est logique et cohérent avec les autres formulations. En examinant l'équation (10), voici les constats significatifs:

- L'augmentation de la concentration de la glace diminue la capacité de transport. À faible concentration ($C < 0.9$), c'est le contraire, car la glace a suffisamment d'espace pour s'écouler. Cependant, l'équation (10) est développée pour des conditions de congestion : lorsque le chenal devient de plus en plus congestionné, la friction augmente et la vitesse de glace et la capacité de transport diminuent.
- Il y a dépendance non linéaire de Q_{gc} sur la largeur effective du chenal (B_g). Cette non-linéarité sera explorée plus en profondeur plus loin dans le document.
- Le vecteur vent (\vec{V}_W) peut influencer la valeur maximale du débit Q_{gc} (bien que son coefficient varie entre les équations 10, 11 et 12)). Voici la dépendance observée pour deux études réalisées en 2003 :

- Pour la période observée par Morse et coll. (2003a), la vitesse de la glace (m/s) est

$$V_g = 0.87 + 0.039 \vec{V}_W \quad (11)$$

Alors, pour un vent NE 20 km/h (5.55 m/s), la vitesse de la glace serait réduite de 0.2 m/s et même beaucoup plus, car cette réduction n'est qu'une moyenne (Morse et coll. 2003a; fig. 6).

- Par ailleurs (Morse et coll. 2003b), la vitesse de la glace observée est donnée par

$$V_g = 0.75 + 0.14 \vec{V}_W \quad (12)$$

ce qui démontre une dépendance encore beaucoup plus forte de la capacité de transport sur le vent. Selon cette équation, V_g serait nulle lorsque le vent souffle à une vitesse de 19 km/h (5.3 m/s) dans une direction directement à l'opposé de l'écoulement de la glace (soit un vent du NE).

Ackermann et Shen (1983) :

Les simulations en laboratoire par Ackerman et Shen (voir Morin et coll., 2000) sont informatives. Selon ses résultats, la capacité de transport maximal s'obtient avec l'équation suivante :

$$Q_{gc} = K_1 t_g^{0.181} V^{0.815} B_g^{1.346} (2r)^{-0.516} \quad (13)$$

où $K_1 = 0.104 g^{0.337} S^{0.093} n^{0.489}$ g étant la force gravitationnelle, S la pente longitudinale de l'eau et n le coefficient de rugosité de Manning. Sachant que la vitesse de l'eau est proportionnelle à la pente de l'eau ($V \propto S^{0.5}$) et, en présumant que r est un intrant aléatoire qui ne change pas beaucoup d'un hiver à un autre, l'équation d'Ackerman et Shen peut s'écrire ainsi :

$$Q_{gc} = K_2 t_g^{0.181} V B_g^{1.346} \quad (14)$$

Cette équation confirme le rôle important de la largeur effective du chenal, soit l'ouverture entre les couverts de glace (B_g). Si le trafic commercial et/ou les interventions de brise-glace réussissent à garder ouverte la largeur de surface à 240 m (valeur nominale de la largeur draguée) au lieu de 200 (20%), le gain en capacité devient 28%, ce qui est une augmentation très importante. Si, avec les vagues des navires commerciaux et/ou brise-glace, la largeur B_g peut être élargie encore plus à, disons, 300 m (élargissement entre les couverts de glace au-delà de la largeur de la base officielle du chenal), la capacité de transport de glace augmenterait de 73%. Ce gain est majeur pour la prévention des arrêts de glace et la formation d'embâcles.

Selon Ackermann et Shen (1983), la capacité de transport maximale de glace augmente significativement lorsque le diamètre des floes de glace diminue. Cependant, l'équation (10) de Morin semble indiquer le contraire et alors ce paramètre pourrait seulement être un résultat artificiel d'un test en maquette.

La revue des études antérieures démontre que les arrêts et les embâcles de glace dépendent principalement de :

1. la température et le vecteur vent (intensité et direction) et possiblement les précipitations de neige (tous ces paramètres sont non contrôlables);
2. la couverture de la glace à l'amont du lac et sur le lac (partiellement contrôlables par les estacades);
3. l'épaisseur de la glace (possiblement partiellement contrôlables par les interventions de brise-glace et de la gestion des vitesses des navires marchands) et
4. la largeur effective du chenal sur le bief problématique (contrôlables par la gestion du trafic maritime et les interventions de brise-glace).

2.4 Réduire les risques

Afin de réduire les risques d'embâcles, il est primordial de bien comprendre les paramètres hydrométéorologiques et morphologiques qui favorisent leurs formations. Pour ce faire, il est important d'avoir une base de données centralisées comportant des données sur les glaces (Kovachis et al. 2018). Ces données pourront ensuite être utilisées afin de réaliser des modèles de prédictions et des outils d'évaluation des risques pertinents. Ainsi, la réduction des risques considère deux aspects, soit la réalisation d'une base de données et de la production et amélioration de modèles. Afin d'obtenir ces données, il est important de considérer les différents outils de télédétection disponibles.

2.4.1 Télédétection

Plusieurs études ont déjà prouvé l'efficacité des satellites afin d'étudier les conditions de glace (Lindenschmidt et coll., 2010 & Murfitt et coll., 2018).

Prenons pour exemple une étude qui a démontré le potentiel de RADARSAT-2 imagerie afin de communiquer des informations sur la débâcle de la glace sur un lac. À l'aide d'instrumentation sur le terrain et de données météorologiques, le processus de décision est alors plus outillé (Geldsetzer et coll., 2010). Les satellites sont aussi utilisés afin d'évaluer la

détérioration de la nappe glaciaire du Groenland depuis plus de quarante ans (Cooper et Smith, 2019). Plusieurs satellites différents peuvent être utilisés afin d'évaluer les processus de la glace. Par exemple, la série de satellites Sentinel-3 a été utilisée lors d'une autre étude sur la nappe glaciaire du Groenland afin de produire une cartographie quantitative des variations d'albédo et de surface de glace (Wehrlé et coll. 2021)

Une étude réalisée par Tom et coll. (2020) a démontré un système de surveillance fiable de glace de lac basé sur les imageries satellites Sentinel-1 SAR. Ce système utilise l'apprentissage profond et a le potentiel de récupérer des séries temporelles sur de nombreuses années en fonction de la continuité de la mission du satellite (Tom et coll. 2020)

Pour ce qui est de la quantification de ces processus, Altena et Kääh (2021) estiment les vitesses de la glace en transit du printemps 2016 sur un tronçon de plus de 700 km de la rivière Lena en Russie. Elle démontre la faisabilité d'un système de surveillance en combinant les données de plusieurs satellites à moyenne et grande résolution comme Sentinel-2 et PROBA-V (Altena et Kääh, 2021).

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) a implémenté le produit WCPS-GLS (Water Cycle Prediction System, Great Lakes and St. Lawrence River watershed) afin de répondre à différents besoins comme les prévisions de crues et la gestion des barrages avec les prédictions de débit (Durnford et coll. 2017). Ce produit permet aussi de produire des prédictions de couvert de glace sur les lacs et de combler les lacunes de couverture des satellites (Durnford et coll. 2017).

La combinaison des données disponibles par satellite et d'un modèle numérique permet d'obtenir un outil utile afin d'étudier les embâcles de glace. Zhang et coll. (2017) ont réussi à caractériser des embâcles de glace dans la rivière des Esclaves à l'aide de cette combinaison.

L'équipe du Laboratoire de télédétection environnementale et nordique (TENOR) a réalisé le projet DAVE (Dispositif d'alertes et de vigilance aux embâcles de glace). Afin d'avoir une vision d'ensemble de la problématique, le projet se base sur les trois aspects suivants (Plante Lévesque et coll. 2017):

1. Prédiposition du chenal à la formation d'embâcle de glace
2. Patrons hydrométéorologiques associés à la débâcle
3. État du couvert de glace

C'est ce troisième aspect qui utilise notamment la télédétection par images satellites.

Notons que dans l'étude actuelle, il est aussi important de considérer la présence de la voie maritime du Saint-Laurent et les services de déglacement.

Certains processus environnementaux nécessitent de grandes résolutions spatiales et temporelles. C'est le cas des embâcles et des processus de la glace. La télédétection par satellite ne permet pas toujours d'obtenir des images au moment opportun. L'utilisation des drones permet d'obtenir ces images utiles de façon sécuritaire et peu dispendieuse (Klemas, 2013). D'un point de vue technologique, les drones sont assez matures afin de réaliser un outil opérationnel de première génération (Colomina et coll. 2014).

Cette méthode de télédétection a suscité de l'intérêt dans plusieurs domaines comme la livraison de marchandise, la construction, les relevés terrains et les activités de recherche et sauvetage (Hayat et coll., 2016). Cette dernière catégorie montre le potentiel de cet outil considérant l'aspect urgent associé aux interventions de déglacement réalisés lors d'arrêts et d'embâcles de glace.

Une étude réalisée sur la rivière Dauphin au Manitoba utilise les drones afin d'évaluer les coefficients de rugosité de la glace (Ehrman et coll. 2019). Cette méthode a été utilisée afin de déterminer la topographie du couvert de glace pour ensuite déterminer les coefficients de rugosité. Ceci prouve le potentiel de cet outil pour le suivi des processus de la glace.

2.4.2 Modèles

La prédiction des embâcles de glaces est une problématique qui a été fortement étudiée. En fait, une revue des avancées dans le domaine des inondations reliées aux embâcles de glaces jusqu'en 2017 stipule que près de 67 articles discutent de l'application de modèles et près de 24 articles discutent des progrès dans la réduction du risque (Robaya et coll. 2018).

Selon Rokaya et coll. (2018), la prédiction d'embâcle est une partie majeure dans les avancées d'application de modèles. Les modèles de prédiction des embâcles et débâcles sont souvent spécifiques au site auquel l'événement se produit. Considérant cette grande variabilité, la complexité des modèles varie énormément passant de modèles empiriques à des modèles statistiques utilisant l'intelligence artificielle.

Différents types de modèles ont été utilisés afin de prédire des événements d'embâcle comme la régression logistique (White, 1996), Régression (Na Dong, 2011 (progression du couvert de glace), logique floue « Fuzzy Logic » (Mahabir et al. 2008), réseaux de neurones artificiels « ANN » (Massie et al. 2002; Wang et al. 2010; Zhao et al. 2012) et autres (Mahabir et al. 2006, 2007).

Les modèles empiriques sont basés sur les observations de phénomènes physiques. Ils comprennent les modèles seuils et quelques analyses probabilistes et statistiques. Certains modèles seuils se basent sur un paramètre. Par exemple, Beltaos (2003) utilise un seul paramètre afin de déterminer la présence d'une débâcle mécanique ou thermique. Cependant, la dynamique des glaces et les embâcles dépendent de plusieurs variables hydrométéorologiques et morphologiques. De ce fait, d'autres études utilisent plusieurs paramètres afin de faire leurs prédictions (Tuthill et coll. 1996, White and Daly, 2002). Une étude de prédiction des embâcles printaniers a été réalisé sur la rivière Rouge au Manitoba. Le modèle de prévision des embâcles utilise les paramètres météorologiques et hydrométriques suivants (Becket et coll. 2021) :

- Degrés-jours de dégel cumulés;
- Degrés-jours de gel cumulés;
- Niveau d'eau à l'englacement;
- Hauteur de neige au sol et équivalent en eau et
- Débit printanier.

La particularité de ce modèle est qu'il s'agit de seuils. Lorsque ces paramètres sont supérieurs (ou inférieurs dans le cas des degrés-jours de dégel cumulés) aux certaines valeurs limites, il y a formation d'embâcle (Becket et coll. 2021). La force de ce modèle est dans son accessibilité et qu'elle permet de guider rapidement les décisions.

White (2003) constate que la performance d'un modèle seuil est fortement influencée par le site de l'étude. En effet, ce modèle ne pourrait pas directement être réutilisé sur un autre site. Le modèle présenté par Becket et coll. (2021) est un bon exemple. Il faudrait d'abord regrouper les paramètres pertinents et redéterminer les valeurs limites spécifiques pour le nouveau site afin que celui-ci soit performant.

Ces inconvénients font en sorte que d'autres types de modèles ont été développés. Les modèles statistiques pourraient pallier les inconvénients des modèles seuils (White, 1996) Lorsqu'il est demandé d'évaluer la présence ou l'absence d'événement, la méthode statistique utilisée peut être la régression logistique. Par exemple, une étude réalisée sur la rivière Platte au Nebraska. L'objectif était de prédire la présence ou l'absence d'embâcle de glace causé par le bris du couvert de glace. Pour ce faire, deux paramètres ont été utilisés comme indicateurs soit, les débits et les degrés-jours de gel cumulés (White, 1996). Le fait que les valeurs moyennes de ces paramètres ne sont pas statistiquement différentes montre la complexité de réaliser des prédictions adéquates (White, 1996). Considérant cet aspect, l'objectif d'obtenir un résultat binaire peut limiter l'adaptabilité du modèle et son côté opérationnel.

Les modèles de régressions linéaires ont aussi été utilisés afin de prédire certains processus de glace. Ces fonctions sont adéquates lorsque le processus peut être représenté par une fonction linéaire. Dans le site de l'étude, Na Dong (2011) a étudié la progression du couvert de glace sur le territoire d'intérêt, soit de Montréal à Trois-Rivières. Ces modèles utilisaient les degrés-jours de gel cumulés et les degrés-jours de dégel cumulés.

Certaines méthodes utilisant l'intelligence artificielle ont été développées à la suite d'avancées technologiques dans le domaine. Contrairement à la dépendance de la linéarité des fonctions de régressions linéaires, ces méthodes peuvent établir des relations non linéaires avec l'ensemble des paramètres, ce qui permet de mieux interpréter la complexité des processus de la glace.

Comparativement aux fonctions de régressions logistiques qui permettent d'obtenir des résultats binaires (0 et 1), la méthode logique floue permet l'intégration de données entre 0 et 1. Mahabir et coll. (2008) suggèrent que cette méthode est un outil prometteur pour la prédiction des inondations causées par les embâcles de glace. Le modèle avait identifié 7 années sur 22 qui avait le potentiel d'avoir des niveaux d'eau élevés et ceux-ci ont été observés pour 4 de ces 7 années (Mahabir et coll., 2008).

Les réseaux de neurones (ANN) sont représentés par des couches comportant différents nœuds. Ces réseaux permettent d'obtenir des relations non linéaires entre les paramètres. Cet aspect rend les modèles ANN souvent plus performant que les modèles statistiques. Par exemple, Massie et coll. (2002) ont montré des performances plus intéressantes pour un modèle de prédiction à Oil City en Pennsylvanie. Les erreurs de faux positif et de faux négatif étaient de 5,9% et 7,4% (Massie et coll. 2002). L'inconvénient principal de cette méthode est qu'il n'est pas possible de connaître les relations entre les différents paramètres.

D'autres études ont utilisé les réseaux de neurones afin de prédire certains processus de la glace. Par exemple, Wang et coll. (2010) ont déterminé des niveaux d'eaux et des épaisseurs de glace de la rivière Jaune en Chine.

Un autre inconvénient de cette méthode est la grande quantité de données fiables nécessaire. Une étude réalisée par Zhao et coll. (2012) à la ville d'Hay River dans le Territoire du Nord-Ouest au Canada explique que deux causes potentielles peuvent expliquer les faibles performances de prédiction de leur modèle, soit le faible nombre de données de calibration et la possibilité d'erreurs dans la base de données.

Chapitre 3 : Embâcles de l’hiver 2018-2019

L’objectif de ce chapitre est d’expliquer les caractéristiques spécifiques aux embâcles de l’hiver 2018-2019. Les phénomènes météorologiques, hydrologiques et hydrauliques sont davantage discutés dans cette section.



Figure 12: Structure du mémoire – Embâcles de l’hiver 2018-2019

3.1 Description des événements

Lors de l’hiver 2018-2019, trois embâcles de glace ont provoqué une suspension de la navigation commerciale sur le fleuve pour une dizaine de jours au total. Les dates des embâcles ont été fournies par la Garde côtière canadienne et sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2: Dates des embâcles sur le lac Saint-Pierre en 2019

Nom	Début	Fin
Embâcle 1	21 janvier 2019	26 janvier 2019
Embâcle 2	31 janvier 2019	1 février 2019
Embâcle 3	14 février 2019	15 février 2019

Il est présumé que les arrêts menant à ces embâcles auraient pu être initiés une journée ou deux avant les dates de début indiquées dans le Tableau 2, car il prend un certain temps pour que le cercle d’intensification (figure 11) se traduise en un arrêt de glace et ensuite, en un embâcle suffisamment important pour suspendre la navigation et être notés au Tableau 2. Par exemple, le 29 janvier 2019, une opération de déglçage a eu lieu, car un arrêt de glace a été observé à l’île de Barques¹. Selon le Tableau, l’embâcle no 2 s’est formé ultérieurement (soit, le 31 janvier 2019).

¹ Communication personnelle M. Roger Daigle 05/01/2020

3.2 Conditions générales de l'hiver 2018-2019

3.2.1 Degrés-jours de gel et évolution de la formation du couvert de glace

Une vue d'ensemble de l'hiver est réalisée en présentant les degrés-jours de gel et l'évolution de formation du couvert de glace sur le lac et en amont.

La température exerce une influence majeure sur l'évolution des couverts de glace et sur la production de glace à la dérive. De ce fait, il est important d'analyser les degrés-jours de gel (DJG) de l'hiver 2018-2019. À fin de comparaison, ceux-ci sont comparés avec ceux des trois hivers précédents. La figure 13 présente l'évolution de l'accumulation des degrés-jours de gel pour les hivers de 2015 à 2019 :

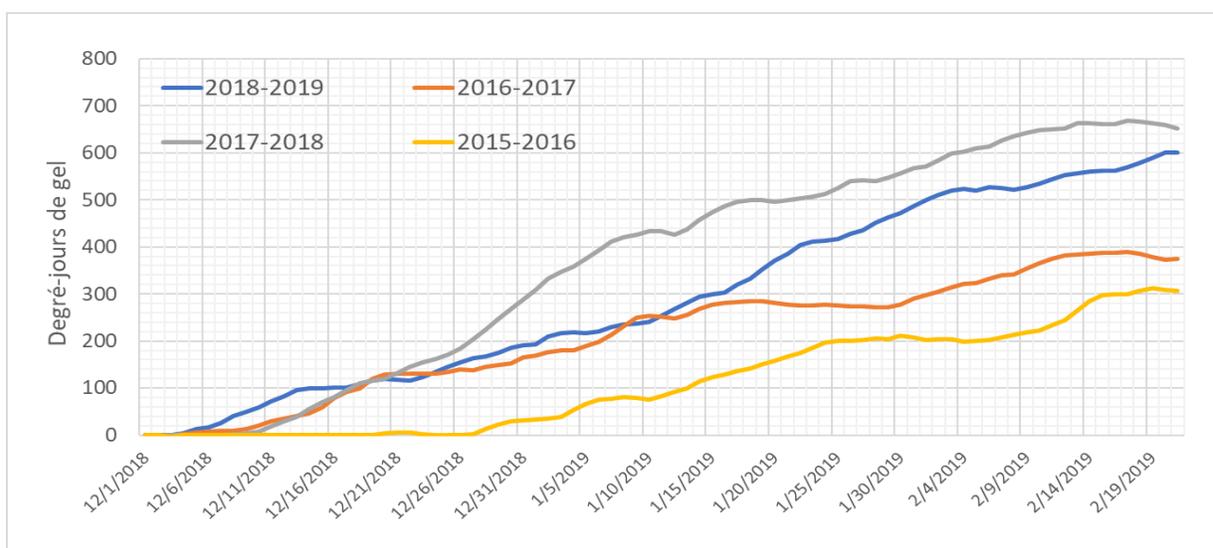


Figure 13: Degrés-jours de gel lors des hivers de 2015 à 2019

Tout d'abord, contrairement à l'hiver 2017-2018 qui a une accumulation rapide de degrés-jours de gel en décembre, l'hiver 2018-2019 progresse similairement à l'hiver 2016-2017 jusqu'à la mi-janvier où une vague de froid dans le secteur se perçoit. À ce moment, la grande croissance des valeurs de degrés-jours de gel implique une production importante de glace en amont du lac pour cette période. La figure 14 permet de visualiser l'interaction entre la formation des couverts aux estacades et les degrés-jours de gel. Il est possible de remarquer qu'à 294 DJG, le couvert de glace derrière l'estacade Yamachiche s'est complètement formé

le 14 janvier 2019. En amont du lac, les degrés-jours de gel de 299 DJG et 386 DJG ont permis la formation respective des couverts de glace derrière les estacades à Lanoraie et de Lavaltrie, soit le 15 janvier 2019 et le 21 janvier 2019 respectivement.

