

Évaluation préliminaire des impacts hydrauliques de la réfection des reversoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre



Évaluation préliminaire des impacts hydrauliques de la réfection
des réservoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre

Publié avec l'autorisation de :

Génie hydraulique
Infrastructures maritimes et civiles
Direction générale des Services techniques intégrés
Pêches et Océans Canada
Garde côtière canadienne
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

Version finale

2024-01-09

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, 2024

Registre des modifications

N° de modification	Date (aaaa-mm-jj)	Description
1	2019-12-19	Version préliminaire
2	2020-07-09	Version préfinale
3	2023-06-30	Version finale pour relecture
4	2024-01-09	Version finale

SIGNATURES

Préparé par

Metivier, Vincent Signé numériquement par Metivier, Vincent
Date : 2024.01.09 16:30:15-05'00'

2024-01-09

Vincent Métivier, ing., M.Sc.
(N° OIQ : 5016865)

Date

Révisé par

Doyon, Bernard Signé numériquement par Doyon, Bernard
Date : 2024.01.09 16:32:59-05'00'

2024-01-09

Bernard Doyon, ing., Ph.D.
(N° OIQ : 100675)

Date

Le présent rapport scientifique a été préparé par les auteurs pour le Gouvernement du Canada. Son contenu reflète le meilleur jugement des auteurs à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entière responsabilité de ladite tierce partie. Les auteurs et le Gouvernement du Canada n'acceptent aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

Équipe de réalisation

Modélisation et rédaction	Vincent Métivier
Révision	Bernard Doyon
Élaboration du modèle numérique de terrain	Bernard Doyon Simon Baril-Tessier Vincent Métivier
Relevés de terrain	Marc Savard Simon Baril-Tessier

Aux fins de citation :

Métivier, V. et B. Doyon (2024). Évaluation préliminaire des impacts hydrauliques de la réfection des réservoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Rapport technique produit par le Secteur Génie hydraulique de la Garde côtière canadienne – Administration centrale. Version finale, 83 pages.

Gestion du document

Autorité technique nationale

Ce document est publié par le Directeur général des Services techniques intégrés, l'autorité technique nationale de la GCC, par délégation du Sous-ministre des Pêches et des Océans et du Commissaire de la Garde côtière canadienne.

Responsabilité

- A. Le directeur de l'Infrastructure maritime et civile est chargé de :
- i. la création et la promulgation du document; et
 - ii. l'identification d'un Bureau de Premier Intérêt (BPI) responsable de la coordination et du contenu du document.
- B. Le BPI est responsable de :
- iii. la validité et l'exactitude du contenu;
 - iv. la disponibilité de ces informations;
 - v. la mise à jour si nécessaire;
 - vi. la révision périodique; et
 - vii. le suivi de toutes les demandes, observations et/ou suggestions reçues par l'auteur.

C.

Demandes de renseignements et/ou de révision

Toutes les demandes concernant ce document, y compris les suggestions de révision et les demandes d'interprétation, doivent être adressées à l'adresse suivante :

Directeur, Infrastructure maritime et civile (IMC)
Garde côtière canadienne
222, rue Nepean
Ottawa, ON
K2P 0B8

Toutes les demandes doivent :

- D. être claires et concises; et
- E. faire référence au chapitre, à la section, à la figure ou au tableau spécifique.

Table des matières

Registre des modifications	iii
Équipe de réalisation	iv
Gestion du document	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Sommaire	xii
Executive summary	xiii
1 Introduction	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Historique	2
1.4 Revue de la littérature disponible	3
2 Variantes à l'étude	6
2.1 Conditions telles que relevées en 2017	6
2.2 Variantes de réfection	7
2.3 Variantes modélisées	7
3 Conditions hydrodynamiques	13
3.1 Niveaux d'eau	13
3.2 Débits.....	17
3.3 Vitesses de courant.....	25
3.4 Régime des glaces.....	35
4 Modélisation hydrodynamique.....	48
4.1 Méthodologie.....	48
4.2 Domaine de calcul et maillage.....	48
4.3 Bathymétrie et modèle numérique de terrain.....	48
4.4 Conditions aux limites et paramétrisation du modèle.....	51
4.5 Validation du modèle et scénarios de modélisation	53
4.6 Incertitudes et limitations	55
5 Effets de la réfection des revoirs sur les conditions hydrodynamiques	57
5.1 Niveaux d'eau	57
5.2 Débits.....	65
5.3 Vitesses de courant.....	67
5.4 Glaces.....	75

6	Constats et enjeux liés à l'évaluation des impacts du projet ayant une influence sur le volet hydraulique	77
7	Conclusion et recommandations	80
8	Références	82

Liste des figures

Figure 1 - Représentation graphique des coupes du chenal dans la voie navigable du Saint-Laurent 3	
Figure 2 - Localisation des revoirs (structures mauves numérotées de 1 à 5).....	6
Figure 3 - Modèle numérique d'élévation du revoir 1 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)	8
Figure 4 - Modèle numérique d'élévation du revoir 2 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)	9
Figure 5 - Modèle numérique d'élévation du revoir 3 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)	10
Figure 6 - Modèle numérique d'élévation du revoir 4 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)	11
Figure 7 - Modèle numérique d'élévation du revoir 5 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)	12
Figure 8 - Localisation des stations hydrométriques de Pêches et Océans Canada à Jetée #1 (n° 15520), Frontenac (n° 15540), Varennes (n° 15660), Contrecoeur (IOC) (n° 15780), Contrecoeur (n° 15790), Sorel (n° 15930), Lac Saint-Pierre (n° 15975), Port Saint-François (n° 3365), Trois-Rivières (n° 3360).....	13
Figure 9 - Niveaux d'eau journaliers moyens aux stations hydrométriques Jetée #1 (n° 15520), Frontenac (n° 15540), Varennes (n° 15660), Contrecoeur (IOC) (n° 15780), Contrecoeur (n° 15790), Sorel (n° 15930), Lac Saint-Pierre (n° 15975), Port Saint-François (n° 3365), Trois-Rivières (n° 3360) pour la période comprise entre 1963 et 2019.....	14
Figure 10 - Niveaux d'eau horaires à la station hydrométrique Sorel (n° 15930) pour la période comprise entre 1966 et 2019	15
Figure 11 - Niveaux d'eau horaires minimum, moyen et maximum annuels à la station hydrométrique Sorel (n° 15930), pour la période comprise entre 1966 et 2019.....	15
Figure 12 - Courbes classées des niveaux d'eau horaires à Sorel pour différentes périodes entre 1966 et 2019	16
Figure 13 - Courbes classées des niveaux d'eau à Sorel pour différentes périodes de l'année. Données horaires pour la période comprise entre 1966 et 2019.....	17
Figure 14 - Localisation des transects de mesure des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre	18
Figure 15 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits du fleuve Saint-Laurent à Tracy... ..	18
Figure 16 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'embouchure de la rivière Richelieu	19
Figure 17 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du revoir 1	19
Figure 18 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du revoir 2.....	20
Figure 19 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du revoir 3.....	20
Figure 20 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du revoir 4.....	21
Figure 21 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du revoir 5.....	21
Figure 22 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits dans le bras du chenal de navigation, au droit de l'île des Barques	22
Figure 23 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits au Chenal de Berthier	22
Figure 24 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits au Chenal du Moine	23
Figure 25 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits au Chenal aux Corbeaux.....	23
Figure 26 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre en conditions d'eaux libres de glace.....	24