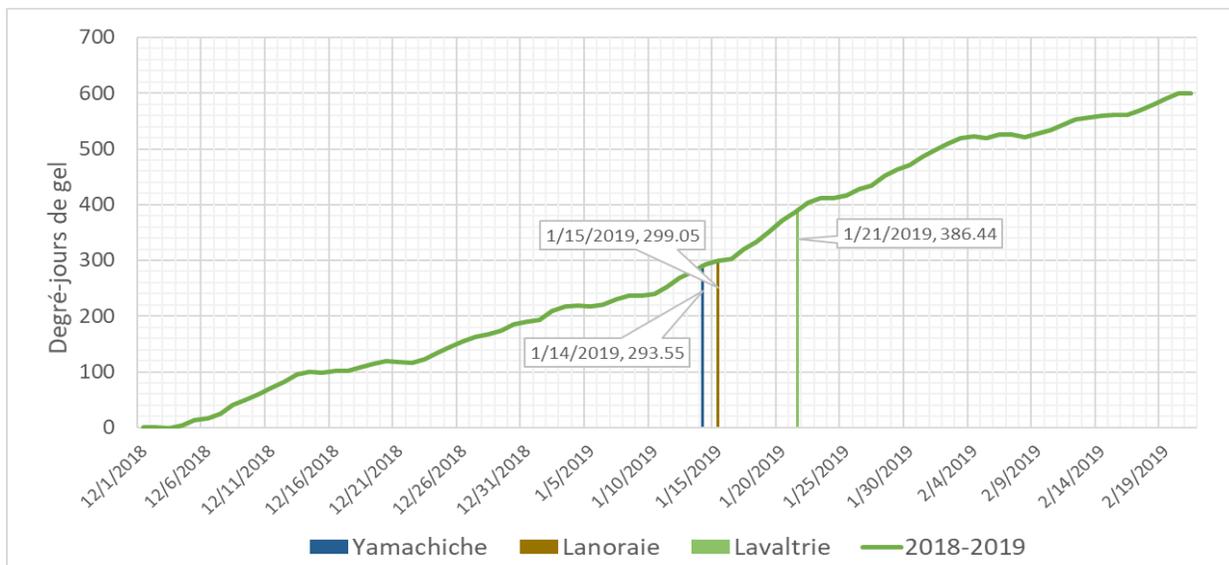


Figure 14: Date de formation complète des couverts de glace en amont de chaque estacade en fonction des degrés-jours de gel.

3.2.2 Estacades

L'estacade Yamachiche est installée chaque année afin d'accentuer les vitesses d'écoulement dans le bief problématique et prévenir l'intrusion de la glace du côté nord du Lac dans le chenal de navigation. Les estacades à Lavaltrie et Lanoraie sont installées afin de réduire la production de glace sur le fleuve en amont du lac. Alors, il est important d'analyser à quel moment les estacades ont provoqué la formation de leur couvert de glace à leurs endroits respectifs.

Le tableau 3 présente les dates de formation complète des couverts de glace des estacades pour les hivers de 2013 à 2019. Il présente aussi la différence en jours entre la formation du couvert Yamachiche par rapport à ceux plus en amont (Lavaltrie et Lanoraie)

Tableau 3: Dates de formation des couverts de glace complets en amont des estacades en fonction des années (hiver)

Estacade	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019
Lavaltrie	18 décembre	13 janvier	19 janvier	15 janvier	17 décembre	21 janvier
Lanoraie	17 décembre	13 janvier	15 janvier	7 janvier	30 décembre	15 janvier
Yamachiche	17 décembre	5 janvier	14 janvier	3 janvier	27 décembre	14 janvier
Dates amont - Date Yamach.*	$(1+0)/2=0.5$ jours	$(8+8)/2=8$ jours	$(5+1)/2=3$ jours	$(12+4)/2=8$ jours	$(-10+3)/2=-3.5$ jours	$(7+1)/2=4$ jours

*En moyenne, le nombre de jours de différence entre les formations des couverts de glace en amont comparativement à l'aval (en fonction des deux estacades en amont).

Ce tableau présente les retards relatifs de la formation des couverts en amont du lac Saint-Pierre comparativement avec celui de Yamachiche. Il y a des années où les couverts se sont formés en même temps alors qu'en 2018-2019, les couverts en amont tardaient à se former (moyenne de 4 jours).

Aussi, l'hiver 2019 a eu la formation la plus tardive du couvert de glace des 6 dernières années, soit environ 3,5 jours plus tard. Afin de pouvoir extraire d'autres informations de la date de formation des estacades, il faut la comparer avec les degrés-jours de gel des hivers. Le prochain graphique montre la date où le couvert de glace était formé en amont des trois estacades.

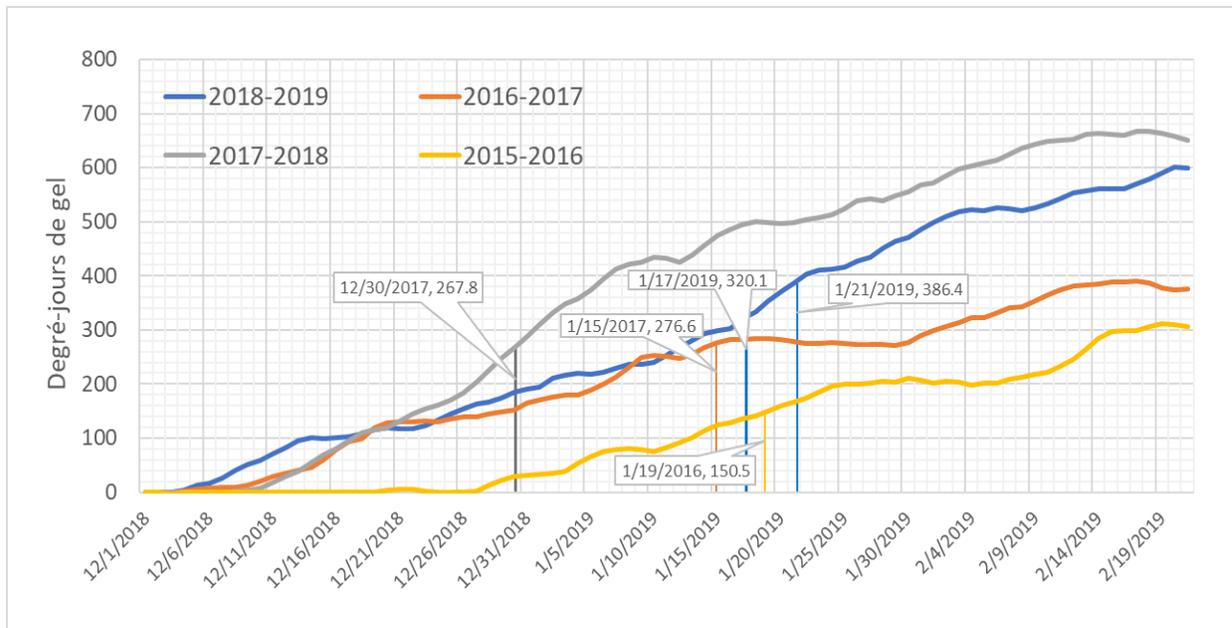


Figure 15: Date de formation des couverts de glace à l'amont des estacades en fonction des degrés-jours de gel lors des hivers de 2015 à 2019.

L'hiver 2019 est remarquable considérant que la formation du couvert de glace a nécessité 320 DJG comparativement à des valeurs de 151, 277 et 268 DJG pour les hivers de 2015 à 2018. La formation du couvert aurait donc nécessité près de 110 DJG de plus que les trois hivers précédents. Aussi, cela a pris plus de 386 DJG afin de couvrir la rive nord de l'île Bouchard (21 janvier 2019). Considérant que le rôle des estacades est de réduire le débit de glace Q_g et d'augmenter la vitesse dans le chenal, cette formation tardive a forcément contribué à la formation des embâcles de 2019.

3.2.3 Surface libre de glace

Dong (2011) a démontré qu'il est possible de prédire la progression du couvert de glace en fonction des degrés-jours de gel. Par exemple, ses relations sont utilisées par Baird (2013) et Environnement Canada² pour estimer la couverture de glace afin de faire la modélisation de l'hydrodynamique du fleuve. Malgré ces relations, son étude montre que la progression du couvert de glace varie énormément d'une année à l'autre (voir figure 4.4. de Dong, 2011) et de ce fait, l'étude de la progression du couvert de glace utilisée ici s'est basée sur les aires libres de glace de rive comme indiqué sur les cartes d'observations des glaces produites par

² Communication personnelle avec Environnement Canada le 02/2020

ECCC en amont du lac Saint-Pierre. Un graphique des aires contributives à la production de glace est alors présenté pour l'hiver 2018-2019 (Figure 16).

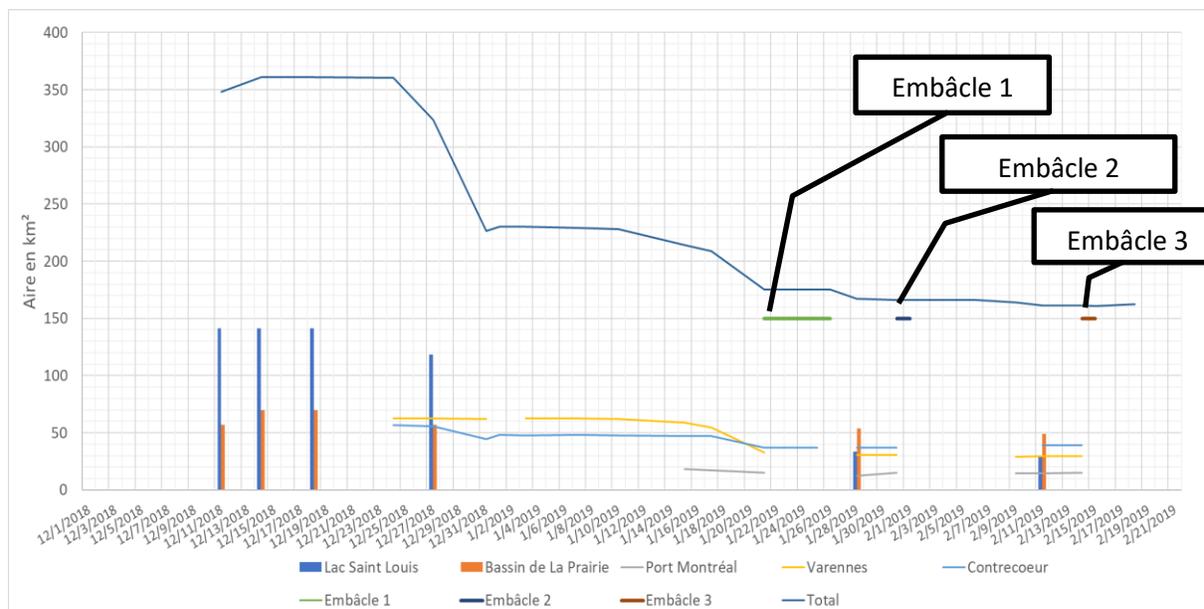


Figure 16: Aire observée de surface libre qui contribue à la production de glace sur le fleuve Saint-Laurent du lac Saint-Louis jusqu'à Sorel lors de l'hiver 2019

Ce graphique permet de constater que le principal contributeur de production de glace pour la région étudiée est le lac Saint-Louis. Il est malheureusement difficile de connaître l'étendue du couvert de glace de celui-ci en début janvier puisqu'il n'y a pas de cartes d'observation des glaces disponibles pour cette période.

En revanche, une fois le couvert présent, son aire contributive chute drastiquement de plus de 70%, soit environ 100 km². La superficie libre du bassin de La Prairie ne varie que faiblement durant la période précédant les arrêts. La superficie libre totale quotidienne du Bassin de La Prairie n'est qu'une estimation considérant la dernière valeur connue.

Quant aux diminutions d'aire observable le 21 janvier pour les tronçons de Varennes et de Contrecœur, elles sont majoritairement causées par la formation du couvert en amont des estacades de Lavaltrie et de Lanoraie et par la formation du couvert environnant les îles de Contrecœur.

Au début de l'hiver, avec les températures froides de l'air, la température de la surface de l'eau chute vers zéro et la glace commence à apparaître. Malgré la grande superficie de l'eau disponible pour le transfert de chaleur, le débit de glace produit n'est pas très élevé, car il reste encore de la chaleur dans la colonne d'eau qui continue à se dégager. C'est une fois que l'hiver est suffisamment avancé que les arrêts de glace peuvent se produire causant ainsi des embâcles lorsque le débit de glace rentrant est supérieur à la capacité d'évacuation ($Q_g > Q_{gc}$).

3.3 Analyses des embâcles

3.3.1 Conditions spécifiques des embâcles

Plusieurs facteurs peuvent favoriser la formation d'embâcles sur le lac Saint-Pierre. De ce fait, la température, le vent, les précipitations de neige, le débit, le niveau d'eau et la largeur du chenal sont présentés ci-dessous.

3.3.2 Température

Les températures des journées précédentes sont à prendre en considération (T_a) pour la production de glace. Le graphique ci-dessous présente les températures ajustées de la municipalité de Sorel pour la période des embâcles de 2019.

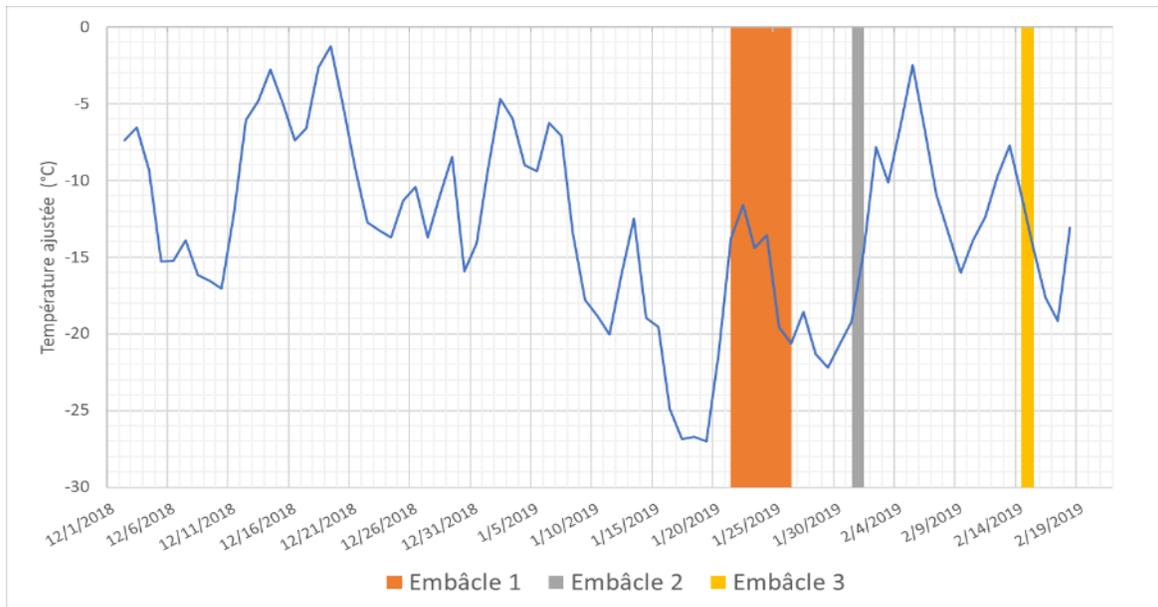


Figure 17: Température de l'air moyenne (T_a) ajustée à Sorel pour l'hiver 2018-2019. (Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux).

Dans les journées précédant les arrêts de 2019, les températures ajustées atteignaient $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les embâcles 1, 2 et 3 respectivement. Ces basses températures influencent la production de glace qui à son tour, influence la concentration en glace dans le chenal.

3.3.3 Vent

Les autres paramètres pris en considération dans l'étude sont la vitesse du vent et sa direction. En effet, lorsque de forts vents de direction NE ralentissent la glace, la boucle d'événements s'enclenche rapidement. La figure 18 permet de comparer les vitesses du vent en fonction de chaque direction lors de l'hiver 2018-2019.

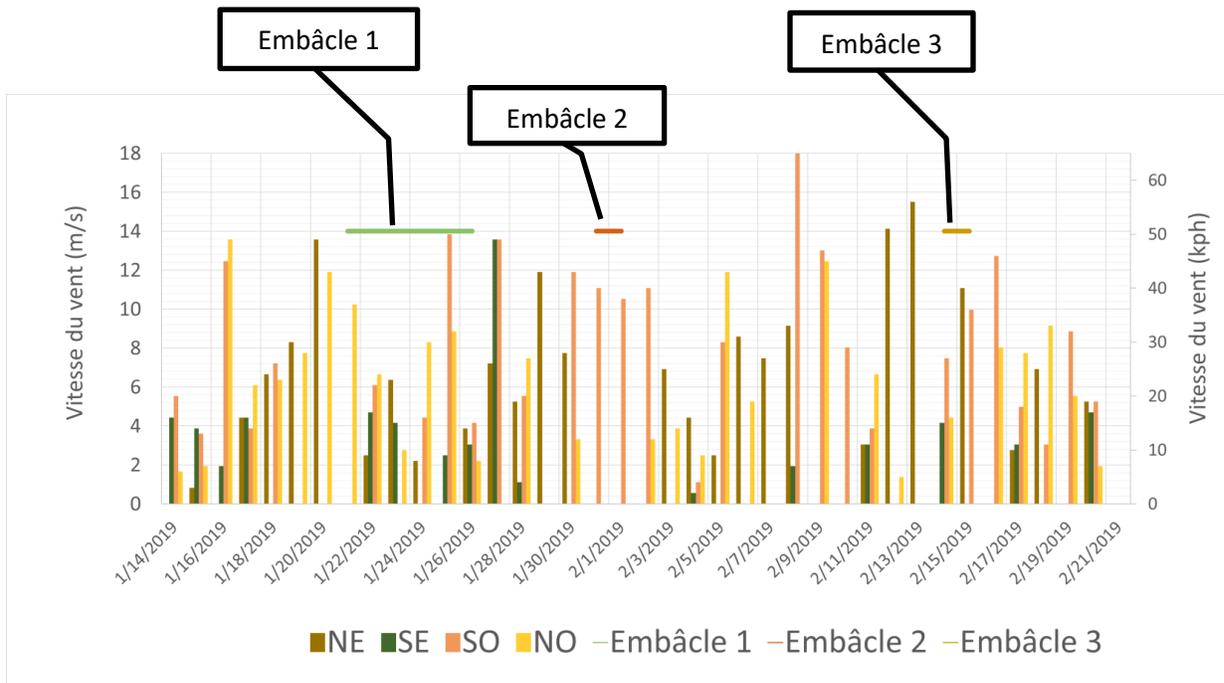


Figure 18: Vitesse et direction du vent sur le lac Saint-Pierre lors de l'hiver 2019

Puisque le vent de direction NE est celui ayant la plus grande influence sur la formation d'embâcle, l'étude se concentre majoritairement sur la vitesse du vent provenant de cette direction. Dans la semaine précédant chaque arrêt (21 janvier, 31 janvier et 14 février), de forts vents de direction NE sont observés (figure 19). Les vitesses ont atteint plus de 40 km/h durant ces périodes. Selon la revue des études antérieures, la vitesse de la glace peut chuter drastiquement. Cette réduction de vitesse (même jusqu'à zéro une fois que le vent nord-est est plus fort que 20 km/h) a certainement contribué significativement aux arrêts de glace qui ensuite ont initié la formation des embâcles.

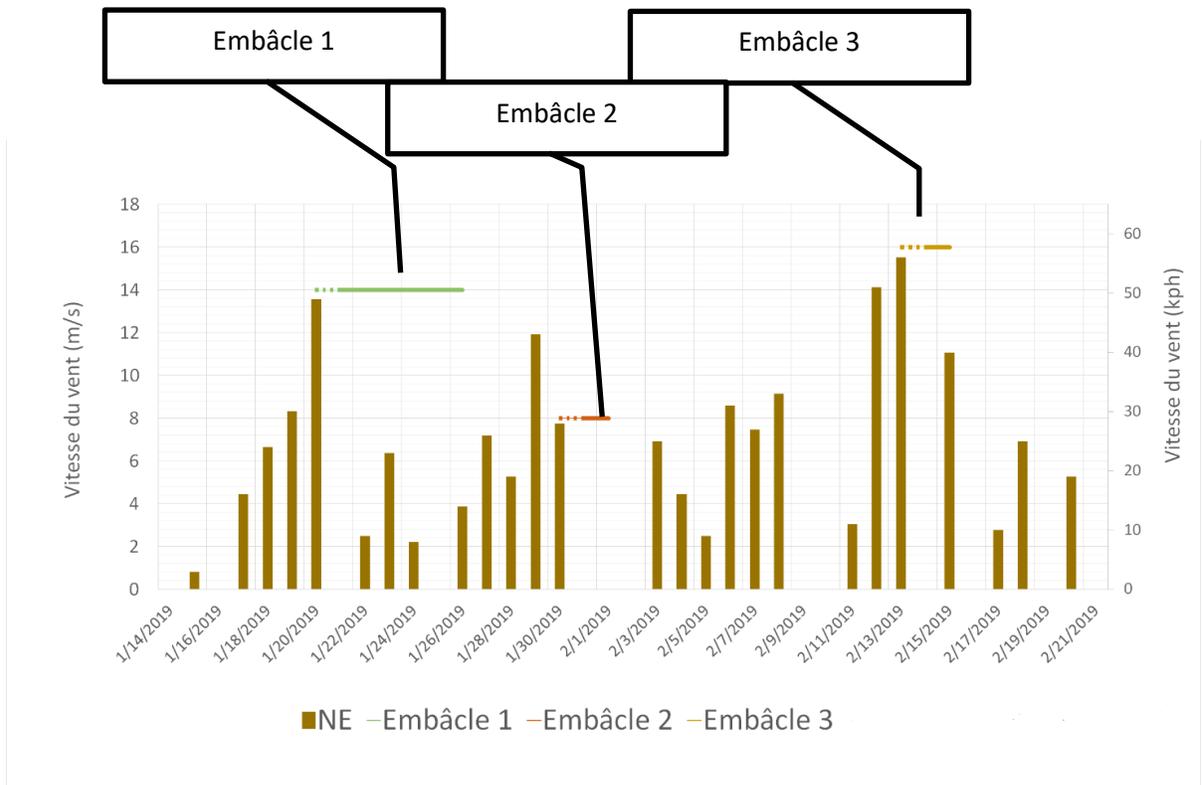


Figure 19: Vitesse du vent nord-est sur le lac Saint-Pierre lors de l'hiver 2019. (Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace (lignes pointillées) devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux (lignes solides)).

3.3.4 Précipitations

Les précipitations sur le territoire du lac Saint-Pierre sont étudiées considérant que la chute de neige pourrait avoir un impact sur la cohésion des floes de glace, ce qui augmenterait la force de friction (F_f). De ce fait, deux municipalités environnantes furent sélectionnées afin d'étudier les précipitations (figure 20).



Figure 20: Localisation des municipalités de Louiseville et de Pierreville par rapport au lac Saint-Pierre (Google Maps, s.d.)

À partir des données historiques de l’hiver 2019, l’histogramme de la figure 21 a été produit. Quatre périodes majeures de précipitations de neige sont observables durant cet hiver. Il est intéressant d’observer que parmi ces quatre périodes, trois d’entre elles correspondent aux journées précédant les embâcles du 21 janvier, 31 janvier et 14 février. Les valeurs varient entre 10 et 14 cm de précipitations pour ces périodes. Aussi, il est possible de constater le 28 cm de précipitation du 12 février à la municipalité de Louiseville.

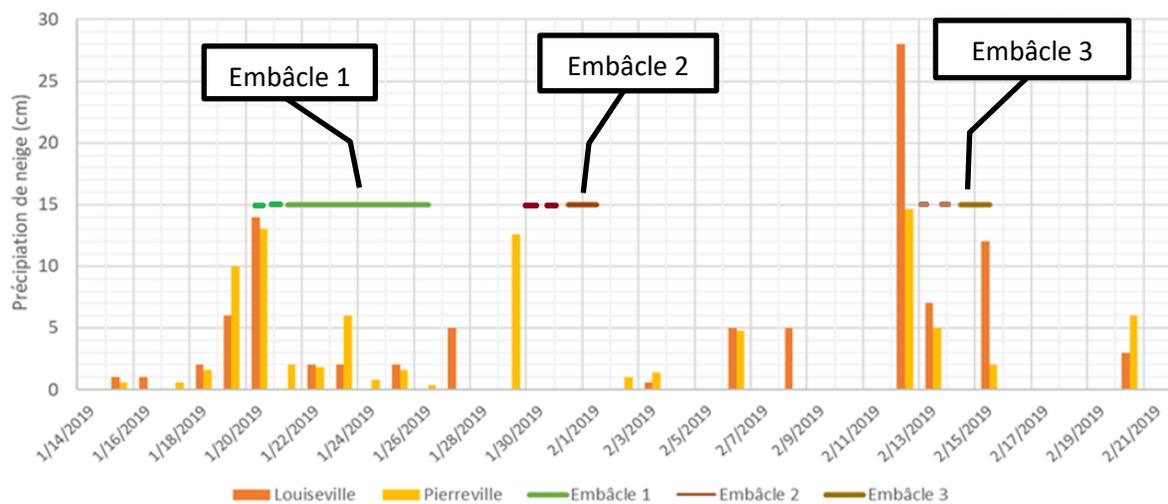


Figure 21: Précipitation (neige) pour les municipalités de Louiseville et Pierreville lors des mois de janvier et février 2019. (Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d’embâcle d’une journée ou même deux)

3.3.5 Débit du fleuve Saint-Laurent

Le débit influence la formation d'embâcle en ayant un impact sur la vitesse d'écoulement et sur le niveau d'eau. Afin d'étudier ce paramètre pour l'hiver 2019, le débit provenant du lac Ontario et le débit du fleuve à Montréal sont présentés à la figure 22. Le débit du fleuve a été obtenu en additionnant les données historiques à LaSalle avec celles de la rivière des Mille-Îles et de la rivière des Prairies.

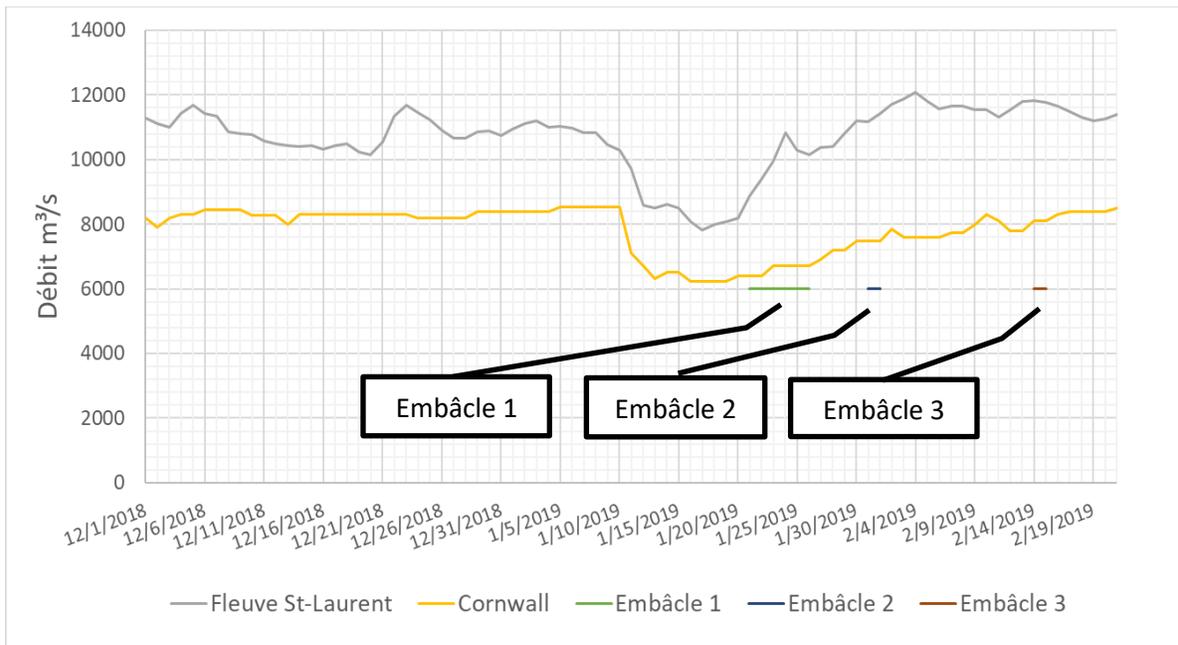


Figure 22: Débit du fleuve Saint-Laurent à LaSalle et de la rivière Mille-Îles lors de l'hiver 2018-2019. Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux.

Évidemment, le débit provenant du lac Ontario dicte fortement le débit du fleuve Saint-Laurent. La diminution du débit de 2000 m³/s au barrage de Cornwall (15 janvier) implique une diminution similaire de celui du fleuve. Ainsi, le débit minimal a été obtenu quelques jours avant l'arrêt no 1.

3.3.6 Niveaux d'eau

Avec la variation du débit se prédit une variation du niveau d'eau. Afin d'étudier ces variations, cinq stations de niveau d'eau se trouvant sur le fleuve Saint-Laurent ont été analysées. Les stations sont celles de Varennes, de Contrecoeur, de Sorel, du lac Saint-Pierre et du Port Saint-François (figure 23).

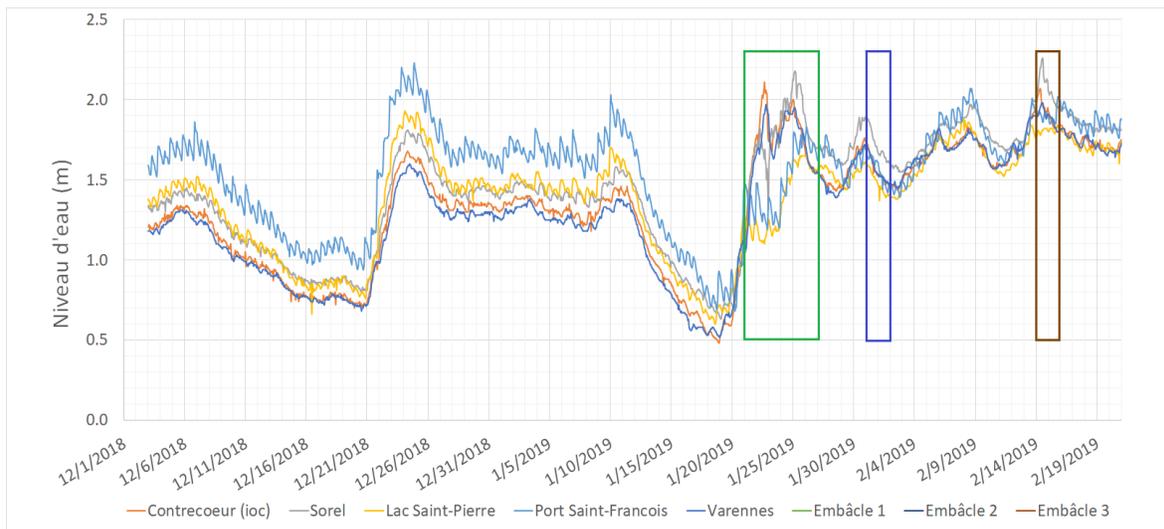


Figure 23: Niveaux d'eau par rapport au zéro des cartes à différentes stations sur le fleuve Saint-Laurent. Afin de mieux interpréter la figure, notez que les arrêts initiaux de glace devancent les périodes d'embâcle d'une journée ou même deux.

La réduction du niveau d'eau d'environ 1 m lors du mois de janvier s'explique simplement par la diminution du débit du fleuve Saint-Laurent. L'intérêt dans le graphique ci-haut est plutôt que les niveaux d'eau des trois stations en amont des embâcles ont augmenté le 21 janvier. Cette augmentation drastique du niveau a probablement été causée par l'embâcle de glace responsable de l'arrêt du 21 janvier 2019 conjointement avec le vent NE et l'augmentation du débit du fleuve.

Afin de mieux visualiser l'influence des embâcles sur le niveau d'eau, le graphique 15 montre la variation du niveau d'eau pour les stations de Sorel et du Port Saint-François, les stations amont et aval à la Courbe no 1 et la Courbe no 2.

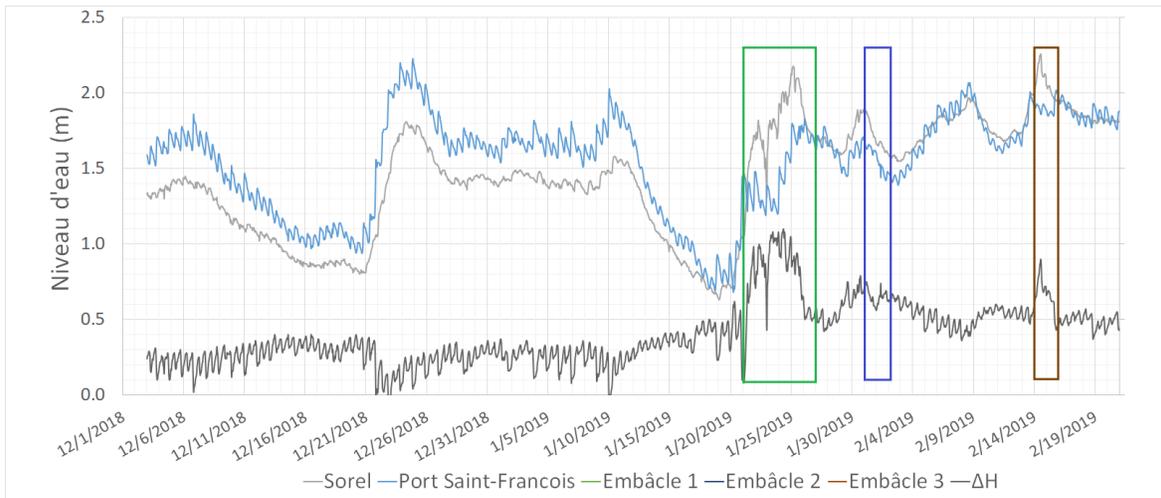


Figure 24: Niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent pour les stations de Sorel et du Port Saint-François lors de l'hiver 2019

En considérant les trois périodes d'arrêt de l'hiver 2019, il est possible de constater que pour chacune d'entre elles, le niveau d'eau à la station de Sorel a eu une plus grande augmentation que celle en aval du Port Saint-François (voir la ligne ΔH de la figure 24).

3.3.7 Largeur effective du chenal maritime sur le bief problématique

Considérant l'importance de la largeur effective du chenal (B_g) pour la capacité de transport de glace (Q_{gc}), une tentative de regrouper des données de largeur effective pour les Courbes nos 1 et 2 a été réalisée. En se basant sur les cartes des glaces, il est possible d'avoir une idée de la largeur effective du chenal ou de la progression du couvert de glace durant l'hiver. Cependant, ces cartes ne sont pas précises. De ce fait, il est difficile de quantifier la largeur effective du chenal sur le bief problématique.

Une seconde tentative a été réalisée avec les photographies aériennes des patrouilles sur le lac Saint-Pierre. L'objectif était de comparer la largeur effective du chenal avec une structure de dimension connue telle une tour d'alignement. Cette tentative n'est pas concluante considérant qu'aucune structure de dimension n'est visible sur la grande majorité des photographies.

3.4 Analyse des images de glaces

Dans la prochaine section, différentes images aériennes fournies par le bureau des glaces sont commentées.

- La figure 25 permet de constater que le couvert de glace a de la difficulté à se former à l'estacade de Lavaltrie. En effet, il semble que les floes de glace dérivent vers l'aval en passant par le côté sud de l'estacade. L'ajout d'une section pourrait retenir davantage la glace à cet endroit et améliorer la rapidité de la formation du couvert de glace – chose essentielle pour réduire les risques d'embâcles.



Figure 25: estacade de Lavaltrie 15 janvier 2019

- La figure 26 permet de visualiser la formation du couvert de glace aux estacades de Lavaltrie et de Lanoraie en janvier 2019. Considérant la figure 25, le constat principal est la formation tardive de ces deux couverts.

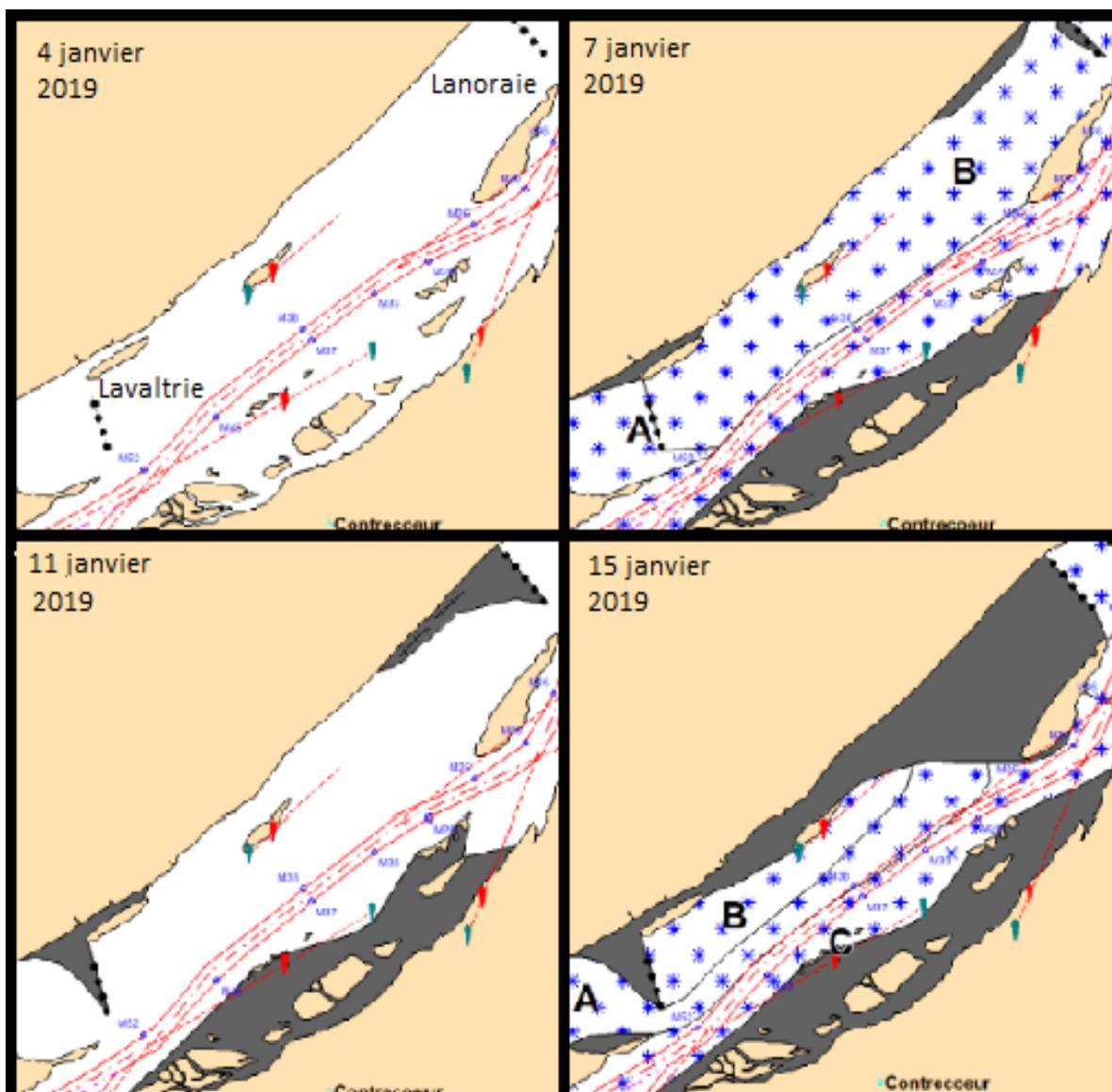


Figure 26: progression du couvert de glace Lavaltrie et Lanoraie en janvier 2019 (Source : Cartes d'observation des glaces Environnement Canada)

- L'arche de glace observable à la figure 27 est la forme typique que prend un arrêt de glace. En général, un embâcle de cette envergure se produit lorsqu'une arche de glace d'une faible longueur force l'arrêt de l'écoulement des glaces de surface. Le débit de glace (Q_g) vient alors, compléter le couvert de glace en amont de l'arrêt et prend de l'ampleur jusqu'à devenir un embâcle. Si les dimensions de l'embâcle augmentent considérablement, des inondations peuvent être attendues.



Figure 27: Embâcle bouée S63 vers amont 21 janvier 2019

- La figure 28 permet de bien visualiser comment les observateurs des glaces traduisent les informations terrain sur les cartes d'observations des glaces et comment les conditions peuvent se développer sur quelques heures seulement. La carte située à gauche (15h05) montre la concentration élevée de glace en transit à l'est. Le constat principal est que cette concentration diminue aux fins du temps à l'est et reste similaire dans le bief problématique. Cette accumulation de glace est causée par les neuf principaux concepts présentés à la section 5.