Figure 27 - Répartition des vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation entre l'île des Barques et l'île Lapierre pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 7 864 m ³ /s Centre : 2000-06-14, Niveau d'eau = 4,51 m (IGLD85), Débit relevé = 7 408 m ³ /s Bas : 2001-07-25, Niveau d'eau = 4,00 m (IGLD85), Débit relevé = 6 451 m ³ /s	26
Figure 28 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reversoire 1 pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2001-04-18, Niveau d'eau = 5,98 m (IGLD85), Débit relevé = 439 m ³ /s Centre : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 269 m ³ /s Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 222 m ³ /s	27
Figure 29 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reversoire 2 pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,44 m (IGLD85), Débit relevé = 2 528 m ³ /s Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 1 796 m ³ /s Bas : 2000-10-05, Niveau d'eau = 4,08 m (IGLD85), Débit relevé = 320 m ³ /s	28
Figure 30 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reversoire 3 pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2000-05-12, Niveau d'eau = 5,85 m (IGLD85), Débit relevé = 1 075 m ³ /s Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 680 m ³ /s Bas : 2000-10-27, Niveau d'eau = 4,00 m (IGLD85), Débit relevé = 137 m ³ /s	29
Figure 31 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reversoire 4 pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2011-06-01, Niveau d'eau = 5,91 m (IGLD85), Débit relevé = 331 m ³ /s Centre : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,43 m (IGLD85), Débit relevé = 252 m ³ /s Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,92 m (IGLD85), Débit relevé = 124 m ³ /s	30
Figure 32 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reversoire 5 pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2011-06-01, Niveau d'eau = 5,91 m (IGLD85), Débit relevé = 437 m ³ /s Centre : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,43 m (IGLD85), Débit relevé = 354 m ³ /s Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,92 m (IGLD85), Débit relevé = 256 m ³ /s	31
Figure 33 - Répartition des vitesses de courant au chenal aux Corbeaux pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 842 m ³ /s Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 769 m ³ /s Bas : 2000-08-23, Niveau d'eau = 4,45 m (IGLD85), Débit relevé = 705 m ³ /s	32
Figure 34 - Répartition des vitesses de courant au chenal de Berthier pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 223 m ³ /s Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 180 m ³ /s Bas : 2000-10-27, Niveau d'eau = 4,01 m (IGLD85), Débit relevé = 126 m ³ /s	33
Figure 35 - Répartition des vitesses de courant au chenal du Moine pour différents niveaux d'eau à Sorel. Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 119 m ³ /s Centre : 2011-04-11, Niveau d'eau = 5,25 m (IGLD85), Débit relevé = 253 m ³ /s Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 112 m ³ /s	34
Figure 36 - Brise-glace Pierre Radisson	35
Figure 37 - Estacades de retenue des glaces	36
Figure 38 - Emplacement des estacades	37
Figure 39 - Localisation des îlots artificiels. Îlots 1 à 4 : nord du chenal de navigation. Îlots B à F : sud du chenal de navigation	38
Figure 40 - Localisation des stations d'échantillonnage disponibles du programme d'épaisseur de glace canadien dans le secteur à l'étude	39
Figure 41 - Épaisseurs de glace dans le secteur à l'étude	39
Figure 42 - Concomitance des épaisseurs de glace et des niveaux d'eau à Sorel pour les données disponibles échantillonnées à P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13 et aux sites A à C à Nicolet	40

Figure 43 - Conditions de glace au voisinage des revoirs lors du survol du 6 février 2019.....	41
Figure 44 - Cartes de glace WIS86c des 10 janvier, 17 février et 15 mars des années 2014 à 2019	43
Figure 45 - Localisation du secteur à l'étude au voisinage de l'île des Barques pour la caractérisation du couvert de glace	45
Figure 46 - Couverture de glace entre décembre 2012 et juin 2019	46
Figure 47 - Domaine modélisé et résolution variable du maillage (résolution du maillage indiquée en rouge).....	48
Figure 48 - Modèle numérique de terrain du domaine modélisé Haut : Tronçon Montréal – Trois-Rivières Bas : Secteur des revoirs (relevés des revoirs effectués en 2017)	50
Figure 49 - Débits entrants (bleus), condition limite du domaine de modélisation (vert) et sens de l'écoulement (flèches rouges).....	51
Figure 50 - Coefficients de frottement (Manning) appliqués dans le domaine	53
Figure 51 - Niveaux d'eau mesurés et modélisés pour les événements d'avril-mai 1996, mai 1999 et juin 2015.....	55
Figure 52 - Comparaison de l'ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs et de la réfection des revoirs 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85) par rapport aux conditions relevées en 2017 sur le niveau d'eau	58
Figure 53 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les niveaux d'eau pour l'événement de mai 1999.....	59
Figure 54 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les niveaux d'eau pour l'événement de mai 1999	60
Figure 55 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les niveaux d'eau pour l'événement de juin 2015.....	61
Figure 56 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les niveaux d'eau pour l'événement de juin 2015.....	62
Figure 57 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les niveaux d'eau pour l'événement d'avril-mai 1996	63
Figure 58 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les niveaux d'eau pour l'événement d'avril-mai 1996.....	64
Figure 59 - Comparaison de l'ordre de grandeur des vitesses de courant pour les conditions pré-réfection, pour la réfection* des 5 revoirs et pour la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85)	68
Figure 60 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les vitesses de courant pour l'événement de mai 1999.....	69
Figure 61 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les vitesses de courant pour l'événement de mai 1999.....	70
Figure 62 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les vitesses de courant pour l'événement de juin 2015.....	71
Figure 63 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les vitesses de courant pour l'événement de juin 2015.....	72
Figure 64 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les vitesses de courant pour l'événement d'avril-mai 1996	73
Figure 65 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les vitesses de courant pour l'événement d'avril-mai 1996	74