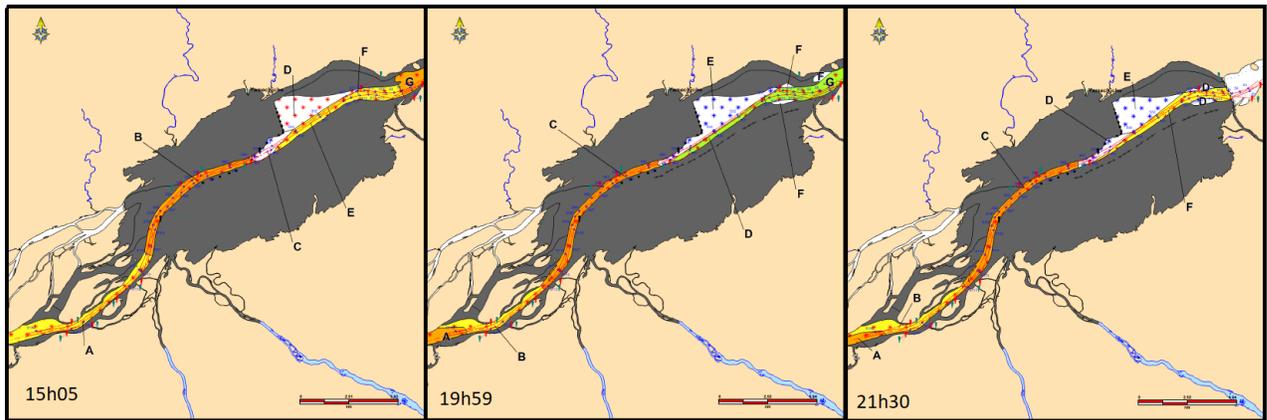


Figure 28: Cartes d'observations des glaces du lac Saint-Pierre le 21 janvier 2019 pour trois moments différents.

- La figure 29 est une photo du bief problématique sur le lac Saint-Pierre. Alors que la largeur B_g est visible, il est difficile de la quantifier, surtout lorsque le débit de glace est imposant comme ici. Aussi, on note le détachement en forme d'arche de la glace, mais, malheureusement, peu d'informations quantitatives sur la largeur effective peuvent être retirées des figures 26 et 28.



Figure 29: Bief problématique, secteur Courbe no 1 (Louiseville). Photo prise vers amont 21 janvier 2019.

- Considérant les températures froides des journées précédentes et des précipitations de neige de la région, il est normal de constater une forte masse de glace en transit le 21 janvier 2019 (figure 30). La largeur entière du fleuve au nord de Sorel est occupée par de la glace de surface en transit qui va éventuellement tenter de passer par le chenal de largeur nettement inférieur au lac Saint-Pierre.



Figure 30: Fleuve Saint-Laurent, secteur Sorel, photo prise vers amont 21 janvier 2019

- Dans le cadre de cette étude, l'analyse discute davantage des embâcles ayant eu lieu sur le lac Saint-Pierre qui est la zone la plus à risque de ce tronçon. Cependant, il est important de noter que d'autres endroits ayant un rétrécissement de la largeur effective peuvent initier des embâcles tels qu'à la hauteur de l'île St-Ours (figure 31). Cet événement à cet endroit n'a cependant pas été étudié, car ce n'est pas l'endroit où les embâcles sont d'abord généralement initiés.



Figure 31: île St-Ours 21 janvier 2019

- Sur la figure 32, un fort débit de glace commence à graduellement diminuer la largeur effective du chenal. Aussi, le grand débit de glace compacté se libère progressivement. Ces floes se dirigent vers le bief problématique du lac Saint-Pierre.



Figure 32: Fleuve Saint-Laurent, secteur Île St-Ours; photo prise vers l'amont 21 janvier 2019

- La figure 33 présente bien la limite du couvert de glace de la rive sud et de la rive nord. La largeur effective du chenal est d'ailleurs, nettement réduite par l'attachement de certains floes sur les bords des couverts.



Figure 33: Fleuve Saint-Laurent, secteur de la Courbe Maskinongé; photo prise vers l'aval 22 janvier 2019

- Malgré le passage facile de la glace dans le chenal, il est important de nettoyer les bordures du chenal de toutes glaces pouvant éventuellement réduire la largeur effective, faciliter la formation d'arrêt et donc, d'embâcles. La figure 34 présente un chenal permettant le passage du débit de glace à ce moment, car le bouchon entonnoir est à l'amont. En revanche, il serait intéressant d'évaluer si la largeur du chenal était suffisante s'il n'y avait pas d'embâcle à l'amont.



Figure 34: Bief problématique du lac Saint-Pierre à la hauteur de la Courbe Yamachiche; photo prise vers l'aval 22 janvier 2019

- L'importance de la figure 35 est explicable par le fait qu'un détachement d'une partie du couvert sud à l'est peut réduire la capacité d'évacuation de la glace à la sortie du lac Saint-Pierre. Il est difficile d'évaluer à quel point si la capacité de transport maximal du lac Saint-Pierre a été affectée par cet événement. Dans les anciens rapports, la nécessité de l'ajout d'îlots artificiels à cet endroit fut remise en question à plusieurs reprises. Avec les changements climatiques, il s'agit d'une vulnérabilité à surveiller.

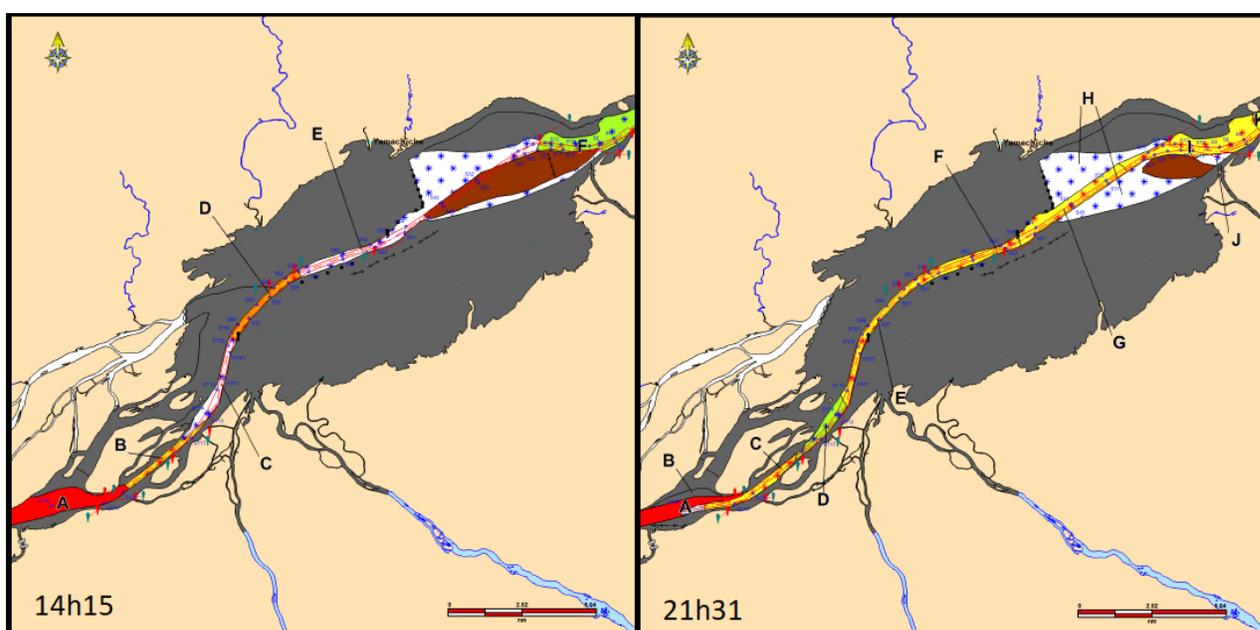


Figure 35: Cartes d'observations des glaces du lac Saint-Pierre le 22 janvier 2019 pour deux moments différents

- La figure 36 présente un navire pris dans la glace lors de l'embâcle du 24 janvier.



Figure 36: Navire pris par la glace dans le chenal le 24 janvier 2019

Des exemples de photographies réalisées par patrouille aérienne sont disponibles en Annexe B

3.5 Résultats

3.5.1 Conclusion de l'analyse

Ayant analysé des conditions générales de l'hiver et de celles spécifiques à chaque arrêt, il est possible d'en tirer les conclusions suivantes.

Bien que les estacades Lavaltrie, Lanoraie et Yamachiche furent posées au début de l'hiver 2018-2019, les embâcles de 2019 se sont formés pour la même raison que les événements antérieurs, soit un arrêt de glace dans le bief problématique du fleuve qui a causé une accumulation de glace qui s'est transformée en embâcle. L'arrêt est survenu lorsque la capacité d'évacuation des glaces (Q_{gc}) est devenue inférieure au débit de glace en transit (Q_g). Ceci s'est produit alors que les conditions étaient pleinement hivernales (étendues complètes des couverts de glace sur le lac et chaleur résiduelle du fleuve complètement épuisée) :

- Le débit de glace en transit (Q_g) était élevé dû aux basses températures et la faible efficacité des estacades Lavaltrie et Lanoraie en janvier 2019. C'est-à-dire, les estacades Lavaltrie et Lanoraie n'ont formé leurs couverts que tardivement.
- La capacité d'évacuation (Q_{gc}) était trop faible due à la présence d'un vent NE; d'une largeur effective de chenal trop restreinte (B_g); et possiblement des chutes de neige qui ont augmenté le débit de glace et la force de friction. La boucle de formation des glaces de l'Arrêt no 1 s'est entamée le 20 ou 21 janvier.

Un redoux relatif, un vent moins important et les différentes interventions réalisées par la Garde côtière ont réussi à gagner la réouverture du chenal le 26 janvier.

Cependant, les conditions météorologiques de température de l'air et de vent NE des journées suivantes ont renvoyé le système dans la boucle d'événements pour la reformation des embâcles nos 2 et 3.

3.5.2 Analyse des opportunités d'intervention opérationnelle pour réduire les risques d'arrêts et d'embâcles.

Ces opportunités présentent les différentes interventions qui pourraient influencer les paramètres significatifs d'intérêts comme le débit de glace et la capacité d'évacuation de la glace.

3.5.2.1 Réduction du débit de glace (Q_g)

Il est difficile d'influencer la température de l'air pour diminuer le débit de glace en transit, mais il faut continuer à poser des estacades pour réduire le plus possible la surface exposée au transfert de chaleur. À cet égard, il est essentiel d'allonger les estacades à Lavaltrie et Lanoraie pour que les couverts prennent plus rapidement (Figures 25 et 26).

3.5.2.2 Augmentation de la capacité d'évacuation de la glace (Q_{gc})

Une diminution de la capacité d'évacuation de la glace (Q_{gc}) en dessous du débit de glace (Q_g) peut éventuellement causer des arrêts et des embâcles (équation 3). Le vent, la vitesse de l'eau, l'épaisseur de la glace et la largeur effective du chenal sont les paramètres significatifs sur lesquels des interventions pourraient augmenter la capacité d'évacuation de la glace.

3.5.2.3 Vent

Il est difficile d'augmenter Q_{gc} en influençant la vitesse et direction du vent, car il s'agit de phénomènes naturels environnants.

3.5.2.4 Vitesse de l'eau

La possibilité d'augmenter les vitesses de l'eau (V) en jouant sur le débit à Beauharnois/Cornwall/Carillon n'est pas exclue. Cependant, en tenant compte des autres

considérations sur le fleuve (exemple, formation du couvert de glace à Beauharnois), d'un point de vue opérationnel et communautaire, cette mesure semble complexe. De plus, l'augmentation du débit d'eau dans le fleuve fait augmenter les niveaux sur le lac. Cette augmentation favorise l'écoulement sous les couverts de glace sur le lac. Alors, le rapport du débit d'eau dans le chenal augmenterait moins rapidement que le débit manipulé aux barrages. Ceci est encore plus vrai lorsqu'on ajoute l'effet d'amortissement de la pointe de débit d'eau entre des interventions à Beauharnois/Carillon et le lac Saint-Pierre. De plus, un débit plus grand pourrait retarder la formation des couverts de glace derrière les estacades à Lanoraie et Lavaltrie.

Alors, avant d'affirmer l'influence d'une gestion du débit en amont sur la formation des embâcles, il serait intéressant de modéliser cette mesure de gestion sur l'augmentation de Q_{gc} . La faisabilité et l'efficacité de cette intervention pourra être étudié dans un autre projet. De ce fait, aucune recommandation n'est présentée dans ce mémoire.

3.5.2.5 Épaisseur de glace

La capacité à véhiculer la glace (Q_{gc}) dépend directement de l'épaisseur de la glace en transit (t_g). Sans créer plus de congestion (qui mènerait à une réduction de Q_{gc}), la seule façon d'augmenter les épaisseurs de glace en transit est en passant à travers les glaces avec des brise-glace dans le bief problématique et/ou en amont. Sans simulations approfondies, il semble que cette mesure serait essentielle sur le lac, mais pas nécessairement pratique et rentable à l'amont.

3.5.2.6 Largeur effective du chenal

La capacité d'évacuation est non linéairement proportionnelle à la largeur effective du chenal entre les couverts de glace sur le lac ($Q_{gc} \propto B_g^{1.346}$). D'où l'importance qui devrait être accordée à cette largeur.

Premièrement, il faut trouver une façon de quantifier la largeur de l'ouverture, car il est impossible de la gérer sans avoir de données fiables. Ceci implique que les Observateurs de

glace doivent se donner des moyens pour la mesurer et ensuite noter ces mesures sur les cartes de glace ou, encore mieux, dans un tableur. Une méthode utilisée par Morse (autrefois employé du Secteur Hydraulique de La Garde côtière) par le passé (environ 1995-1997) était de demander à certains pilotes des hélicoptères de voler exactement au-dessus des lignes délimitant la séparation du couvert de glace du chenal maritime. Les points GPS furent mis en plan et servaient pour la base de l'identification des zones de faible largeur sur le bief problématique. Aujourd'hui, il y aurait possiblement d'autres méthodes plus efficaces comme la prise de photos et l'analyse numérique d'images géoréférencées et/ou l'exploitation des images satellites. La possibilité de réaliser des patrouilles à l'aide d'un drone géoréférencé sur les secteurs sensibles de congestion est aussi à considérer.

Les images des caméras de surveillance des glaces pourraient éventuellement être utilisées afin de quantifier la largeur effective. Cette évaluation pourrait être comparée avec les cartes d'observations quotidiennes des glaces et des images satellites afin de vérifier son efficacité.

Deuxièmement, il faudrait gérer (augmenter) la vitesse de transit des navires marchands. Leur batillage est un moyen nécessaire et efficace de maintenir et d'augmenter la largeur effective (B_g). Sachant qu'il faut prendre en considération les risques de déstabiliser le couvert de glace formé à l'extérieur du chenal, que ça pourrait détacher (figure 35) et provoquer la formation d'embâcle ou d'obstacle à la navigation, il faut trouver un juste milieu.

Troisièmement, il faudrait revenir à la pratique antérieure de faire un entretien régulier de la largeur en déployant un brise-glace sur des trajets préventifs proches des couverts de glace pour maintenir une bonne largeur efficace surtout lorsque les prévisions météorologiques (température et vent) prévoient des risques d'embâcles.

Finalement, il est possible de noter que le trafic maritime durant la nuit est aussi d'intérêt pour maintenir la largeur efficace jusqu'au lendemain matin.

3.6 Recommandations pour réduire les risques de formation des embâcles

Les recommandations sont énumérées dans la discussion qui suit.

3.6.1 Prévenir les arrêts de glace

La prévention des arrêts est le moyen le plus efficace pour ne pas tomber dans la boucle d'événements favorisant les embâcles (figure 11). Alors, (1) il est très important d'avoir de bonnes prévisions de débits de production de glace (Q_g) et de capacité d'évacuation de glace (Q_{gc}) en faisant la surveillance précoce des conditions sur le fleuve, en ayant des prévisions de météo et en bâtissant et exploitant des modèles validés pour les simuler.

Durant les embâcles de 2019 les radars permettant de donner de plus amples informations sur le mouvement de la glace à visibilité réduite ou de nuit n'étaient pas toujours fonctionnels. Alors, (2) une amélioration de la capacité et la fiabilité des radars est cruciale afin de mieux s'outiller dans la prise de décision.

(3) Il faut proactivement élargir la largeur effective du chenal (B_g) en augmentant la vitesse de circulation des navires marchands et déployer les brise-glaces lorsque les navires marchands ne suffisent pas.

Une bonne gestion des glaces nécessite (4) des données fiables, (5) des prévisions pertinentes, (6) des outils d'aide à la décision, (7) de l'expertise professionnelle dans le domaine du génie des glaces et (8) une concertation entre les différents acteurs.

3.6.2 Intervention pour minimiser les impacts

Une fois les embâcles bien développés, (9) il faut continuer à les travailler avec tous les moyens disponibles afin de sortir du cercle d'intensification des embâcles le plus rapidement possible. Lorsqu'il faut faire appel aux navires commerciaux pour circuler afin d'aider à défaire l'embâcle, il est très important de s'assurer qu'ils sont bien équipés (par exemple, puissance suffisante) pour cette mission.

3.6.3 Optimiser la mission des Observateurs des glaces

Afin d'avoir le plus d'information possible sur les débits de glace et la capacité de transport maximale disponible, il est primordial de disposer de données quantitatives :

- Les cartes d'observation de glaces sont utiles afin de visualiser les zones de congestions et les surfaces libres sur le fleuve. Cependant, (10) il est important d'évaluer l'efficacité des estacades et d'évaluer la surface libre en permanence afin de mieux prédire le débit de glace (Q_g). Il faut d'une façon ou autre, estimer la couverture de la glace jusqu'au lac Saint-Louis en fonction de la température de l'eau.
- (11) Il faut quantifier la largeur efficace (B_g) qui est difficilement interprétable sur les cartes d'observation des glaces.
- De plus, (12) la vitesse de la glace V_g est une donnée essentielle à surveiller et à mesurer et à noter.
- (13) Il faut construire et exploiter un outil de gestion des données qui transforme les données, les observations, les prévisions quotidiennes en *information* utile pour la gestion des glaces et de la voie navigable hivernale.

3.6.4 Améliorer l'efficacité des estacades Lavaltrie et Lanoraie

Il est essentiel d'améliorer l'efficacité et la rapidité de formation du couvert de glace aux estacades (Figures 25 et 26). Les estacades Lavaltrie et Lanoraie avaient de la difficulté à former leurs couverts de glace respectifs. (14) il est essentiel d'ajouter d'une section de câble avec poutres à chaque estacade dès maintenant. (15) Il est possible que les berges des îles aux endroits des estacades soient protégées contre l'érosion et même reconstruites, car le courant qui détourne les estacades semble (sur les photos) éroder les rives à ces endroits.

Chapitre 4 : Proposition d'outils de prévention et de gestion des embâcles

Le chapitre suivant propose des outils de prévention et de gestion pertinents afin d'éviter la formation d'arrêts et d'embâcles. Des outils de télédétection et d'aide à la décision sont discutés et ensuite, combinés afin de produire le prototype d'outil LSPriCE. Certaines méthodologies et résultats sont aussi présentés et discutés pour ce qui est de l'outil d'aide à la décision LSPriCE et de la fonction de régression.



Figure 37: Structure du mémoire – Proposition d'outils de prévention et de gestions des embâcles

4.1 Télédétection

La télédétection se définit comme la science et technique de la détection à distance. Cette définition plutôt large implique la grande majorité des techniques aériennes, spatiales, terrestres et maritimes. Dans le cas actuel, la technique aérienne utilisée par la Garde côtière canadienne est une patrouille en hélicoptère. Les images satellites de l'agence spatiale canadienne facilitent aussi la prise de décision. La prochaine section discutera des nouvelles avancées des satellites RADARSAT Constellation Mission et de l'usage d'un drone afin de patrouiller les secteurs d'intérêts.

4.1.1 Satellite

Certaines études ont déjà prouvé l'efficacité des satellites afin d'étudier les conditions de glace (Lindenschmidt et coll., 2010 & Murfitt et coll., 2018). Par exemple, une étude a démontré le potentiel de RADARSAT-2 imagerie afin de communiquer des informations sur la débâcle de la glace sur un lac. À l'aide d'instrumentation sur le terrain et de données météorologiques, le processus de décision est alors plus outillé (Geldsetzer et coll., 2010). Dans cette étude, le constat est que les images satellites sont souvent décalées d'environ 48

heures et plus. Ceci est simplement dû au fait que le satellite RADARSAT-2 en 2010 produisait ces images selon ce délai. Dorénavant, à l'aide du projet RADARSAT Constellation Mission (12 juin 2019), il est possible d'obtenir des images quotidiennes des conditions de glace au Canada. Cette avancée est fortement utile afin d'évaluer les conditions de glace sur le fleuve Saint-Laurent. Ces images permettent d'évaluer la progression du couvert de glace sur le lac Saint-Pierre soit le tronçon problématique, mais aussi d'évaluer le couvert de glace en amont soit, du lac Saint-Louis jusqu'au lac Saint-Pierre.

Le premier avantage de cette surveillance quotidienne fait en sorte qu'il est possible d'évaluer la largeur efficace du tronçon du lac Saint-Pierre manuellement par un opérateur ou à l'aide d'un outil informatique chaque matin. Par exemple, certaines fonctions de traitement d'images sur Python permettraient d'analyser l'image en question.