Liste des tableaux

Tableau 1 - Historique des interventions sur les revoirs.....	2
Tableau 2 - Historique d'interventions significatives en lien avec l'hydraulique du fleuve Saint-Laurent depuis 1907.....	2
Tableau 3 - Caractéristiques des revoirs relevés en 2017	6
Tableau 4 - Caractéristiques géométriques des revoirs modélisés pour la configuration post-réfection.....	7
Tableau 5 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues pour l'étude	13
Tableau 6 - Plage de débits mesurés dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre en conditions d'eaux libres de glace.....	24
Tableau 7 - Caractérisation des conditions de glace dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre lors des hivers 2014 à 2019.....	44
Tableau 8 - Événements significatifs pour la gestion des glaces entre Lavaltrie et Trois-Rivières	47
Tableau 9 - Provenance des différents jeux de données topographiques et bathymétriques	49
Tableau 10 - Stations hydrométriques utilisées pour évaluer les débits entrants	52
Tableau 11 - Événements de modélisation retenus	54
Tableau 12 - Comparaison de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs et de la réfection des revoirs 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85) par rapport aux conditions relevées en 2017 sur le niveau d'eau à Sorel et à Jetée #1.....	57
Tableau 13 - Ordre de grandeur de l'effet moyen de la réfection des revoirs sur la répartition des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre.....	66
Tableau 14 - Effets anticipés de la réfection ¹ sur les facteurs d'influence du régime des glaces dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre.....	76
Tableau 15 - Enjeux liés à l'évaluation des impacts ayant une influence sur le volet hydraulique du projet de réfection des revoirs.....	79

Sommaire

La Direction régionale des Biens immobiliers, environnement, sécurité et santé (BIESS) de Pêches et Océans Canada, propriétaire des revoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre, et le Programme de Gestion des voies navigables (GVN) de la Garde côtière canadienne (GCC) sont les promoteurs du projet de réfection de ces ouvrages. Le mandat du Secteur Génie hydraulique (GH) de la GCC consiste à offrir aux promoteurs du projet un support technique en matière de modélisation hydrodynamique. Le présent rapport résume les résultats d'un exercice de modélisation effectué sur la base des données disponibles et identifie du coup quelques enjeux potentiels du projet de réfection.

Le projet de réfection des revoirs en est à l'étape des études de préféabilité. Comme la configuration des revoirs sera vraisemblablement revue et modifiée, même légèrement, la présente modélisation s'inscrit dans un processus itératif qui, à cette étape, ne permet d'évaluer que l'ordre de grandeur des impacts hydrauliques. Suite à l'étape de conception, une mise à jour des modélisations sera requise afin d'affiner l'évaluation des impacts hydrauliques attendus.

Les relevés bathymétriques utilisés pour caractériser l'état dit « pré-réfection » datent de 2017, ceux-ci correspondant aux relevés les plus récents au moment d'effectuer les modélisations. Naturellement, il est possible que l'événement de crue extrême de 2019 ait modifié la géométrie des revoirs. Si c'était le cas, ces modifications à la géométrie des ouvrages pourraient avoir des impacts significatifs sur l'hydraulique du secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. De nouveaux relevés topographiques et bathymétriques des revoirs mettraient en évidence ces changements de géométrie et leur impact sur l'écoulement.

Au moment où les simulations hydrodynamiques ont été effectuées, la réflexion prenait forme quant aux options de réfection et alternatives d'aménagement. Dans ce contexte, et en guise de première hypothèse, la géométrie utilisée pour représenter l'état post-réfection correspond aux géométries extérieures existantes, ajustées à la cote 4,385 m (IGLD85). Or, il est possible que, suite à la conception des nouveaux ouvrages, les géométries post-réfection des revoirs comportent des différences significatives avec celles modélisées. Il est également possible que ces différences géométriques aient des impacts significatifs sur l'hydraulique locale, au voisinage des ouvrages et dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Une réévaluation des impacts hydrauliques devra être conduite une fois que le choix d'un concept des revoirs sera complété afin de mieux évaluer l'effet de la réfection des ouvrages.

Ce rapport présente les bases de la modélisation pour l'évaluation des impacts hydrauliques découlant d'une possible réfection des revoirs. Il fournit les ordres de grandeur des impacts potentiels de la réfection sur les niveaux d'eau et les courants ainsi que sur la répartition des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre. Les résultats de la modélisation montrent que la réfection des ouvrages avec des géométries extérieures ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85) tend à augmenter les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Sorel et Montréal, et dans la rivière Richelieu entre Sorel et le barrage de Saint-Ours. Cette augmentation est variable selon le débit du fleuve et le niveau d'eau à Sorel. La réfection tend également à augmenter le débit dans le bras du chenal de navigation; cette augmentation varie aussi en fonction du débit dans le fleuve. L'augmentation du débit dans le bras du chenal de navigation est liée à la diminution du débit dans les chenaux des revoirs pour lesquels une réfection est réalisée. De manière générale, le modèle prédit une augmentation des vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation, augmentation qui est également variable selon le débit du fleuve et le niveau d'eau à Sorel. Dans les chenaux des revoirs pour lesquels une réfection est effectuée, une diminution des vitesses de courant est prédite à l'amont et à l'aval des structures. Ces impacts potentiels ne considèrent aucun phénomène de tassement, de dommage, d'effet de perméabilité, ni d'érosion des structures ou des berges de l'archipel du Lac Saint-Pierre.

Executive summary

Fisheries and Oceans Canada's Real Property, Environment, Safety and Health (RPESH) Regional Management, owner of the Lake Saint-Pierre archipelago's weirs, and the Canadian Coast Guard's (CCG) Waterways Management Program (WM) are the promoters of the project to rehabilitate these structures. The mandate of the CCG's Hydraulic Engineering Sector (HE) is to provide project promoters with technical support in hydrodynamic modelling. This report summarizes the results of a modelling exercise carried out on the basis of available data, and identifies some of the potential issues involved in the project.

The weir rehabilitation project is currently at the pre-feasibility study stage. As the configuration of the weirs is likely to be reviewed and modified, even slightly, the present modelling is part of an iterative process which, at this stage, can only assess the order of magnitude of the hydraulic impacts. Following the design stage, updated modelling will be required to refine the assessment of expected hydraulic impacts.

The bathymetric surveys used to characterize the "pre-refurbishment" condition date from 2017, corresponding to the most recent surveys at the time of modelling. Of course, it is possible that the extreme flood event of 2019 has modified the geometry of the weirs. Should this be the case, these modifications to the geometry of the structures could have significant impacts on the hydraulics of the Lake Saint-Pierre archipelago sector. New topographic and bathymetric surveys of the weirs would highlight these changes in geometry and their impact on flow.

At the time the hydrodynamic simulations were carried out, consideration was being given to rehabilitation options and alternative layouts. In this context, and as a first assumption, the geometry used to represent the post-refurbishment state corresponds to the existing external geometries, adjusted to elevation 4.385 m (SRIGL85). However, it is possible that, as a result of the design of the new structures, the post-refurbishment geometries of the weirs will differ significantly from those modelled. It is also possible that these geometric differences will have significant impacts on local hydraulics, in the vicinity of the structures and in the Lake Saint-Pierre archipelago sector. A reassessment of the hydraulic impacts will have to be carried out once the choice of a design for the weirs has been completed, in order to better evaluate the effect of refurbishing the structures.