4.1.1.1 Évaluation du couvert de glace

Le second avantage est l'évaluation de l'aire du couvert de glace. Cette évaluation réalisée par l'opérateur de façon manuelle ou par outil informatique. Un exemple de script Python permettant d'évaluer l'aire est présenté ci-dessous.

```

import numpy as np
import cv2

#Source des données Radarsat Constellation Mission 19 Février 2020.
img=cv2.imread('info_RCM_test.png')
#important de faire image sans fond
#exemple:| powerpoint/picture format/remove background/save picture tif
image=cv2.imread('LSP_RCM_test.tif')

# plot the binary image
imgplot = plt.imshow(img,'gray')
plt.show()
imgplot = plt.imshow(image,'gray')
plt.show()

boundaries = [[0,0,0],[160,150,140]]
for (low, up) in boundaries:
    low = np.array(low,dtype='uint8')
    up = np.array(up,dtype='uint8')
    mask = cv2.inRange(image,low,up)
    output = cv2.bitwise_and(image,image, mask= mask)

#Compter le nombre de pixel pour avec la condition limite de couleur
#et la diviser par le nombre total de pixel de l'image
pix_count=np.count_nonzero(output)

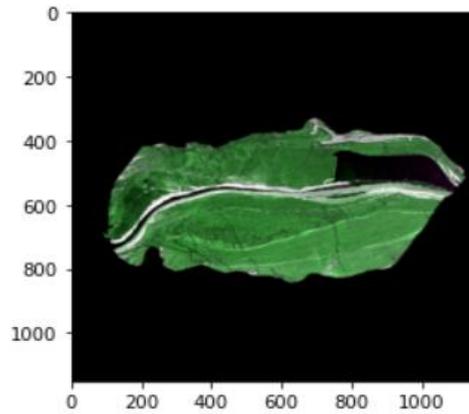
print('Nombre de pixel hors du seuil',pix_count)
size=np.count_nonzero(image)
print ("Le nombre total de pixel est =", size)
Ratio = round((pix_count/(size)),2)
print('Le pourcentage de zone avec glace', Ratio)
print('Ainsi, la zone sans glace recouvre la zone de',round(1-Ratio,2))
cv2.imshow('image',np.hstack([image, output]))
cv2.waitKey(0)

imgplot2=plt.imshow(output)
plt.show()

```

Figure 38: Script python permettant d'évaluer le pourcentage du couvert de glace.

Ce code permet d'obtenir les informations suivantes sur l'image sélectionnée.



Nombre de pixel hors du seuil 848249
 Le nombre total de pixel est = 1095515
 Le pourcentage de zone avec glace 0.77
 Ainsi, la zone sans glace recouvre la zone de 0.23

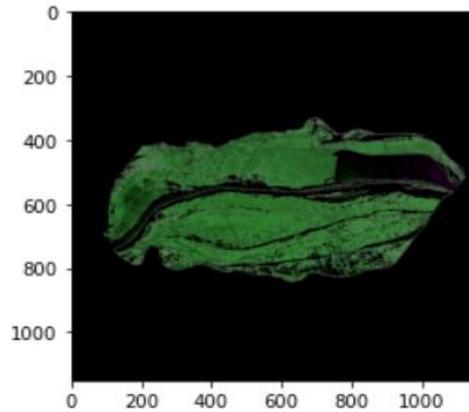


Figure 39: Pourcentage de couvert selon le script de traitement d'image.

L'utilisation de cet outil permet d'estimer le pourcentage couvert de glace dans un secteur. Cependant, il serait d'intérêt de comparer la performance de cet outil avec l'œil humain et voir si une différence notable est perçue. L'image supérieure représente l'image satellite rognée selon nos besoins. Le seuil de coloration du pixel choisi permet d'obtenir la seconde image de la figure et de déterminer un couvert de 77%.

L'image utilisée pour cette démonstration est une image satellite datant du 19 février 2020 (Figure 40).

Info	
Satellite	RCM
Acquisition Start Date	2020-02-19 11:03:27 GMT
Beam Mode Description	Stripmap 16m Resolution 30km Swath 10
Polarization	HH HV
Orbit Direction	Descending
Beam Mode Type	Medium Resolution 16m
Absolute Orbit	3756.0



Figure 40: Source de l'image (RCM 2020-02-19)

En comparant cette méthode d'analyse avec les cartes d'observation des glaces, il est possible de constater que le désavantage principal est que les heures dépendent de la trajectoire des satellites et la qualité de l'image dépend du couvert nuageux, ce qui implique que l'évaluation aérienne traditionnelle est encore utile lors des événements. D'ailleurs, contrairement aux images satellites quotidiennes, les cartes d'observation des glaces peuvent être réalisées plusieurs fois par jour en fonction des risques.

4.1.1.2 Largeur efficace

Pour ce qui est de la largeur efficace, malgré la contrainte temporelle imposée par les satellites, une évaluation journalière de celle-ci est opérationnellement réalisable. Disposer de cette donnée est primordial afin d'évaluer la capacité d'évacuation de la glace du tronçon et devrait être enregistré dans une base de données afin de créer de meilleurs modèles de prédictions à l'avenir.

4.1.2 Drone

Comme mentionné précédemment, une surveillance aérienne des conditions de glace reste importante afin d'éviter les arrêts de glace dans le tronçon problématique.

Actuellement, la Garde côtière canadienne utilise des hélicoptères afin d'effectuer ces cartes d'observation des glaces. Cette méthode permet à l'opérateur de réaliser la carte qui donne plusieurs informations qualitatives et semi-quantitatives. Afin d'obtenir des informations quantitatives, il pourrait être intéressant d'utiliser un drone. Par la suite, il est possible de réaliser une image 3D ou une orthophoto de la situation, ce qui permet d'obtenir des informations plus quantitatives. L'utilisation d'avion a déjà prouvé son utilité afin d'obtenir des données quantitatives (Meier et coll. 1985), mais l'usage d'un drone pourrait être plus avantageux dans le cas actuel.

Afin de prouver ce concept, une sortie sur le terrain a permis d'obtenir des images et vidéos de la condition de la glace sur le Saint-Laurent.

Ces données ont été réalisées à l'aide du Contixo F22, un drone bas de gamme d'une valeur de 200\$ utilisable lorsque les conditions météorologiques sont clémentes (faible vent et température hivernale plus chaude). Il est évident qu'un drone plus performant serait pertinent d'un côté opérationnel, mais l'objectif était principalement de présenter l'opportunité. (Contixo s.d.).



Motor Model:1020
Camera: 1080P 2.4 GHz WiFi Camera
Satellite Systems: GPA / GLONASS
Remote Controller: 2.4 GHz
Remote Control Distance: 1800 ft
Maximum Flight Time: About 13-15 Mins
Charging Time: About 110 Mins
Integrated 1080p WiFi HD Camera - 75° Vertical, Adjustable (Up & Down)
Follow me allows the Contixo F22 RC quadcopter drone to hover above the GPS-enabled smartphone.

Figure 41: Performance du drone Contixo F22 (Contixo s.d.)

Évidemment, afin d'utiliser cet outil à certaines zones à restrictions, il est nécessaire d'avoir un permis de pilote de drone délivré par Transport Canada.

4.1.2.1 Formation pour les utilisateurs de drones

Pour ce qui est de la formation nécessaire afin de piloter un drone, Transport Canada exige aux pilotes de réaliser certains cours en fonction de l'utilisation du drone et de son poids. Puisque l'appareil utilisé dans cette preuve est d'entre 250g et 25 kg, le pilote doit avoir un certificat d'opération de base. Cette formation peut être suivie dans un centre spécialisé en drones qui permet par la suite, réaliser l'examen de Transport Canada. Ce certificat permet de piloter à une élévation inférieure à 122m. L'opérateur doit avoir un contact visuel constant avec l'appareil, il doit piloter l'appareil à plus de 30 mètres des individus ou des bâtiments et rester à l'extérieur de certaines zones aériennes (aéroport, hélicopter, prison, etc.) (TC, s.d.). Dans le cadre de cette étude, les zones de restrictions sont présentées à la figure et au tableau ci-dessous.

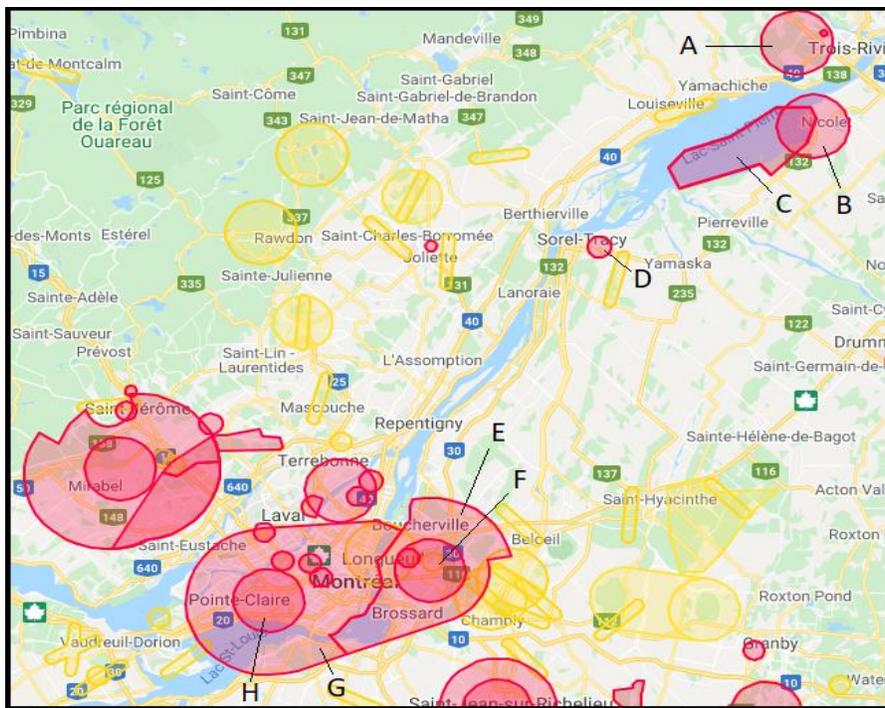


Figure 42: Zones de restriction de vol à considérer dans ce projet

Tableau 4: Informations sur les zones de restriction de vol à considérer dans ce projet (Osvd s.d.)

Zone	Nom	Particularité
A	Trois-Rivières	Aéroport certifié les opérations de base des drones ne sont pas autorisées dans la zone des 3 milles marins indiquée par le cercle rouge.
B	Nicolet	Aérodrome du MDN. Les opérations avec des drones ne sont pas autorisées dans la zone des 3 milles marins indiquée par le cercle rempli en rouge conformément au RAC 901.47 (3). Une partie de la forme sélectionnée chevauche un Espace aérien restreint ou dangereux de classe F. Les opérations RPAS de base ne sont pas autorisées dans ces zones.
C	CYR606 LAC SAINT PIERRE, QC	Espace aérien restreint de classe F: Les opérations SATP de base ne sont pas autorisées dans la zone indiquée par la forme remplie de rouge.
D	Établissement de détention de Sorel	Espace aérien restreint au-dessus des installations de correction provinciales de la région du Québec. Les opérations de drones ne sont pas autorisées dans la zone indiquée par la forme remplie de rouge.
E	St-Hubert, QC [CZ]	Espace aérien de la zone de contrôle: Les opérations SATP de base ne sont pas autorisées dans la zone indiquée par la forme remplie de rouge.
F	ST-HUBERT	Aéroport certifié Les opérations de base des drones ne sont pas autorisées dans la zone des 3 milles marins indiquée par le cercle rouge. Une partie de la forme sélectionnée chevauche une Zone de contrôle, et un Aéroport/Héliport. Les opérations RPAS de base ne sont pas autorisées dans ces zones.
G	Montréal / Aéroport international Pierre Elliott Trudeau, QC [CZ]	Espace aérien de la zone de contrôle: Les opérations SATP de base ne sont pas autorisées dans la zone indiquée par la forme remplie de rouge.
H	PIERRE-ELLIOTT-TRUDEAU INTL	Aéroport certifié. Les opérations de base des drones ne sont pas autorisées dans la zone des 3 milles marins indiquée par le cercle rouge. Une partie de la forme sélectionnée chevauche une Zone de contrôle, et un Aéroport/Héliport. Les opérations RPAS de base ne sont pas autorisées dans ces zones.

De ce fait, un certificat d'opérations avancées peut être nécessaire dans certains secteurs du site de l'étude. (TC, s.d.) Il est possible de noter que le côté administratif a déjà désenchanté certaines organisations d'utiliser un drone lors de leurs opérations (RC s.d.) En effet, cet aspect peut faire en sorte qu'il est plus facile de mandater des services à l'externe.

4.1.2.2 Concentration de la glace en transit

Lors de deux sorties terrain réalisées à la hauteur de Trois-Rivières et de Donnacona, il a été possible de réaliser des photographies des conditions de glace sur le fleuve Saint-Laurent. À partir de ces images, l'usage d'un script similaire à celui présenté précédemment permet de fournir le pourcentage de concentration de glace en transit sur le fleuve.

```

from IPython.display import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import cv2
#importer l'image
image=cv2.imread('StlawIce.png')
#montrer l'image
imgplot = plt.imshow(image,'gray')
plt.show()
#choix du seuil de coloration RGB
boundaries = [[(0,0,0],[160,150,200])]
for (low, up) in boundaries:
    low = np.array(low,dtype='uint8')
    up = np.array(up,dtype='uint8')

    mask = cv2.inRange(image,low,up)
    output = cv2.bitwise_and(image,image, mask= mask)

    #Compter le nombre de pixel pour avec la condition limite de couleur et
    #la diviser par le nombre total de pixel de l'image.
    pix_count=np.count_nonzero(output)
    print('Nombre de pixel hors du seuil',pix_count)
    size2=np.count_nonzero(image)
    print ("Le nombre total de pixel est =", size2)
    Ratio = round((pix_count/size2),2)

    print('Le pourcentage de zone sans glace', Ratio)
    print('Ainsi, le couvert de glace recouvre la zone de',1-Ratio)

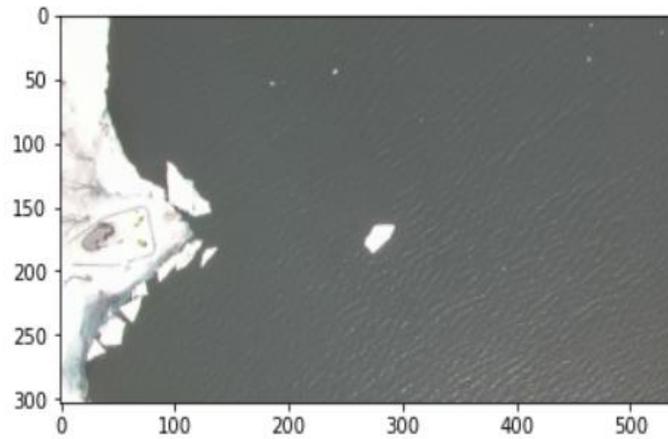
    cv2.imshow('image',np.hstack([image, output]))
    cv2.waitKey(0)

    imgplot2=plt.imshow(output)
    plt.show()

```

Figure 43: Script permettant de déterminer la concentration de glace en transit à l'aide d'images par drone.

Il est alors possible d'obtenir les résultats présentés à la figure suivante qui utilise le nombre de pixels pour déterminer les zones avec et sans glace.



Nombre de pixel hors du seuil 432372
 Le nombre total de pixel est = 492678
 Le pourcentage de zone sans glace 0.88
 Ainsi, le couvert de glace recouvre la zone de 0.12

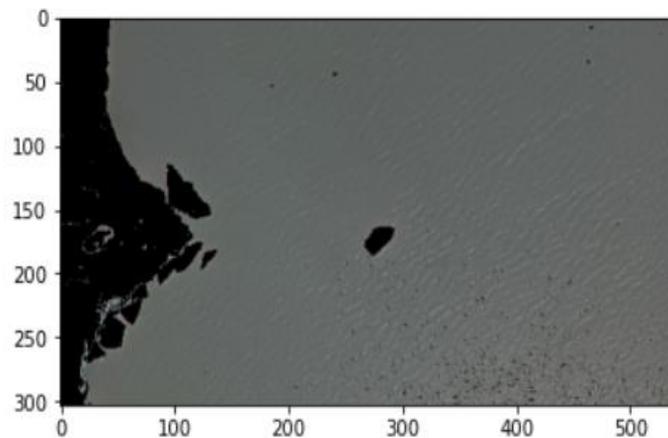


Figure 44: Concentration de glace en transit selon le script de traitement d'image.

Cette image comprend une partie de la glace de rive. Notons qu'afin d'utiliser ce script adéquatement pour la concentration de glace en mouvement, il est pertinent de rogner l'image afin de seulement traiter la partie du chenal libre de couvert de glace. De plus, les drones peuvent avancer à la vitesse de la glace et ainsi, la quantifier.

4.1.2.3 Quantification des zones d'intérêts

Éventuellement, il est possible d'utiliser le drone afin de quantifier ou d'étudier certaines zones d'intérêts comme le couvert de glace de l'estacade de Lavaltrie le 15 janvier 2019. Une méthode rapide est de réaliser une vidéo de la situation sur le terrain. Cette vidéo peut être séparée en plusieurs images qui permettent de mieux interpréter la situation.



Figure 45: Exemple d'image réalisé par la séparation de la vidéo en image (3fps)

Éventuellement, à l'aide d'un logiciel de traitement d'image, il est possible d'accumuler ces images pour produire une image 3D. Deux exemples d'images 3D réalisées à partir de deux vidéos distinctes sont présentés ci-dessous.

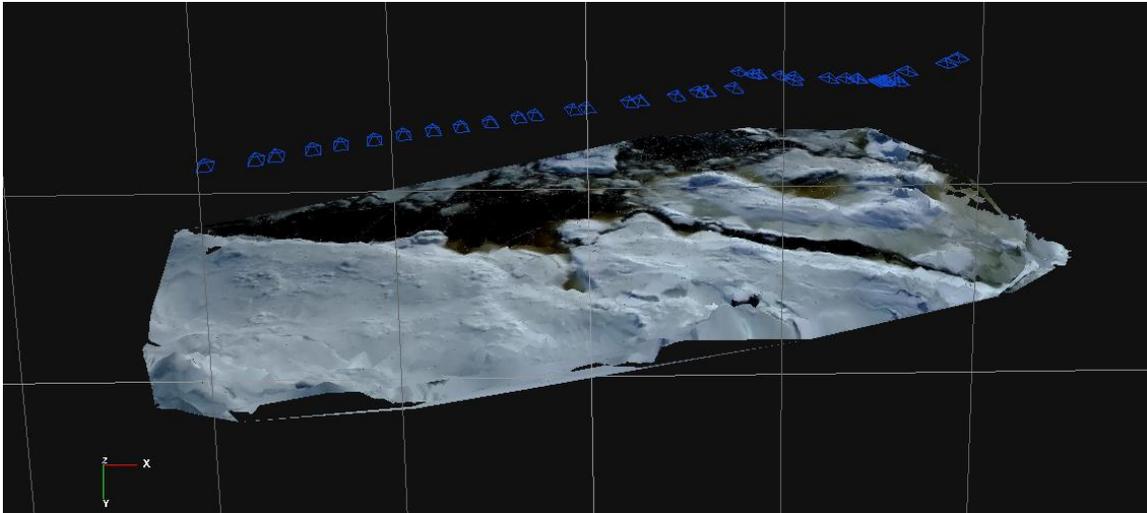


Figure 46: Exemple d'image 3D (vidéo 20 secondes, 2fps).

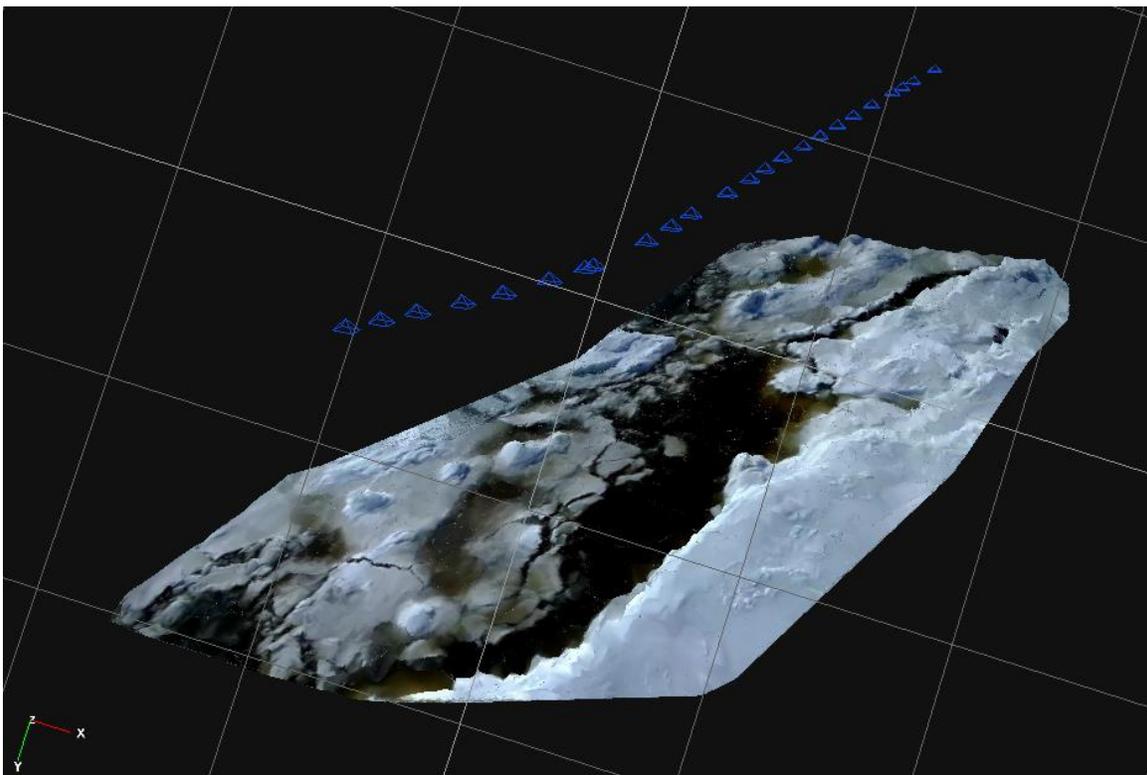


Figure 47: Exemple d'image 3D (vidéo 7 secondes, 3fps).

Finalement, l'intérêt de réaliser une image 3D de la situation est de mieux interpréter la situation sur le terrain et de pouvoir quantifier certaines dimensions de glaces sur le terrain à l'aide des outils disponibles sur le logiciel de traitement d'image. Par exemple, l'outil de

mesure permet de mesurer certaines dimensions lorsqu'on a une mesure de référence sur l'image.

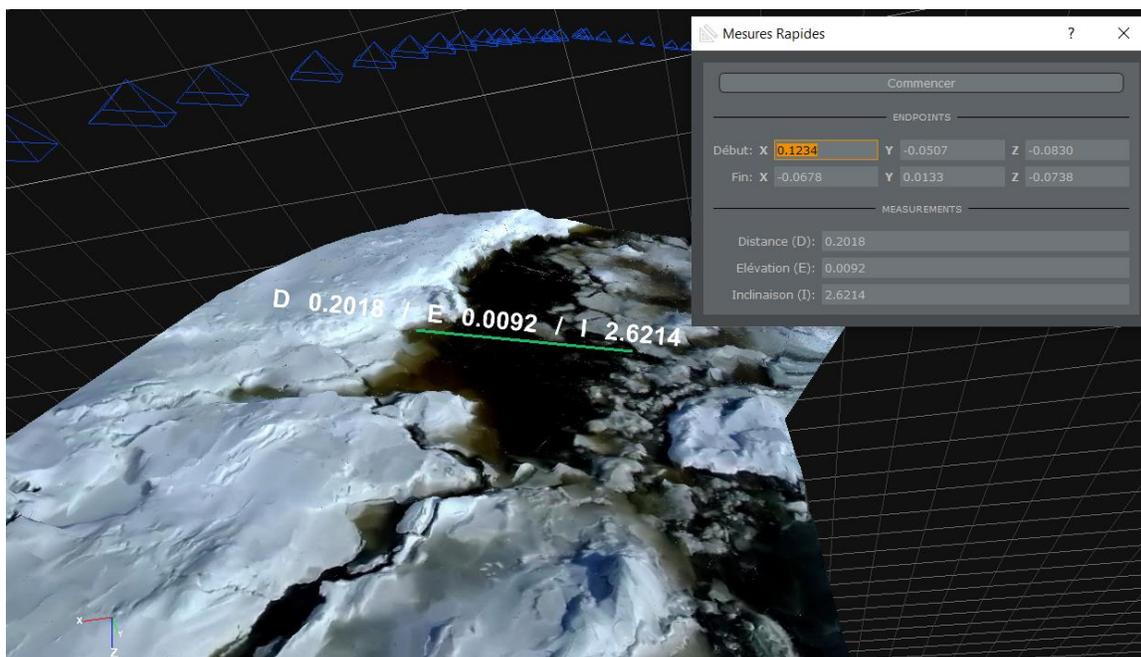


Figure 48: Potentiel de l'outil de mesure afin de caractériser un amas de glace.

Une structure de dimension connue devrait se trouver dans l'image 3D à titre de référence.

Afin de réaliser ces images, l'outil 3D Zephyr free trial (3DZF s.d.) a été utilisé. Cette plateforme a été privilégiée dû à son accès gratuit. Cette utilisation gratuite limite le nombre de photos à 50 pour la réalisation des modèles.

D'un point de vue technologique, les drones sont assez matures afin de réaliser un outil opérationnel de première génération (Colomina et coll. 2014). Évidemment, il est à se demander si cet outil pourrait être utilisé à plus grande échelle afin d'obtenir les images de l'ensemble du territoire d'intérêt. Une patrouille aérienne en avion réalisé sur le fleuve St-Laurent a permis de constater la limite du drone.

Sachant qu'un système d'estimation du déplacement de la glace a été réalisé en utilisant en partie la photogrammétrie (Hagen et coll. 2014), il serait pertinent de développer cette ressource afin d'évaluer la vitesse de la glace.

4.2 Outil d'aide à la décision

Afin d'éviter la formation d'embâcles, il est important de bien gérer les ressources présentes sur le terrain (ex. : brise-glaces, estacades, etc.). Pour ce faire, les responsables doivent utiliser des données fiables et pertinentes afin d'éclairer leurs décisions. Évidemment, l'expérience permet une gestion efficace, mais une fois combinée avec un outil d'aide à la décision riche en information, il est possible d'atteindre une gestion optimale. Les spécialistes se fient déjà sur des données météorologiques. L'outil d'aide à la décision utilise ces données afin de réaliser des indicateurs permettant aux spécialistes de consolider leurs hypothèses. De plus, il a été montré qu'il est important d'avoir une base de données centralisées comportant des données sur les glaces (Kovachis et al. 2018).

Un outil d'aide à la décision permet de répondre à la treizième recommandation de Morse et Scalabrini (2020).

13- Il faut construire et exploiter un outil de gestion des données qui transforme les données, les observations, les prévisions quotidiennes en information utile pour la gestion des glaces et de la voie navigable hivernale.

4.3 LSPriCE

Un prototype d'outil a été produit et sera présenté dans la prochaine section. Le produit porte le nom LSPriCE pour : Lac Saint-Pierre, risque d'arrêt et Indice de la Capacité d'Évacuation. L'objectif de ce produit est tout d'abord, de regrouper des indicateurs pertinents afin de prédire les risques de formation d'arrêts et d'embâcles et ensuite, permettre aux spécialistes d'utiliser ces indicateurs afin de guider leurs interventions. La figure 49 est une image de la page d'accueil de l'outil LSPriCE.



Figure 49: Affichage d'accueil de l'outil d'aide à la décision LSPriCE

4.3.1 Langage de programmation

Cette interface pourrait être réalisée avec plusieurs différents langages de programmation. Le choix d'utilisation du langage Python vient de sa convivialité et du fait qu'il s'agit d'une source ouverte.

La bibliothèque Streamlit (Streamlit, s.d.) permet de rapidement créer une application de gestion et de visualisation des données afin de faciliter la gestion des glaces.

4.3.2 Données d'entrée

Comme discuté précédemment dans ce rapport, une multitude de paramètres influencent la gestion des glaces sur le fleuve Saint-Laurent. Voici l'ensemble des informations nécessaires afin d'utiliser l'application.

- Pourcentage de formation du couvert de glace
- Concentration de glace en transit dans le chenal
- Coefficient de transfert de chaleur
- Temps/Période
- Température moyenne
- Vecteur vent (vitesse et direction)
- Précipitation de neige
- Vitesse du courant
- Marée
- Rayon des floes de glace en transit
- Épaisseur de la glace
- Largeur efficace du chenal

Les figures suivantes montrent un visuel de ce que l'utilisateur voit lorsqu'il remplit la section donnée de l'interface.

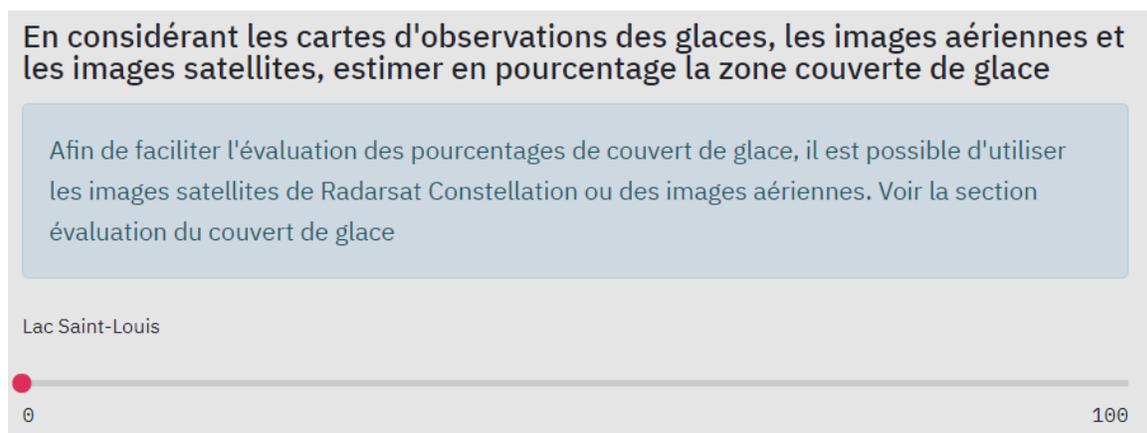


Figure 50: Capture d'écran de l'outil: Pourcentage du couvert de glace

Dans le cas présent, un pourcentage du couvert de glace est utilisé afin d'estimer la production de glace dans les prochaines heures. Il est important de connaître le pourcentage pour l'ensemble du territoire d'intérêt soit du lac Saint-Louis jusqu'au tronçon problématique (secteurs présentés à la figure 7).

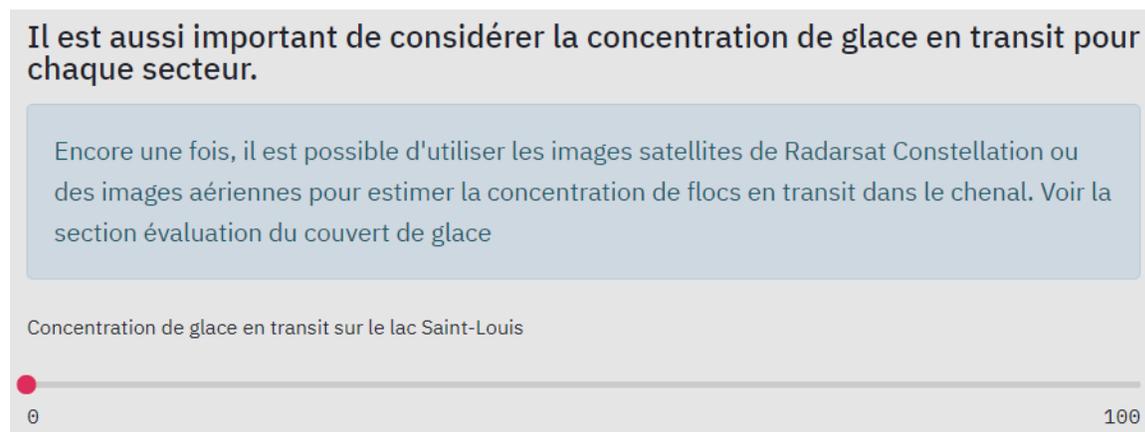


Figure 51: Capture d'écran de l'outil: Concentration de glace en transit

Il en est de même pour la concentration de glace en transit, car cette concentration réduit la surface libre, soit l'aire d'échange thermique entre l'eau et l'air.

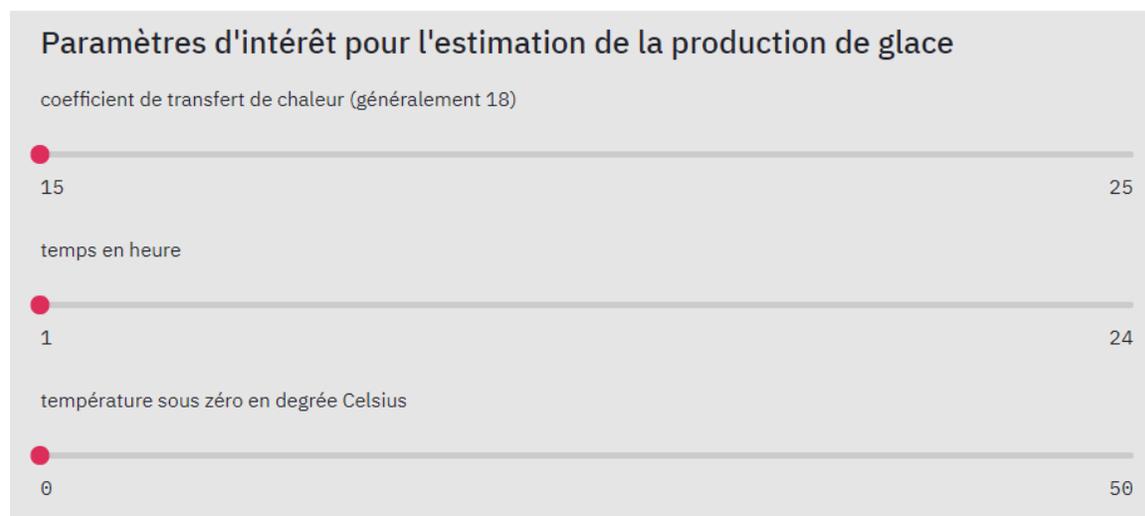


Figure 52: Capture d'écran de l'outil: Coefficient de transfert de chaleur, temps et température sous zéro.

Évidemment, afin de pouvoir utiliser adéquatement l'équation de transfert d'énergie présenté par Beltaos (1995), il faut estimer le coefficient de transfert de chaleur, la durée et la température moyenne de l'air. L'hypothèse est que la température de l'eau est de 0 °C. Les

augmentations de température de l'eau engendrée par les rejets d'eaux usées et autres sources thermiques potentielles sont négligées.

La vitesse et la direction de vent sont des paramètres essentiels afin d'estimer la capacité d'évacuation du tronçon problématique (Figure 53).

Les précipitations de neiges influencent la production de glace, car elles refroidissent rapidement l'eau afin de former de la glace. L'hypothèse est que chaque centimètre de neige précipité se résulte en un centimètre de glace produite (Figure 54).

L'estimation de la vitesse du courant peut se faire à l'aide d'observations et/ou par des modèles hydrauliques d'Environnement Canada. Il en est de même pour l'épaisseur de la glace, les radius des floes et la largeur efficace (Figure 55).

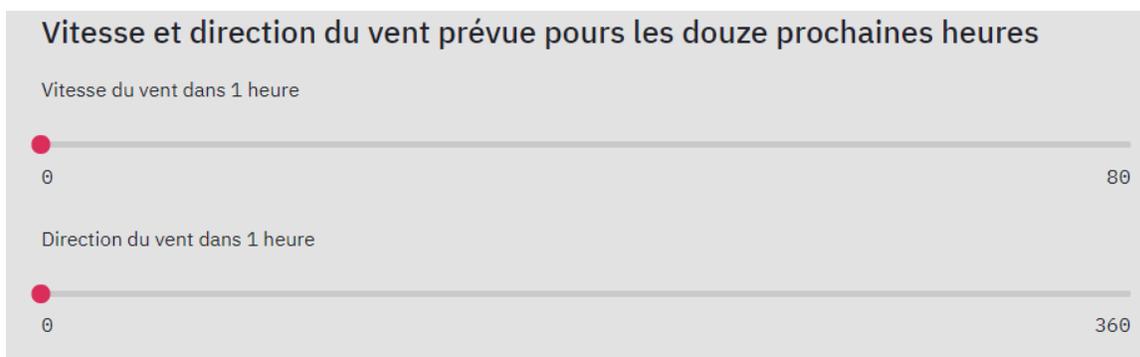


Figure 53: Capture d'écran de l'outil: Vitesse et direction du vent

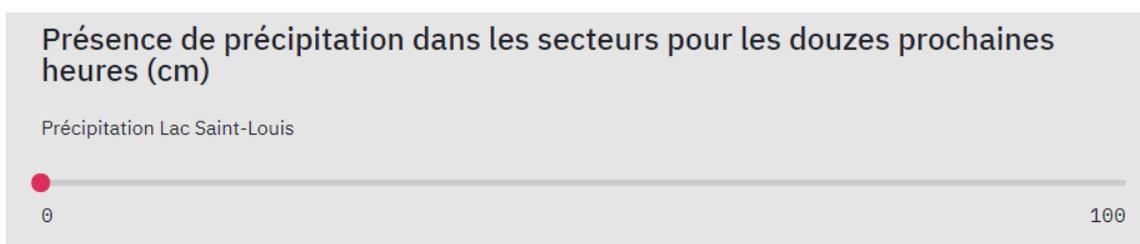


Figure 54: Capture d'écran de l'outil: Précipitations de neige

Paramètres d'intérêt pour l'évaluation de la congestion

Vitesse du courant dans le tronçon problématique (m/s)

0.1

Marée actuelle sur le Saint-Laurent. Note: 0) haute, 3) mi-marée, 5) basse.

1

Radius des floes de glace en transit (m)

0 250

Épaisseur de la glace (m)

0.1

largeur efficace (m)

0 500

Figure 55: Capture d'écran de l'outil: Vitesse du courant, radius des floes, épaisseur de glace et largeur efficace.

4.3.3 Évaluation de la production de glace

Une fois que l'utilisateur incorpore l'ensemble des paramètres, la quantité de glace produise est estimé selon l'équation 2.7 de Lindenschmidt (2020) :

$$V_i = \frac{H_{wi}A(T_a - T_w)\Delta t}{\rho_i \lambda} \quad (15)$$

Où H_{wi} est le coefficient de transfert de chaleur de la glace variant entre 15 et 25 W/m²/°C, A l'aire de surface libre, T_a la température de l'air, T_w la température de l'eau (l'hypothèse est que cette température est de 0 °C), Δt est le temps, ρ_i est la densité de la glace (920 kg/m³) et

λ est la chaleur de fusion (334,944 J/kg). Cette équation permet d'estimer le volume de glace produit dans chaque secteur d'intérêt.

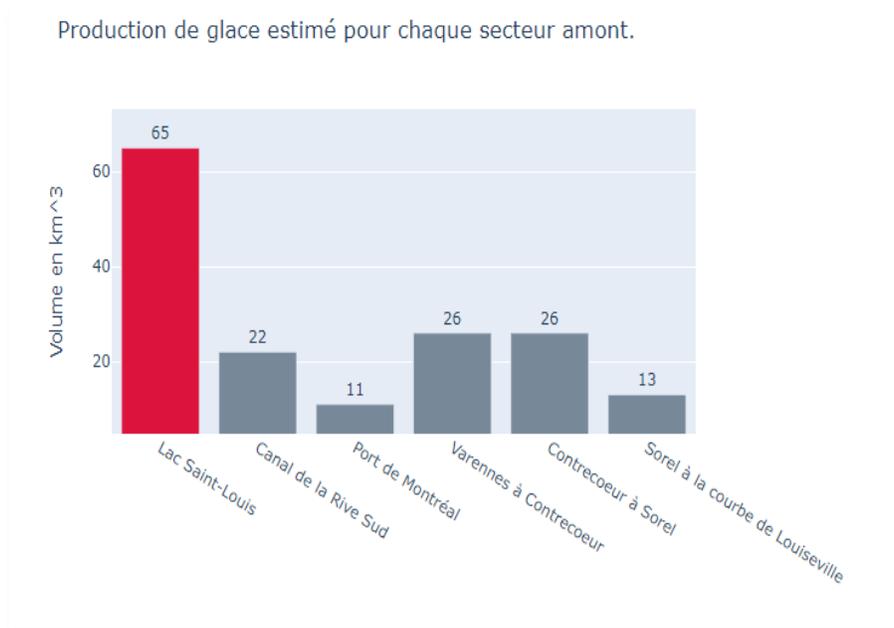
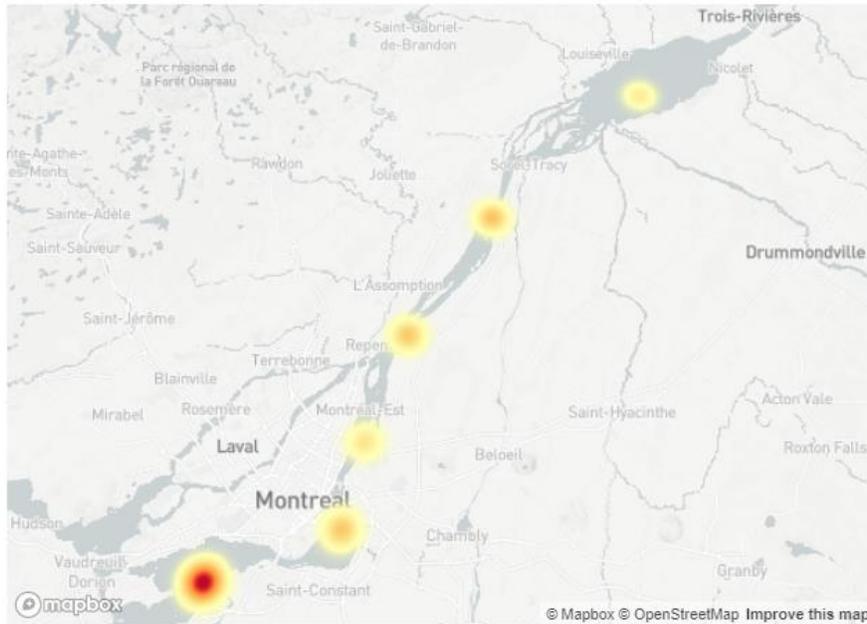


Figure 56: Capture d'écran de l'outil: Histogramme de la production de la glace (exemple).