This report presents the modelling basis for assessing the hydraulic impacts of possible refurbishment of the weirs. It provides orders of magnitude of the potential impacts of refurbishment on water levels and currents, as well as on flow distribution in the Lake Saint-Pierre archipelago. Modelling results show that refurbishing structures with external geometries adjusted to a crest at 4.385m (SRIGL85) tends to increase water levels in the St. Lawrence River between Sorel and Montreal, and in the Richelieu River between Sorel and the Saint-Ours dam. This increase varies according to river flow and water level at Sorel. Rehabilitation also tends to increase flow in the navigation channel arm; this increase also varies with river flow. The increase in flow in the navigation channel arm is linked to the decrease in flow in the channels where weir rehabilitation is carried out. In general, the model predicts an increase in current velocities in the navigation channel arm, which is also variable according to river flow and water level at Sorel. In the channels of the weirs to be rehabilitated, a decrease in current velocities is predicted both upstream and downstream of the structures. These potential impacts do not take into account any settlement, damage, permeability effects or erosion of the structures or banks of the Lake Saint-Pierre archipelago.

1 Introduction

1.1 Contexte

Afin de pallier les effets négatifs sur la navigation commerciale qu'auraient des périodes de bas niveaux d'eau prolongées et récurrentes, la Commission Haskell a proposé dès 1915 la construction de cinq revoirs dans l'archipel du Lac Saint-Pierre dans le but de conserver l'eau dans le chenal principal du fleuve et du coup, augmenter le niveau d'eau jusqu'au port de Montréal. Ces ouvrages, longtemps la propriété du Secteur Génie hydraulique (GH) de la Garde côtière canadienne (GCC), ont été transférés à la Direction régionale des Biens immobiliers, de l'Environnement, de la Sécurité et de la Santé (BIESS) de Pêches et Océans Canada. Depuis le transfert, le Secteur GH est *de facto* demeuré gestionnaire de la composante hydraulique du cycle de vie des revoirs. Dans le cadre du suivi de l'état de ces ouvrages, une inspection visuelle est effectuée annuellement et, lorsque requis, des relevés topographiques et bathymétriques sont effectués par le Secteur GH.

Compte tenu de son expertise développée au fil des ans avec la gestion de ces ouvrages, BIESS a demandé au Secteur GH d'étudier l'effet de deux scénarios de réfection des revoirs à la cote de conception, soit 4,385 m (IGLD85), sur l'hydraulique du fleuve Saint-Laurent. Ces deux scénarios comprennent 1) la réfection des 5 revoirs et 2) la réfection des revoirs 1 à 3 uniquement.

La Direction régionale de BIESS, propriétaire des revoirs, et le Programme de Gestion des voies navigables (GVN) de la GCC sont les promoteurs du projet de réfection des ouvrages. Le mandat du Secteur GH consiste à offrir aux promoteurs du projet un support technique en matière de modélisation hydrodynamique.

Le projet de réfection des revoirs en est à l'étape des études de préfaisabilité. Comme la configuration des revoirs sera possiblement revue et modifiée, même légèrement, la présente modélisation s'inscrit dans un processus itératif qui, à cette étape, ne permet d'évaluer que l'ordre de grandeur des impacts hydrauliques qui seraient causés par des ouvrages restaurés. Suite à l'étape de conception, une mise à jour des modélisations sera requise afin d'affiner l'évaluation des impacts hydrauliques.

Les options de réfection et les alternatives d'aménagement n'étaient pas disponibles au moment d'effectuer les simulations hydrodynamiques. Dans ce contexte, et en guise de première hypothèse, les géométries post-réfection des revoirs furent basées sur les géométries extérieures existantes, ajustées¹ à la cote 4,385 m (IGLD85). Ces géométries pourront différer, peut-être de façon significative, avec les géométries post-réfection revues. Néanmoins, cet exercice de modélisation reste pertinent et permet d'évaluer les ordres de grandeur des effets de la réfection des revoirs.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer l'ordre de grandeur des effets de la réfection des revoirs à leur cote de conception sur l'hydrodynamique du fleuve Saint-Laurent, entre Montréal et le lac Saint-Pierre. En particulier, ce rapport vise à présenter l'exercice de modélisation permettant d'évaluer les effets de cette réfection sur les niveaux d'eau aux stations hydrométriques de Sorel et Jetée #1 à Montréal, sur la répartition des débits ainsi que les vitesses de courant dans l'archipel du Lac Saint-Pierre. Cette évaluation, effectuée sur la base de l'information et des données disponibles à

¹ En effet, les géométries extérieures originales ont été utilisées mais celles-ci ont dû être ajustées compte tenu que chacun des revoirs a vu sa configuration évoluer avec les nombreux cycles « dégradation-réfection » subis en près de 100 ans. Par exemple, aucun des revoirs ne présente sa profondeur (longitudinale) originale en raison de la déposition des sédiments à l'amont des ouvrages et des roches entraînées par le courant vers l'aval.

ce stade du projet, permet de caractériser l'ordre de grandeur des impacts hydrauliques appréhendés et d'identifier quelques enjeux potentiels pour la suite du projet.

1.3 Historique

Depuis leur construction entre 1929 et 1931, les revoirs ont fait l'objet de 5 réfections réalisées entre 1932 et 1996 (Tableau 1). Plusieurs interventions significatives ont par ailleurs eu lieu au cours de la même période en lien avec l'hydraulique du fleuve Saint-Laurent, notamment la mise en place d'un plan de régularisation pour les débits du système lac Ontario-fleuve Saint-Laurent ainsi que des activités de dragage et de gestion des glaces (Tableau 2 et Figure 1).

Tableau 1 - Historique des interventions sur les revoirs

Année	Intervention
1929 à 1931	Construction des revoirs
1932 à 1934	Réfection des revoirs 1 à 5
1938 à 1940	Réfection des revoirs 1 à 5, correction des rives endommagées
1953 à 1962	Réfection des revoirs 1 à 5 aux endroits où l'érosion les a endommagés
1966	Réfection des revoirs 2 à 5 aux endroits où l'érosion les a endommagés
1996	Réfection des revoirs 4 et 5

Source : Garde côtière canadienne (2017a)

Tableau 2 - Historique d'interventions significatives en lien avec l'hydraulique du fleuve Saint-Laurent depuis 1907

Année	Intervention
1907 ¹	Dragage du chenal : Élargissement à 140 m – Approfondissement à 9,1 m (ZC)
1952 ¹	Dragage du chenal : Élargissement à 150 m – Approfondissement à 10,7 m (ZC)
1958-1959 ²	Mise en service du barrage Moses-Saunders
Années 1960 ³	Interventions de la GCC pour favoriser la formation d'un couvert de glace dans certaines parties du système et assurer l'ouverture et l'accessibilité du chenal dans tout le tronçon Montréal-Québec tout au long de l'année
1963 ⁴	Régularisation des débits du lac Ontario selon le Plan 1958-D
Milieu des années 1960 ⁴	Sécheresse record exigeant une déviation du Plan 1958-D
1967 ⁵ à 1992	Exploitation de l'estacade du lac Saint-Pierre
1970 ¹	Dragage du chenal : Élargissement à 245 m – Profondeur de 10,7 m (ZC)
1970 ⁵	Mise en service de l'estacade de Lavaltrie
1971 ⁵	Mise en service de l'estacade de Lanoraie
1992 ¹	Dragage du chenal : Largeur de 230 m – Approfondissement à 11,0 m (ZC)
1994 ⁵	Mise en service de l'estacade de Yamachiche (configuration actuelle)
1999 ¹	Dragage du chenal : Largeur de 230 m – Approfondissement à 11,3 m (ZC)
2016 ⁴	Mise en application du Plan 2014 : Régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent ³

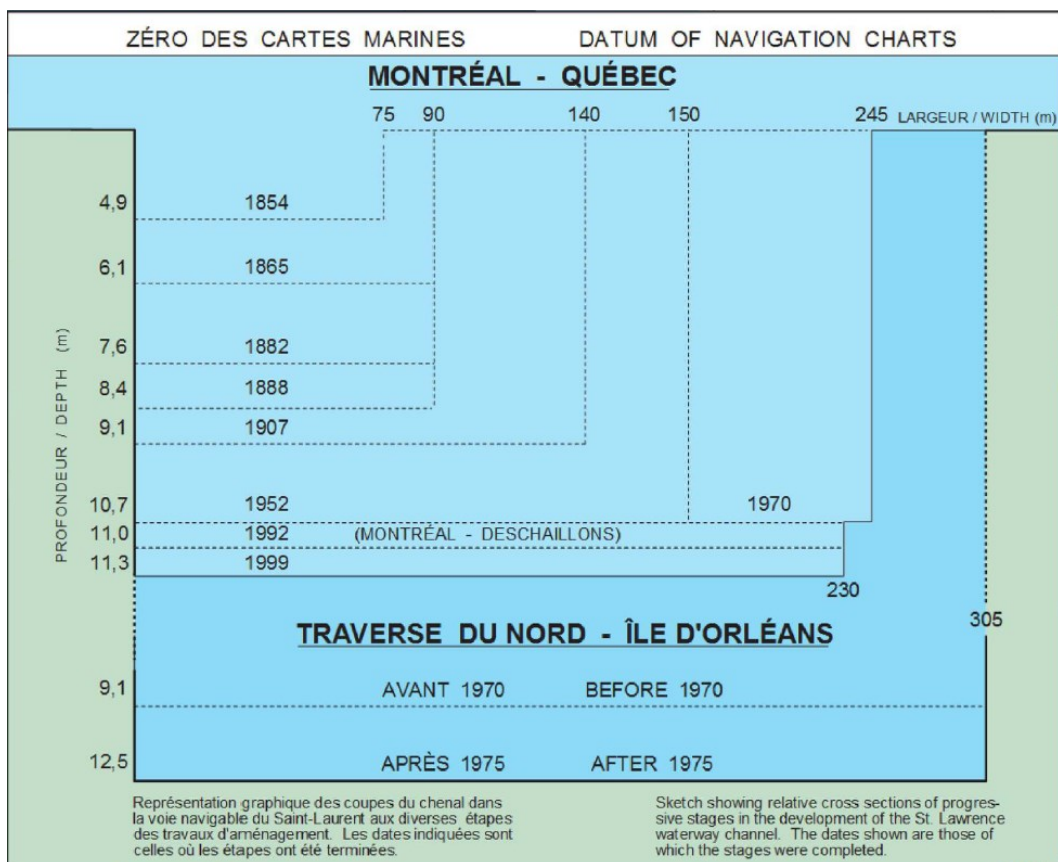
Sources : ¹Garde côtière canadienne (2015)

⁴Commission mixte internationale (2014)

²Ontario Power Generation (2018)

⁵Garde côtière canadienne (2019)

³Garde côtière canadienne – Région Laurentienne (1993)



Adaptée de Garde côtière canadienne (2015)

Figure 1 - Représentation graphique des coupes du chenal dans la voie navigable du Saint-Laurent

1.4 Revue de la littérature disponible

L'hydraulique de l'archipel du Lac Saint-Pierre ainsi que l'évaluation des impacts hydrauliques de la réfection et de l'enlèvement des revoirs ont été étudiées à plusieurs reprises. La présente section expose la littérature scientifique trouvée sur ces sujets.

En 1979, Pasin décrit les principales caractéristiques géométriques des revoirs de Sorel. La géométrie extérieure originale, un résumé de l'historique et des principaux travaux de réfection y sont présentés.

En 1983, Simard met en évidence que les revoirs contribuent directement à augmenter la pente hydraulique dans le chenal maritime, surtout entre Sorel et les Ilets Percés (près de l'embouchure de la rivière Yamaska), quel que soit le débit du fleuve. Il ajoute qu'à l'époque, la réparation des revoirs aurait comme principal avantage un chenal plus profond entre Montréal et Sorel, non propice aux embâcles.

En 1985, Simard étudie l'augmentation du taux d'évacuation de la glace dans le lac Saint-Pierre. Dans une section portant sur la réfection des revoirs, il mentionne que la reconstruction des revoirs assure une sécurité en période de basses eaux, tout en procurant une profondeur additionnelle attrayante entre Sorel et Montréal.

En 1989, Saucet, Holder et Boivin du Laboratoire d'Hydraulique Lasalle mentionnent que les crêtes des revoirs sont dans l'ensemble plus basses que les hauteurs visées lors de la restauration de 1966, à l'exception de celle du revoir 4, et que cet abaissement est le résultat de plusieurs facteurs dont l'entraînement des pierres de plus petit diamètre par les courants, le tassement du massif d'enrochement et, dans une moindre mesure, l'affaissement des fonds argileux. Toutefois, la pérennité des ouvrages n'est pas menacée et il n'y a aucune urgence à entreprendre les travaux de confortement ou de restauration. À l'époque, les auteurs affirment que la réfection aurait un effet contraire à celui recherché, soit que les niveaux à Sorel ne remonteraient pratiquement pas en étiage alors que le rehaussement des niveaux d'eau serait excessif en crue.

En 1992, Simard suggère que la réfection des revoirs à leur cote d'origine se traduirait par une augmentation des niveaux d'eau moindre que celle obtenue lors de la réfection précédente en raison de l'érosion ayant engendré une augmentation de la section d'écoulement dans le bras du chenal de navigation. De plus, la réfection se traduirait par une augmentation de l'érosion à l'île des Barques [Simard (1992) réfère plus précisément au « taux observable ces dernières années », soit au début des années 1990]. Éventuellement, la section du chenal de navigation à l'île des Barques s'agrandirait, laissant passer un débit additionnel au dépend du niveau d'eau et la réfection serait à recommencer à moins que des travaux de protection des rives soient entrepris, ainsi qu'il avait été suggéré en 1969. Enfin, Simard mentionne la possibilité que l'érosion se produise sur le fond ou dans une autre section.

En 1994, Cantin met en évidence la diminution de la fraction du débit total passant par le bras du chenal de navigation par rapport au débit total du fleuve lorsque le niveau d'eau à Sorel augmente. Cet effet se traduit par une augmentation de la fraction du débit total passant par les autres chenaux de l'archipel du Lac Saint-Pierre par rapport au débit total du fleuve lorsque le niveau d'eau à Sorel augmente.