Il est alors possible de visualiser les zones responsables en plus grande majorité de la production de glace. Cette connaissance permet à l'utilisateur d'interpréter qu'une production massive en amont augmentera les risques d'arrêt plus tardif qu'une production dans un secteur plus à l'aval.

l'aire tributaire à la production de glace en fonction des pourcentages reportés est
1919240000000 m2



Le volume de glace produit pour la durée sélectionnée est de 7264684661108.851 m3 soit
environ 7265 km3

Figure 57: Capture d'écran de l'outil: Visualisation de la production de la glace sur le territoire.

4.3.4 Vitesse de la glace

Par la suite, selon des observations et/ou selon les équations 10 et 11, il est possible d'estimer la vitesse de la glace. Cette vitesse est nécessaire afin de prévenir la formation d'arrêt sur le tronçon problématique. Il permet aussi à l'utilisateur de prévoir le moment le plus opportun à l'utilisation de ces ressources (brise-glaces, patrouilles, etc.).

Vitesse de la glace

Cette section permet une estimation de la vitesse de la glace dans le tronçon à risque du Lac Saint-Pierre.

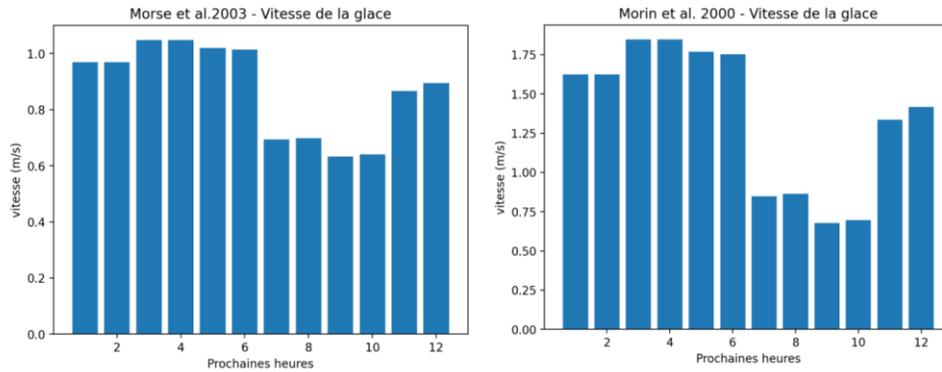


Figure 58 : Capture d'écran de l'outil : Vitesse de la glace selon l'équation 10 [Morse (2003)] et l'équation 11 [Morin (2000)]

Même si chacun des modèles ne prédit pas nécessairement la même vitesse de glace, ils soulignent tous deux que la période la plus à risque d'arrêt dans la prochaine demi-journée est dans 4 à 8h.

4.3.5 Congestion

Avec la production de la glace, un débit de glace peut alors être calculé. Pour ce faire, le volume de glace produit est divisé par la longueur de chaque secteur pour être ensuite multiplié par la vitesse de glace approximée ultérieurement.

Ce débit est alors comparé à la capacité d'évacuation de la glace selon les modèles de vitesse. Cette capacité est déterminée en multipliant l'épaisseur estimée de la glace par la vitesse de la glace de chaque modèle.

Comparaison entre le débit et la capacité

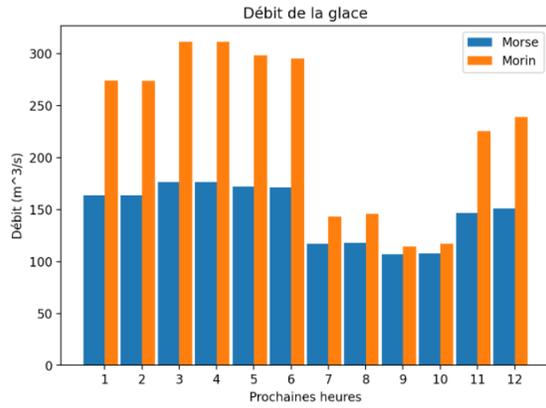
Débit de la glace en m^3/s en fonction du secteur comparé avec la capacité d'évacuation selon les modèles de vitesse de la glace

Sélectionner le secteur produisant le plus de glace.

Lac Saint-Louis

La capacité prend en considération la largeur efficace, l'épaisseur approximative des floes et la vitesse de la glace. Par la suite, elle est comparé avec le débit de la glace.

Secteur du Lac Saint-Louis



Chenal de navigation sur le lac Saint-Pierre

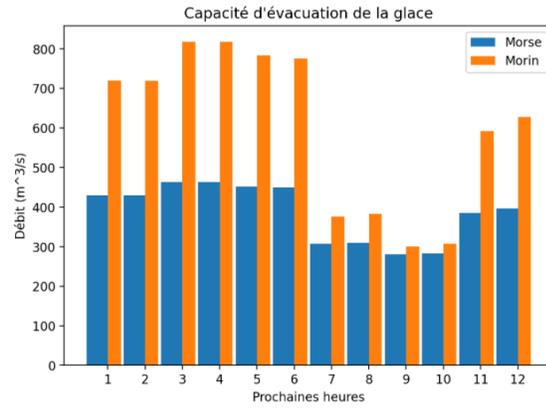


Figure 59: Capture d'écran de l'outil : Comparaison du débit de glace et de la capacité d'évacuation selon les modèles de vitesse de la glace et le secteur.

Une comparaison entre le débit de glace critique et la capacité d'évacuation associée permet de réaliser un rapport qui est affiché sous la forme de l'indicateur suivant.



Figure 60: Capture d'écran de l'outil : Indicateur comparant du débit de glace et de la capacité d'évacuation selon les modèles de vitesse de la glace et le secteur.

Lorsque la capacité est inférieure au débit de glace (inférieur à 1), les risques d'arrêt sont plus élevés.

4.3.6 Fonction de régression pour l'estimation de la concentration de glace.

La prédiction d'embâcles est une majeure partie des avancées dans l'application de modèle présenté par Rokaya et coll. (2018). Différents types de modèles ont été utilisés afin de prédire des événements d'embâcles comme la régression logistique (White, 1996), régression linéaire (Na Dong, 2011 (progression du couvert de glace), logique floue « Fuzzy Logic » (Mahabir et al. 2008), réseaux de neurones artificiels « ANN » (Massie et al. 2002; Wang et al. 2010; Zhao et al. 2012) et autres (Mahabir et al. 2006, 2007).

La rareté de la présence d'embâcles et de données historiques sur les arrêts fait en sorte que l'usage d'une classification binaire (présence ou absence) ne comprend pas suffisamment de données pour entraîner le modèle. Cependant, une fonction de régression utilisant comme données de sorties la concentration de glace en transit, comporte suffisamment de données pour entraîner un modèle fiable. Considérant que la revue de la littérature a démontré que les arrêts et les embâcles de glace dépendent en partie de la température et du vecteur vent (intensité et direction), une nouvelle régression linéaire regroupant ces paramètres a été réalisée dans ce mémoire. L'objectif de cette régression est d'estimer la concentration de glace en transit future dans le tronçon afin de permettre à l'utilisateur de mieux évaluer les risques d'arrêts. Pour ce faire, la méthodologie présentée à la figure ci-dessous a été utilisée.

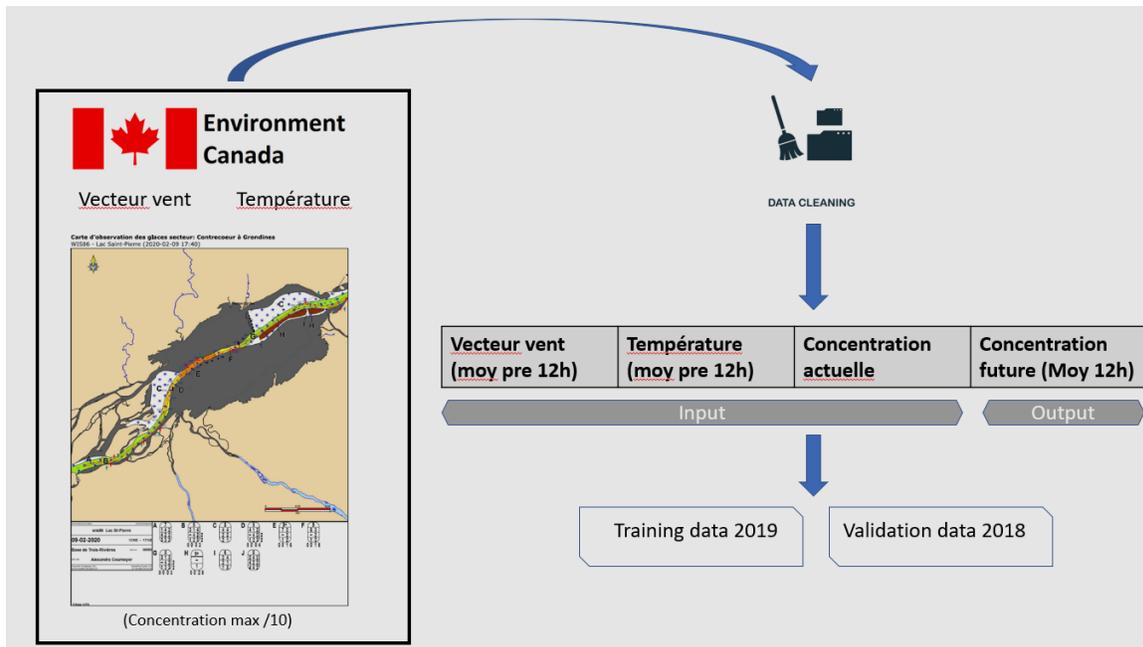


Figure 61: Méthodologie de la régression de concentration de glace en transit future.

Tout d'abord, les vecteurs de vents sont orientés dans le sens du courant 60^0 et une moyenne des douze dernières heures est déterminée. Une moyenne de température du même délai est aussi déterminée avec la concentration actuelle dans le tronçon. La « concentration actuelle » est nommée comme étant la dernière concentration enregistrée par les cartes d'observations des glaces. La concentration choisie est toujours la plus grande observée dans l'une des sections du tronçon.

Évidemment, afin d'améliorer la performance de cette régression, les valeurs d'entrée d'entraînement et de validation incluent les périodes lorsque la largeur efficace est réduite à près de 500 m. Ce choix a été fait afin de réduire l'influence de la largeur efficace dans cette régression.

À l'aide des paramètres, il a été possible d'obtenir la régression suivante.

$$C_f = 0.8899655C_a - 0.05571728T_{moy\ 12} - 0.02270647V_{v\ 12} + 0.17218385 \quad (15)$$

Où C_f est la concentration future, C_a la concentration actuelle (dernière connue), $T_{moy\ 12}$ la moyenne de la température de l'air à Sorel dans les douze dernières heures et $V_{v\ 12}$ la moyenne du vecteur vent dans les douze dernières heures.

Cette régression a été obtenue en utilisant le script suivant. Ce script utilise la bibliothèque Scikit-Learn dans Python (Scikit-Learn, s.d.).

```

import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn import linear_model
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error

dataframe = pd.read_excel("traindataLSP2019final.xlsx", header=None)
dataset = dataframe.values
print(dataset.shape)
# split into input (X) and output (Y) variables

x=dataset[:,0:3]
y=dataset[:,3]
y=np.reshape(y, (-1,1))
print(x)
print(y)
scaler_x = MinMaxScaler()
scaler_y = MinMaxScaler()
print(scaler_x.fit(x))
xscale=scaler_x.transform(x)
print(xscale)
print(scaler_y.fit(y))
yscale=scaler_y.transform(y)
print(yscale)

X_train=x
y_train=y

reg=linear_model.LinearRegression()
reg.fit(X_train,y_train)

mx=reg.coef_
print(mx)
b=reg.intercept_
print(b)

dataframe2 = pd.read_excel("testdataLSP2018final.xlsx", header=None)
dataset2 = dataframe2.values
Xnew=dataset2[:,0:3]
yreal=dataset2[:,3]

ynew=reg.predict(Xnew)

mae=mean_absolute_error(yreal, ynew)
print(mae)
mse=mean_squared_error(yreal, ynew)
print(mse)
plt.plot(ynew)
plt.plot(yreal)
plt.title("Régression linéaire de concentration future sur le tronçon problématique du Lac Saint-Pierre")
plt.xlabel("Nombre d'heures lorsque la largeur efficace est inférieure à 500m")
plt.ylabel("Concentration /10")
plt.legend(('Calculée 2018', 'Observée 2018'))

```

Figure 62: Python: Script utilisé afin d'obtenir la régression linéaire de la concentration future de glace en transit.

Ce script permet de percevoir que l'erreur moyenne absolue (Mean Absolute Error MAE) de la régression est de 1.4 et que son erreur quadratique moyenne (Mean Squared error MSE) est de 3.4. Ces valeurs élevées indiquent que le modèle pourrait nécessiter des améliorations à l'avenir. Cependant en observant la figure 63, il est possible d'avoir une autre conclusion.

Régression linéaire de concentration future sur le tronçon problématique du Lac Saint-Pierre

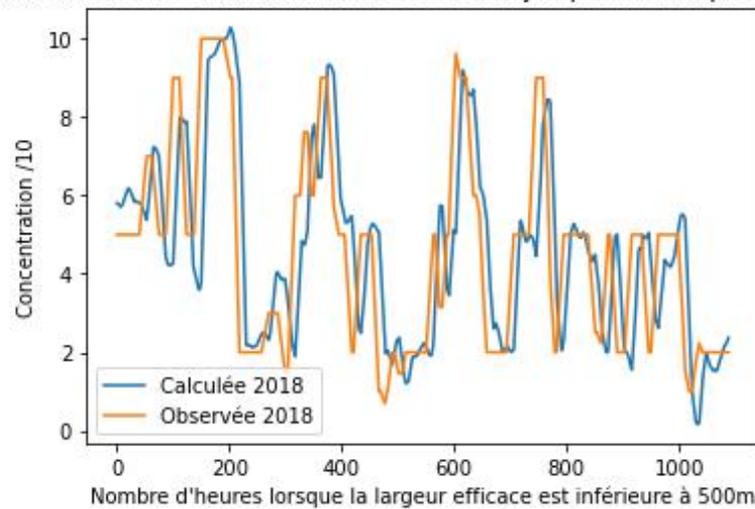


Figure 63: Régression linéaire de la concentration future sur le tronçon problématique du lac Saint-Pierre.

En effet, comme montré dans la figure précédente, le modèle semble avoir de la difficulté à déterminer les concentrations futures lorsque la concentration est faible (inférieure à 6). Cependant, on constate qu'elle est assez efficace pour calculer les valeurs plus critiques de concentration (supérieure à 6). De ce fait, cette régression reste tout de même un outil pertinent afin de bonifier l'outil d'aide à la décision. Le problème majeur causant ces fortes valeurs d'erreurs vient probablement du déphasage perceptible dans la figure précédente. Il serait intéressant de continuer de développer le modèle et de voir si une augmentation du nombre de données d'entraînements pourrait réduire ce déphasage et améliorer les performances de celui-ci.

Ainsi, il est maintenant possible d'ajouter cette régression à l'outil d'aide à la décision LSPriCE.

Vecteur de vitesse du vent moyen connu

Vecteur de vitesse du vent moyen



Vecteur de vitesse du vent moyen inconnu

Température moyenne des douze dernières heures



Concentration actuelle dans le tronçon problématique



La concentration future à prévoir dans les prochains 12h est 62 %

Figure 64: Estimation de la concentration future de glace en transit (vecteur de vitesse = -20 et température = -20 avec une concentration initiale de 50% de glace en transit).

4.3.7 Résumé de l'outil

L'interface est un prototype qui pourrait répondre rapidement aux besoins présentés par la treizième recommandation. Il est certain qu'une première version exigera des améliorations à la suite de son utilisation afin d'augmenter ses performances opérationnelles, mais il s'agit d'un premier pas vers un outil d'aide à décision pour la surveillance des arrêts de glace sur le lac Saint-Pierre.

Conclusion et recommandations

Ce mémoire se conclut en présentant un bilan des conditions générales et spécifiques de l'hiver 2018-2019 ayant favorisé la formation des trois embâcles du 21 au 26 janvier, 31 janvier au 1 février et du 14 au 15 février 2019. Les avantages des outils proposés et des recommandations sont aussi présentés.

Conditions des embâcles de l'hiver 2018-2019

Lors de l'hiver 2018-2019, trois embâcles de glace ont provoqué une suspension de la navigation commerciale sur le fleuve pour une dizaine de jours.

Les degrés-jours de gel de l'hiver 2018-2019 progressent similairement à l'hiver 2016-2017 jusqu'à la mi-janvier où une vague de froid dans le secteur engendre une production importante de glace en amont du lac pour cette période. L'hiver 2019 est remarquable considérant que la formation des couverts de glace a nécessité 320 DJG comparativement à des valeurs de 151, 277 et 268 DJG pour les hivers de 2015 à 2018. Les couverts formés par les estacades en amont tardaient à se former. Une grande surface libre de glace était disponible pour permettre la formation de glace comme le lac Saint-Louis.

Dans les journées précédant les arrêts de 2019, les températures ajustées atteignaient -27 °C, -22 °C et -16 °C pour les embâcles 1, 2 et 3 respectivement. De forts vents d'environ 12 à 15 m/s de direction NE sont aussi observés. Les précipitations de neiges varient entre 10 et 14 cm pour ces périodes.

Une diminution du débit du fleuve a été observé à la mi-janvier. Pour ce qui sont des niveaux d'eau lors des trois périodes d'embâcles de l'hiver 2019, le niveau d'eau à la station de Sorel a eu une plus grande augmentation que celle en aval du Port Saint-François.

Proposition d'outils

Les opportunités de télédétection et d'outil d'analyse d'aide à la décision discutés dans ce mémoire permettent de répondre aux besoins :

- (1) d'avoir des prévisions de débits de production de glace (Q_g) et de la capacité d'évacuation de glace (Q_{gc}) en faisant la surveillance précoce des conditions sur le fleuve, en ayant des prévisions de météo et en bâtissant et exploitant des modèles validés pour les simuler → LSPrICE
- (4) d'avoir de données fiables → Télédétection
- (5) d'avoir des prévisions pertinentes → LSPrICE
- (6) d'avoir des outils d'aide à la décision → LSPrICE
- (10) d'évaluer la surface libre en permanence afin de mieux prédire le débit de glace (Q_g) → Télédétection
- (11) de quantifier la largeur efficace (B_g) qui est difficilement interprétable sur les cartes d'observation des glaces → Télédétection
- (12) de quantifier la vitesse de la glace V_g → Télédétection & LSPrICE
- (13) d'avoir un outil de gestion des données qui transforme les données, les observations, les prévisions quotidiennes en *information* utile pour la gestion des glaces et de la voie navigable hivernale → LSPrICE

Il serait intéressant de continuer de développer le modèle et de voir si une augmentation du nombre de données d'entraînements pourrait réduire le déphasage et améliorer les performances de celui-ci.

Recommandations

Les recommandations n'ayant pas été discutées explicitement dans ce mémoire correspondent davantage au côté opérationnel et nécessitent un suivi particulier:

- (1) améliorer de la capacité et la fiabilité des radars afin de mieux s'outiller dans la prise de décision;
- (3) proactivement élargir la largeur effective entre les couverts de glace sur le lac Saint-Pierre (B_g);
- (7) s'assurer d'utiliser l'expertise professionnelle dans le domaine du génie des glaces ;
- (8) s'assurer une bonne concertation entre les différents partenaires ;
- (9) continuer à travailler les embâcles avec les brise-glace disponibles afin de sortir du cercle d'intensification des embâcles le plus rapidement possible ; et
- (14) ajouter une section aux estacades de Lanoraie et de Lavaltrie.

De plus, il sera possible avec le temps de réaliser un historique imposant de données d'intérêts comme la vitesse réelle de la glace, la largeur efficace et la surface libre. Ces données pourront être utilisées afin de produire de meilleurs modèles de prévision et gestion. À ce moment, il suffira d'ajouter ces nouveaux modèles à l'outil d'aide à la décision.