En 1996, Dumont évalue que la réfection des cinq revoirs aurait un impact compris entre 0,9 et 1,6 cm à Montréal et de 1,6 à 3,5 cm à Sorel selon le débit du fleuve Saint-Laurent². Il mentionne que la présence des revoirs favorise l'écoulement dans le chenal de navigation, ce qui serait bénéfique pour l'évacuation des glaces en hiver et réduirait les risques d'embâcles sur le lac Saint-Pierre. En 1996, la réfection des revoirs aurait augmenté le débit dans le chenal principal de l'ordre de 4 à 7%, ce qui serait à nouveau bénéfique pour l'évacuation des glaces en hiver et réduirait les risques d'embâcles au lac Saint-Pierre.

En 2003, SNC-Lavalin évalue que le rehaussement des revoirs à leur état original permettrait d'augmenter la proportion de débit passant par le bras du chenal navigable et ainsi augmenter le niveau d'eau à l'amont de Sorel. Cependant, ceci ne représenterait qu'une solution temporaire puisqu'une augmentation du débit et de la vitesse de l'écoulement dans le bras du chenal principal augmenterait l'érosion de celui-ci, entraînant un élargissement de la section d'écoulement, et consécutivement, un abaissement du niveau d'eau. De plus, les travaux de réfection aux revoirs auraient un effet qui s'atténuerait avec le temps, la crête de ceux-ci s'érodant à nouveau. Enfin, SNC-Lavalin a mis en évidence l'augmentation de la fraction du débit des revoirs par rapport au débit total avec l'augmentation du niveau d'eau à Sorel.

En 2015, Maranda et Doyon ont quantifié sommairement la perte d'efficacité des revoirs avec le temps et recommandent la réalisation d'un exercice de modélisation hydraulique afin d'évaluer avec plus d'exactitude les impacts hydrauliques de la réfection des revoirs. La présente étude vise à évaluer l'ordre de grandeur de ces impacts hydrauliques.

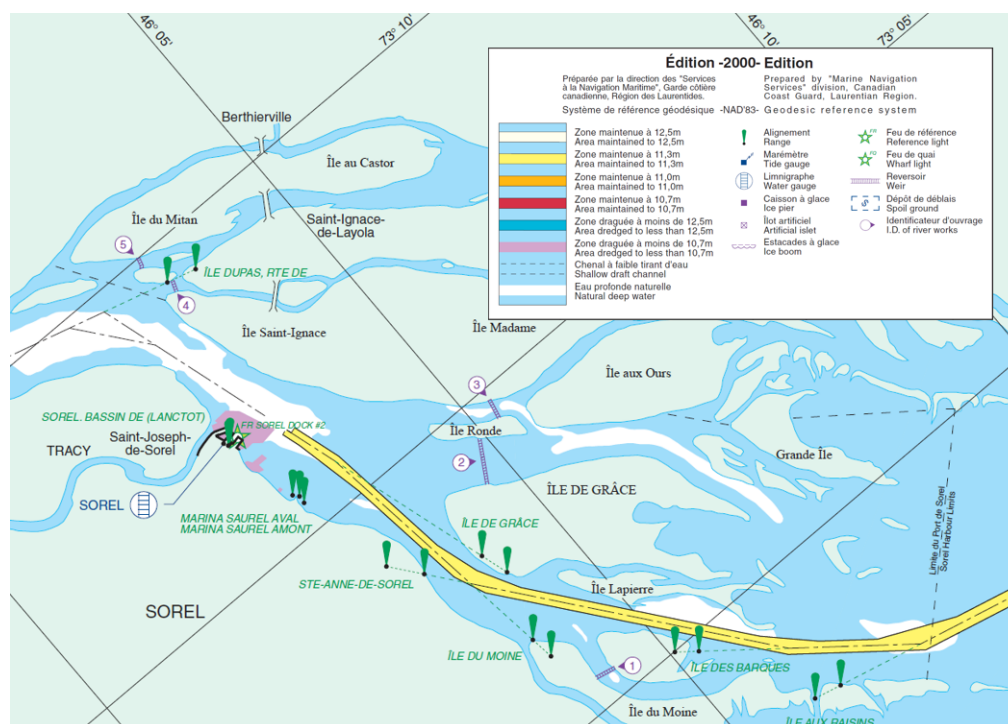
² Les résultats de Dumont (1996) montrent que l'augmentation des niveaux d'eau est plus élevée en conditions d'hydraulicité moyenne et plus faible en conditions de crue.

La revue de la littérature disponible fournit un aperçu de préoccupations historiques et de plusieurs analyses des impacts de la réfection des réservoirs. Il est cependant à noter que les effets de la réfection des réservoirs dépendent de la nature des travaux de réfection et des aménagements spécifiques qui seront effectués. En ce sens, il apparaît raisonnable d'étudier et d'évaluer les impacts potentiels de projets de réfection spécifiques sur l'hydraulique ainsi que le régime hydrosédimentaire.

2 Variantes à l'étude

2.1 Conditions telles que relevées en 2017

Les cinq revoirs sont construits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre (Figure 2). Le revoir 1 est situé entre l'île du Moine et l'île des Barques. Le revoir 2 est localisé entre l'île Ronde et l'île de Grace. Le revoir 3 est situé entre l'île Ronde et l'île Saint-Ignace. Le revoir 4 est localisé entre l'île Saint-Ignace et l'île aux Cochons. Enfin, le revoir 5 est situé entre l'île du Mitan et l'île aux Cochons.



Adaptée de Garde côtière canadienne – Région Laurentienne (2000)

Figure 2 - Localisation des revoirs (structures mauves numérotées de 1 à 5)

Un relevé détaillé des revoirs réalisé en 2017 a permis d'évaluer les écarts entre l'élévation pré-réfection de la crête des revoirs et leur cote de conception de 4,385 m (IGLD85) (Tableau 3). Ces écarts témoignent des dommages et des changements qu'ont subis les revoirs entre le moment de leur dernière réfection et celui où ils ont été relevés.

Tableau 3 - Caractéristiques des revoirs relevés en 2017

Revoir	Longueur ¹ (m)	Élévation minimale de la crête (m, IGLD85)	Écart avec la cote de conception (m)	Élévation moyenne de la crête (m, IGLD85)	Écart moyen avec la cote de conception (m)
1	346	2,15	2,23	3,56	0,83
2	980	2,14	2,24	3,58	0,81
3	364	1,60	2,79	3,49	0,90
4	192	3,11	1,27	3,93	0,45
5	212	3,15	1,24	3,94	0,44

Source : ¹Garde côtière canadienne (2017a)

2.2 Variantes de réfection

Tel que mentionné à la section 1.1, les configurations dites post-réfection des revoirs n'étaient pas disponibles au moment d'effectuer les modélisations. En guise de première hypothèse, les géométries utilisées pour la modélisation hydrodynamique sont celles présentées dans le Plan directeur des revoirs (Garde côtière canadienne, 2017a). Les géométries extérieures comprennent des pentes de 1H:1V pour le versant amont des ouvrages et de 1,5H:1V (33,7°) pour le versant aval (Tableau 4). La crête de ces géométries s'élève à la cote de conception, soit 4,385 m (IGLD85) et leur largeur est spécifique à chaque revoir, variant entre 5,1 et 10,9 m.

Tableau 4 - Caractéristiques géométriques des revoirs modélisés pour la configuration post-réfection

Revoir	Largeur de la crête (m)	Pente amont	Pente aval	Élévation de la crête (m, IGLD85)
1	5,1	1H:1V	1,5H:1V (33,7°)	4,385
2	7,6			
3	8,3			
4	10,9			
5	7,5			

Source : Garde côtière canadienne (2017a)

Les modèles numériques d'élévation (MNE) de chacun des revoirs sont présentés aux Figures 3 à 7, d'abord en conditions telles que relevées en 2017, puis avec les géométries extérieures ajustées³ dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85). Pour les fins de modélisation, les ouvrages sont considérés rigides, imperméables et n'évoluent pas dans le temps.

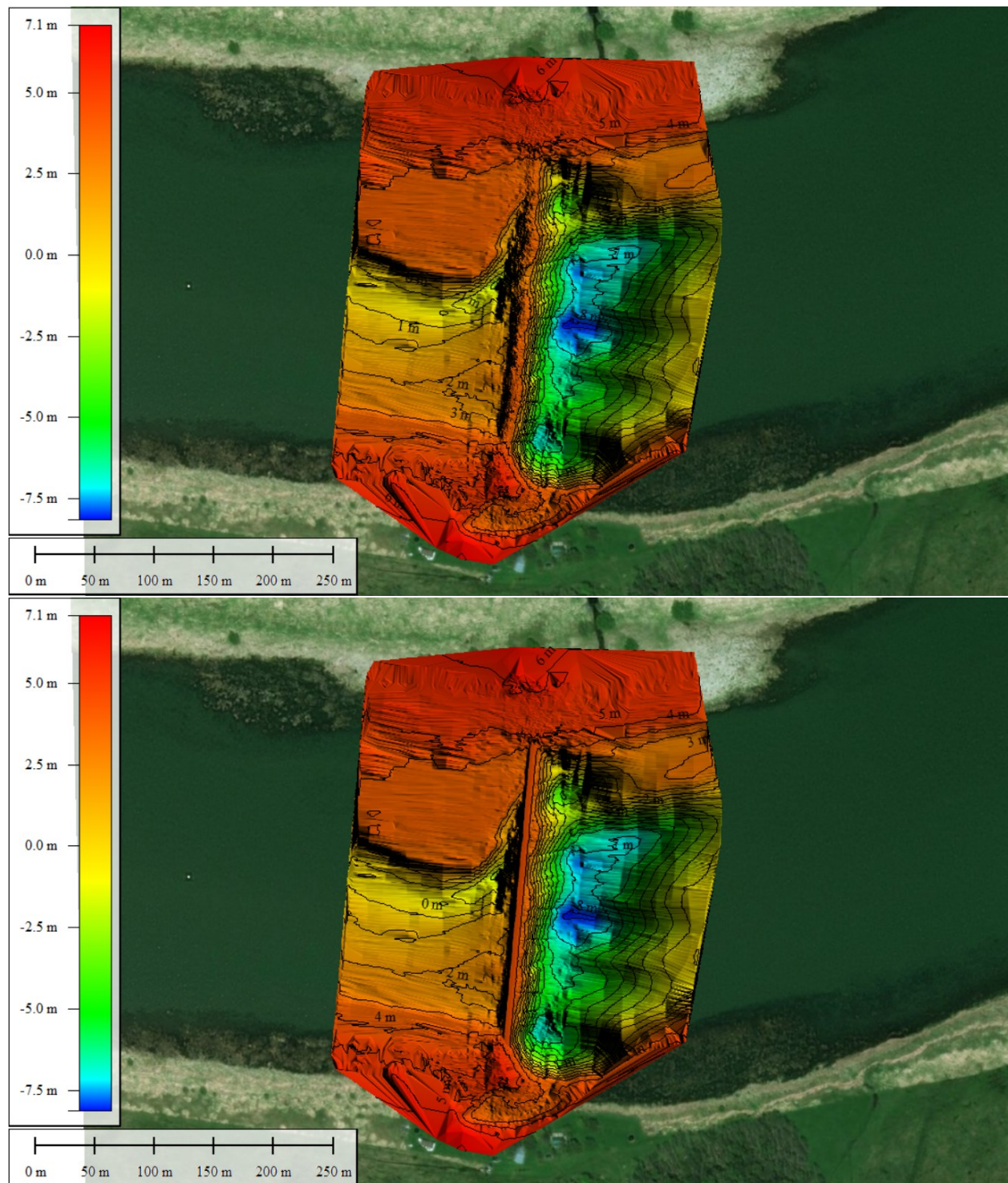
Aucun effet de tassement géotechnique, aucun dommage structural post-réfection ni aucun phénomène d'érosion des revoirs ou des berges de l'archipel ne sont considérés par la présente modélisation.

2.3 Variantes modélisées

Trois variantes sont étudiées pour la modélisation :