Pour ce qui sont des neuf éléments spécifiques du lac Saint-Pierre, ils rendent le bief de la Courbe Louiseville au bassin Yamachiche très vulnérable à l'initiation d'embâcles. Il faut surveiller les neuf éléments et les contrôler pour éviter les arrêts de glace; sinon, on est entraîné dans un cercle d'intensification des embâcles. Dans le cas d'un arrêt de glace, il faut intervenir le plus rapidement possible pour prévenir la formation d'embâcle qui nuit à la navigation hivernale et rend les municipalités vulnérables à des inondations.

Bibliographie

- Ackermann, N.L., and Shen, H.T. (1983). Mechanics of ice jam formation in rivers. CRREL Report 83-31, *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, Hanover, N.H.
- Altena, B., & K b Andreas. (2021). *Quantifying river ice movement through a combination of european satellite monitoring services*. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 98.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102315>
- Archives de Montréal : Montréal (Québec). Service des affaires institutionnelles (1992-1994), *Inondation rue des Commissaires :1886 / Leclerc. – Reproduction le 13 janvier 1969*. Cote : CA M001 VM094-Y-1-17-D1709, web : [Inondation rue Des Commissaires : 1886 / Leclerc . - Reproduction le 13 janvier 1969 - Archives de Montréal \(ica-atom.org\)](https://www.ica-atom.org), consulté le 01-08-2021
- Baird, (2013). Water Level Modeling on the St. Lawrence River, *Influence of Ice on Water Levels*, for Fisheries and Oceans Canada, Canadian Coast Guard from W.F. Baird & Associates Coastal Engineers Ltd.
- Becket, M. A., Dow, K. E., & Clark, S. P. (2021). *Development of an ice jam database and prediction tool for the lower red river*. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 46(1-2), 73–86.
<https://doi.org/10.1080/07011784.2021.1898479>
- Beltaos S. (1995). River Ice Jams. *Water Resources Publications*: Highlands Ranch, CO.
- Beltaos, S. (2000). Advances in river ice hydrology. *Hydrological Processes*, 14(9), 1613–1625. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20000630\)14:9<1613::AID-HYP73>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000630)14:9<1613::AID-HYP73>3.0.CO;2-V)
- Beltaos S. (2008). River Ice Breakup. *Water Resources Publications*: Highland Ranch, CO.
- Codère, Jean-François. (24 janvier 2019), Voie maritime du Saint-Laurent: un embâcle qui coûte cher aux armateurs. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/affaires/economie/transports/201901/24/01-5212192-voie-maritime-du-saint-laurent-un-embacle-qui-coute-cher-aux-armateurs.php> le 31 janvier 2020
- Cooper, M., & Smith, L. (2019). Satellite remote sensing of the greenland ice sheet ablation zone: a review. *Remote Sensing*, 11(20), 2405–2405.
<https://doi.org/10.3390/rs11202405>
- Danys, J.V. (1978) Ice management of Lac St. Pierre, Quebec, *Canadian Journal of Civil Engineering.*, 5, 374-390

- De Munk, S., Gauthier, Y., Bernier, M., Chokmani, K., Légaré, S. (2017) River predisposition to ice jams: a simplified geospatial model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17 pp.1033-1045
- Dong, Na. (2011). Border Ice Processes on the Saint Lawrence River. Mémoire de maîtrise, *Université Laval*.
- Durnford, D., Fortin, V., Smith, G., Archambault, B., Deacu, D., Dupont, F., MacDermid, S., Martinez, Y., Klyszejko, E., Mackay, M., Liu, L., Pellerin, P., Pietroniro, A., Roy, F., Vu, V., Winter, B., Yu, Wei, Spence, C., Bruxer, J., Dickhout, J. (2017). *Toward an Operational Water Cycle Prediction System for the Great Lakes and St. Lawrence River*. Bulletin of the American Meteorological Society. 99. 10.1175/BAMS-D-16-0155.1.
- Ehrman J.K, Wall A., Clark S.P. (2019), *Ice Roughness Estimation via Drone Photogrammetry*, University of Manitoba, Conference poster, CRIPE 19th repéré: <http://www.cripe.ca/docs/proceedings/20/Ehrman-et-al-2019.pdf>
- Hicks, F. (2016). An introduction to River Ice Engineering for civil Engineers and Geoscientists, CreateSpace Independent Publishing Platform 170 p.
- Geldsetzer, Torsten & Sanden, J.J. & Brisco, B. (2010). Monitoring lake ice during spring melt using RADARSAT-2 SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 36. 391-. 10.5589/m11-001.
- Gerard R, Davar KS. (1995). Introduction. dans *River Ice Jams*. Beltaos S (ed.) Water Resources Publications: Highlands Ranch, Colorado, 1-28
Gouvernement du Canada, Garde côtière canadienne, région du Centre et de l'Arctique, *Carte des glaces*,
Repéré: <https://www.marinfo.gc.ca/fr/glaces/tableaubord.asp?CmbSecteurs=1&CmbSousSecteurs=8&InputDateDebut=2019-01-14&InputDateFin=2019-02-15&Order=Date&CmbSubmit=Soumettre>.
- Klemas, V. (2013). Airborne remote sensing of coastal features and processes: an overview. *Journal of Coastal Research*, 29(2), 239–255. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00107.1>
- Kovachis N., Burrell B.C., Huokuna M., Beltaos S., Turcotte B. & Jasek M. (2017) Ice-jam flood delineation: Challenges and research needs, *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 42:3, 258-268, DOI: [10.1080/07011784.2017.1294998](https://doi.org/10.1080/07011784.2017.1294998)
- Hagen Rick A., Peters Mary F., Liang Robert T., Ball David G., and Brozena John M. (2014), Measuring Arctic Sea Ice Motion in Real Time With Photogrammetry, *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, VOL. 11, NO. 11, NOVEMBER 2014

- Lindenschmidt, K. (2020), River Ice Processes and Ice Flood Forecasting, A Guide for Practitioners and Students, *Springer Nature Switzerland AG*, DOI 10.1007/978-3-030-28679-8, 267 p.
- Lindenschmidt, K., Syrenne, G. and Harrison, R. (2010). Measuring ice thicknesses along the Red River in Canada using RADARSAT-2 satellite imagery. *J. Water Resource and Protection*. 2. 923-933. 10.4236/jwarp.2010.211110.
- Massie DD, White KD, Daly SF (2002) Application of neural networks to predict ice jam occurrence. *Cold Reg Sci Technol* 35(2):115–122
- Mahabir C, Hicks F, Fayek AR (2006) Neuro-fuzzy river ice breakup forecasting system. *Cold Reg Sci Technol* 46(2):100–112
- Mahabir C, Hicks F, Fayek AR (2007) Transferability of a neuro-fuzzy river ice jam flood forecasting model. *Cold Reg Sci Technol* 48(3):188–201
- Mahabir C, Robichaud C, Hicks F, Fayek AR (2008) Regression and fuzzy logic based ice jam flood forecasting. *Cold Reg Atmos Hydrol Stud Mackenzie GEWEX Exp* 2:307–325
- MANICE, 2005, Environment Canada, *Manual of Standard Procedures for Observing and Reporting Ice Conditions*, <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/manuels-documents-conditions-meteorologiques/manuel-glaces-manice/introduction.html>.
- Meier F., Rasmussen L. A., Krimmel R. M., Olsen R.W., and Frank D. (1985), Photogrammetric determination of surface altitude, terminus position, and ice velocity of Columbia Glacier, Alaska: *U.S. Geol. Surv. Professional Paper 1258-F*, 41p, 7 sheets, scale 1:50,000 1985. <https://pubs.usgs.gov/pp/1258g/report.pdf>
- Michel, B., and Drouin, M. (1970). Guide technique sur la formation et l'identification des couverts de la glace. Rapport T-17 au Ministère des Transports. *Université Laval*, Québec, P.Q. 51 p. Ministère de la sécurité publique. Gouvernement du Canada. [2021] *Inondations*. Repéré: <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/ntrl-hzrds/fld-fr.aspx>
- Morin, J., Côté, J-P. (2003). Modifications anthropiques sur 150 ans au lac Saint-Pierre : une fenêtre sur les transformations de l'écosystème du Saint-Laurent. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, Volume 4 Numéro 3 | décembre 2003, mis en ligne le 01 décembre 2003, consulté le 02 février 2020. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/3867> ; DOI : 10.4000/vertigo.3867
- Morin, R.D. Townsend, and Morse, B. (2000). Design relations for predicting surface-ice clearing capacity of open channels. *Canadian Journal of Civil Engineering* 27, 1230-1239
- Morse, B. (1993), La circulation maritime en hiver sur le fleuve Saint-Laurent, la situation de février 1993. *Rapport technique interne de la Garde côtière canadienne*.

- Morse B. (2001). *Winter navigation on the St. Lawrence River*. dans 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Ottawa, ON; 827–837.
- Morse, B., Hessami, M., Bourel, C. (2003a). Characteristics of ice in the St. Lawrence River. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30, 766–774
- Morse, B., Hessami, M., Bourel, C. (2003b). Mapping environmental conditions in the St. Lawrence River onto ice parameters using artificial neural networks to predict ice jams. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30, 758-765
- Morse, B., & Hicks, F. (2005). *Advances in river ice hydrology 1999-2003*. Hydrological Processes, 19(1), 247–263. <https://doi.org/10.1002/hyp.5768>
- Morse, B., Scalabrini, P. (2020). Bilan des embâcles des glaces sur le fleuve Saint-Laurent, Hiver 2018-2019. Rapport technique de l'Université Laval présenté à la Garde côtière canadienne. 45 p.
- Murfitt J, Brown LC, Howell SEL. (2018) Evaluating RADARSAT-2 for the Monitoring of Lake Ice Phenology Events in Mid-Latitudes. *Remote Sensing*; 10(10):1641. <https://doi.org/10.3390/rs10101641>
- Osvd : Gouvernement du Canada, Conseil national de recherches Canada, *Outil de sélection de site de vol de drone*. <https://cnrc.canada.ca/fr/outil-drone/> consulté le 15-06-2021
- Plante Lévesque V., Chokmani K., Gauthier Y., Raymond S., Persent M A, Tolszczuk Leclerc S., Fortin V. et Légaré S. (2017), DAVE: Un outil géospatial pour anticiper les embâcles de glace, Affiche de conférence, Congrès Eau Terre Environnement, 3^{ème} édition, Québec, 17,18 et 19 novembre 2017.
- Prowse TD. (1995). River ice Processes. In River Ice Jams, Beltaos S (ed). *Water Resources Publications*: Highland Ranch, CO.
- RCM : Gouvernement du Canada, *Ressources naturelles Canada*, Cartes, outils et publications, Imageries satellitaires et photos aériennes, SGDOT (Système de données d'observation de la Terre), secteur Lac Saint-Pierre, 2020-02-19 Repéré: <https://www.eodms-sgdot.nrcan-rncan.gc.ca/index-fr.html>
- Rokaya, P., Budhathoki, S., & Lindenschmidt, K.-E. (2018). Ice-jam flood research: a scoping review. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 94(3), 1439–1457. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3455-0>
- Scalabrini, P., Morse, B. and Ghobrial, T. (2021). Améliorer la fiabilité du transport maritime sur le fleuve Saint-Laurent en période hivernale, QC, Canada. *Canadian*

Water Resources Association 2021, Quebec City, QC, Canada, May 31-June 4, 2021, short oral presentation.

SMITH, 1995. Hydraulic Structures. University of Saskatchewan.

TC : Gouvernement du Canada, Transport Canada, Sécurité des drones, *Trouvez la catégorie d'opération de votre drone*, Repéré:
<https://tc.canada.ca/fr/aviation/securite-drones/apprenez-regles-avant-piloter-votre-drone/trouvez-categorie-operation-votre-drone#base> .

Tom M., Aguilar R., Imhof P., Leinss S., Baltsavias E., Schindler K., *Lake Ice Detection from Sentinel-1 Sar with Deep Learning*. *Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 3-2020, 409–416 DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-409-2020.

Turcotte, B., Morse, B. and Anctil, F. 2012. Impacts of precipitation on the cryologic regime of stream channels. *Hydrol. Process.*, 26: 2653-2662. doi:10.1002/hyp.9438

Tuthill, A. M., Wuebben, J. L., Daly, S. F., & White, K. D. (1996). Probability distributions for peak stage on rivers affected by ice jams. *Journal of Cold Regions Engineering*, 10(1), 36–57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1996\)10:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1996)10:1(36))

US Army Corps of Engineers (USACE), Engineering and Design (1994) Ice Jam Flooding: Causes and Possible Solutions. CECW-EH, EP 1110-2-11. 48 p.

Wang J, Sui J, Guo L, Karney B, Ju'pner R (2010) Forecast of water level and ice jam thickness using the back propagation neural network and support vector machine methods. *Int J Environ Sci Technol* 7(2):215–224

Wehrlé Adrien, Box, J. E., Niwano, M., Anesio, A. M., & Fausto, R. S. (2021). *Greenland bare-ice albedo from promice automatic weather station measurements and sentinel-3 satellite observations*. *GeusBulletin*, 47.
<https://doi.org/10.34194/geusb.v47.5284>

White, K.D. 1996. Predicting breakup ice jams using logistic regression. *ASCE Journal of Cold Regions Engineering*, 10: 178– 189.

White, K. & Daly, S. (2002). *Predicting Ice Jams With Discriminant Function Analysis*. Dans OMAE 2002, Proceeding of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway, June 23-28, 2002. American Society of Civil Engineering.

White, K.D (2003), *Reviews of prediction methods for breakup ice jams*, *Canadian Journal of Civil Engineering*. 30:89-100

Zhao L, Hicks F, Fayek AR (2012) Applicability of multilayer feed-forward neural networks to model the onset of river breakup. *Cold Reg Sci Technol* 70:32–42

Zhao L, Hicks F, Fayek AR (2015) Long lead forecasting of spring peak runoff using Mamdani-type fuzzy logic systems at Hay River, NWT. *Can J Civ Eng* 42(9):665–674

Colomina, P. Molina, (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 92, Pages 79-97, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.

Autres références

3DZF: 3DFLOW, 3DF Zephyr User Manuel – Version 4.5(s. d.). <http://3dflow.net/zephyr-doc/3DF%20Zephyr%20Manual%204.500%20English.pdf> URL: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/>

Contixo: Contixo, Introducing the F22 Quadcopter, url: <https://www.contixo.com/f22-quadcopter-gps-compact-drone> , consulté le 12-12-2020.

EPC 2020 : Estacade du pont Champlain. (2020, 1 décembre). Dans Wikipedia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Estacade_du_pont_Champlain#:~:text=Un%20article%20de%20Wikip%C3%A9dia%2C%20l,m%20en%20amont%20du%20pont.

Google Earth : (s.d.) Dans Google. <https://earth.google.com/web/@46.15879951,-72.93511708,-9.29421404a,84669.5490175d,35y,355.0037249h,0t,0r>

Google Maps : (s.d.) Dans Google. <https://www.google.com/maps/@45.87176,-73.1429299,9.36z>

PJCCI : Les ponts Jacques-Cartier et Champlain incorporée, (s. d.). Histoire du pont Champlain d'origine. Ponts Jacques-Cartier + Champlain Bridges. <https://jacquescartierchamplain.ca/communaute-patrimoine/des-histoires-et-des-ponts-nouveau/histoire-du-pont-champlain-dorigine/>

RC : Un drone payé 2000 \$ inutilisé et remisé par la police de Trois-Rivières (2020, 17 janvier) Radio-Canada, URL : <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1478102/drone-police-trois-rivieres-remise-reglementation>

Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa *et al.*, *JMLR* 12, pp. 2825-2830, 2011. URL: <https://scikit-learn.org/stable/about.html#citing-scikit-learn>

Streamlit (s. d.), The fastest way to build and share data apps, Logiciel Streamlit, URL: <https://streamlit.io/>

Stack Overflow, Empowering the world to develop technology through collective knowledge. url:

Annexe A - Interface

Cette section comprend certaines parties du script de l'outil d'aide à la décision LSPriCE (prototype).

```
from numpy.core.getlimits import _fr1

import streamlit as st

import numpy as np

import pandas as pd

import lxml

import math

# DATA, ARRAYS AND TABLES

import pandas as pd          # Dataframes

import numpy as np          # Arrays

# NOTEBOOK IMPORTS

# Widgets

import ipywidgets as widgets

from ipywidgets import interact, interact_manual

from PIL import Image

# Plots

import matplotlib.pyplot as plt

import plotly.express as px

///// → (retrait d'une section du script)

st.set_page_config(layout="wide")

#Introduction de l'outil

st.title("Outil d'aide à la décision")

st.header("L'objectif de cette plateforme est de faciliter la prise de décision")
```

```

img_estacade=Image.open("LSP_estacade.jpg")

st.image(img_estacade,width=500,caption="Estacade Yamachiche ")

/////

#Ajout d'un sidebar comportant les options de visualisation

add_text=st.sidebar.write("Menu")

if st.sidebar.checkbox("Données"):

/////

tot_area=((100-a1)*area_1*(100-c1))+((100-a2)*area_2*(100-c2))+((100-
a3)*area_3*(100-c3))+((100-a4)*area_4*(100-c4))+((100-a5)*area_5*(100-c5))+((100-
a6)*area_6*(100-c6))

density_ice=920

heat_fusion_ice=334.944

/////

st.subheader("Présence de précipitation dans les secteurs pour les douzes prochaines
heures (cm)")

o1=st.slider("Précipitation Lac Saint-Louis",0,100)

/////

#vitesse selon morse et morin

b=[]

for i in range(0,12):

v_ia=((10.955*vect[i])+863.6)/1000

b.append(v_ia)

df_morse=pd.DataFrame([b],columns=["1h", "2h",
"3h","4h","5h","6h","7h","8h","9h","10h","11h","12h"])

/////

df = pd.DataFrame(np.array([[45.38294844,-73.8004771, p1],[45.455846,-73.5281718,
p2],[45.5827374,-73.4852794, p3],[45.7489587,-73.3975351,p4],\
[45.9477843,-73.2084062,p5],[46.1749437,-72.8459026,p6]]),columns=['lat',
'lon','prod'])

```

```
/////
```

```
#onglet production de glace
```

```
if st.sidebar.checkbox("Production de glace"):
```

```
    st.header("Production de glace")
```

```
        st.subheader("Cette section permet une estimation de la production de glace dans les  
secteurs à l'amont du Lac Saint-Pierre.")
```

```
/////
```

```
if st.sidebar.checkbox("Vitesse de la glace"):
```

```
    st.header("Vitesse de la glace")
```

```
        st.subheader("Cette section permet une estimation de la vitesse de la glace dans le tronçon  
à risque du lac Saint-Pierre.")
```

```
c21,c22 =st.beta_columns(2)
```

```
with c21:
```

```
    fig, ax = plt.subplots()
```

```
    ax.bar(np.arange(1,13),df_morse.values[0])
```

```
    ax.set_title("Morse et al.2003 - Vitesse de la glace")
```

```
    ax.set_xlabel("Prochaines heures")
```

```
    ax.set_ylabel("vitesse (m/s)")
```

```
    st.pyplot(fig)
```

```
/////
```

```
if st.sidebar.checkbox("Congestion"):
```

```
    st.header("Congestion")
```

```
        st.subheader("Cette section compare le débit de glace calculé en fonction du secteur avec  
la capacité \
```

```
d'évacuation de la glace selon les modèles de Morse et Morin. Lorsque la capacité  
d'évacuation est inférieure\
```

```

    au débit de glace calculé, on peut interpréter cela comme étant un risque d'arrêt")
c31,c32 = st.beta_columns((2,1))
with c31:
////
if st.sidebar.checkbox("Concentration future (12h)":
    st.header("Concentration future (12h)")
    st.subheader("Cette section permet d'évaluer la concentration de glace en transit future
dans le tronçon \
    problématique. Il considère la dernière concentration connue, la température moyenne
et le vecteur \
    de vitesse du vent moyen (12 dernières heures). ")
temp_moy=st.slider("Température moyenne des douze dernières heures",-40,10)
cong_act_info=st.slider("Dernière concentration de glace en transit connue dans le tronçon
problématique",0,100)
cong_act=cong_act_info/10
if st.checkbox("Vecteur de vitesse du vent moyen connu"):
    vect_moy=st.slider("Vecteur de vitesse du vent moyen",-40,40)
if st.checkbox("Vecteur de vitesse du vent moyen inconnu"):
    st.subheader("Vitesse et direction du vent des douze dernières heures")
    s1a=st.slider("Vitesse du vent il y a 1 heure",0,80)
    d1a=st.slider("Direction du vent il y a 1 heure",0,360)
////
if d1a>=60:
    if d1a>330:
        .....
///

```

Annexe B – Patrouille aérienne



Figure 65: Patrouille aérienne en avion - estacade Yamachiche



Figure 66: Patrouille aérienne avion - Glace en transit.