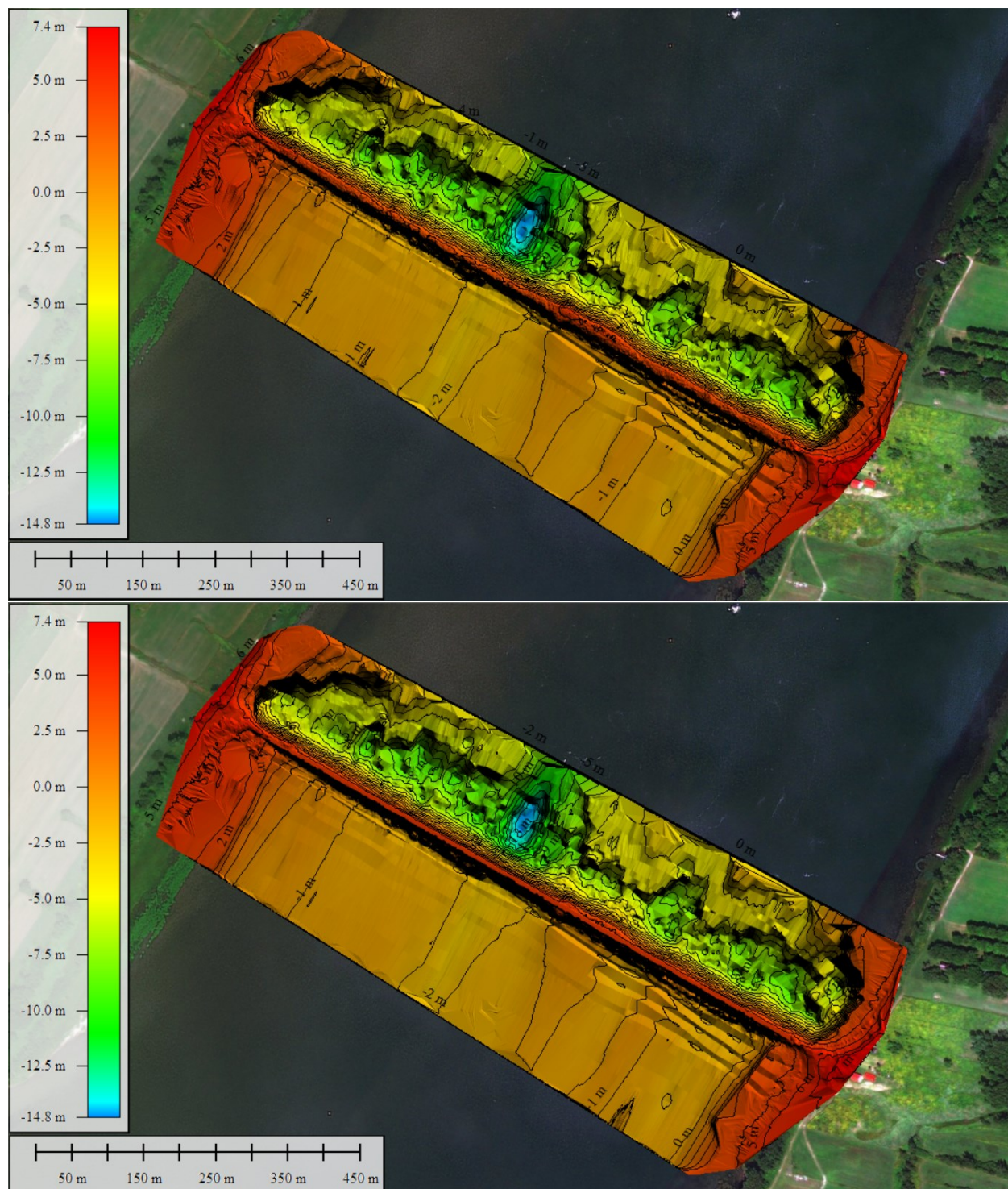
- les conditions relevées en 2017 (état dit « pré-réfection »);
- les 5 revoirs restaurés selon leur géométrie extérieure dont la crête est à la cote 4,385 m;
- les revoirs 1 à 3 uniquement, restaurés selon leur géométrie extérieure dont la crête est à la cote 4,385 m.

³ Plus précisément, les géométries extérieures originales ont été utilisées mais celles-ci ont dû être ajustées compte tenu que chacun des revoirs a vu sa configuration évoluer avec les nombreux cycles dégradation-réfection sur près de 100 ans. Par exemple, aucun des revoirs ne présente sa profondeur (longitudinale) originale en raison de la déposition des sédiments à l'amont des ouvrages et des roches entraînées par le courant vers l'aval.



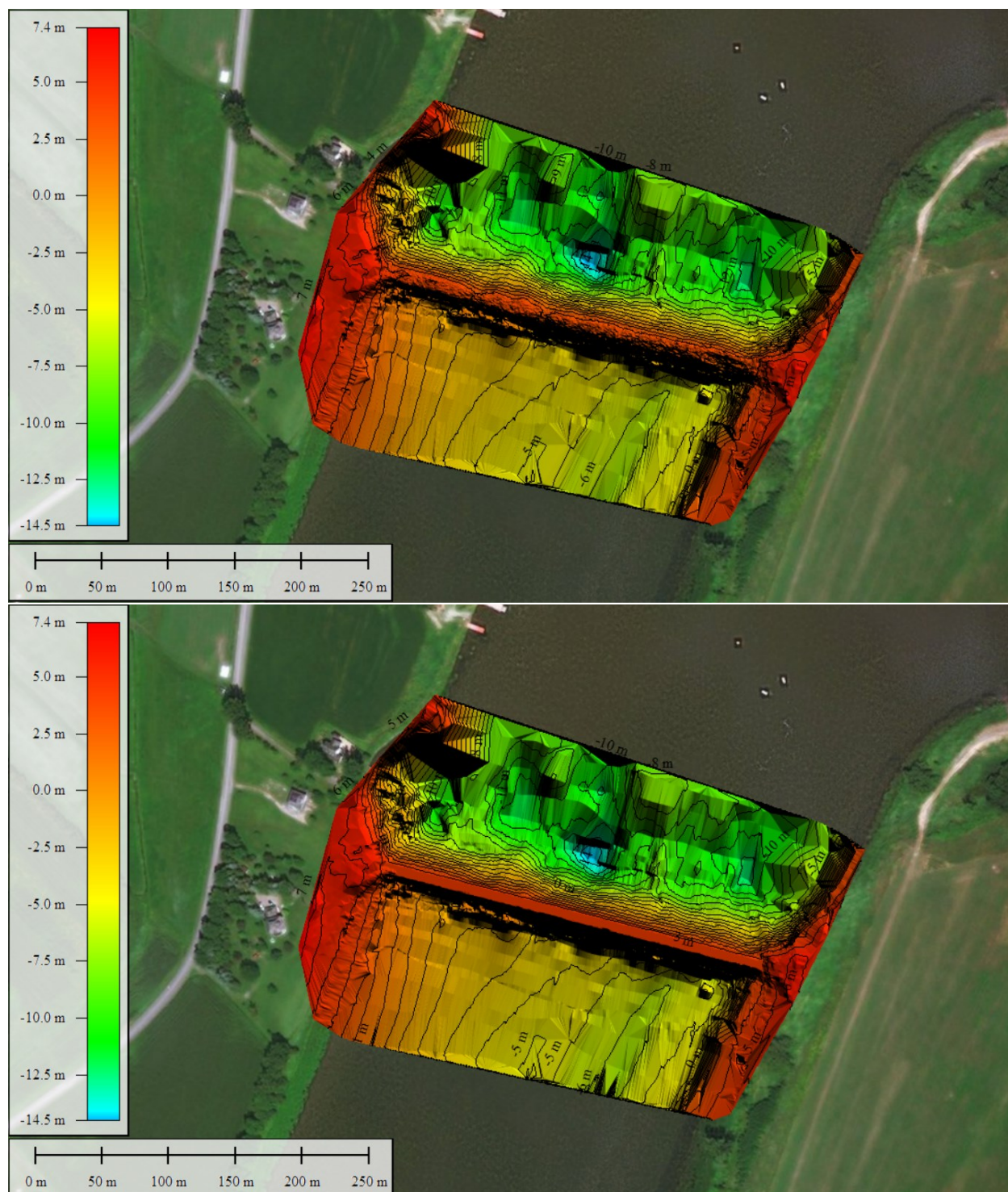
Source des données de 2017 : Relevés de la GCC

Figure 3 - Modèle numérique d'élévation du réservoir 1 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)



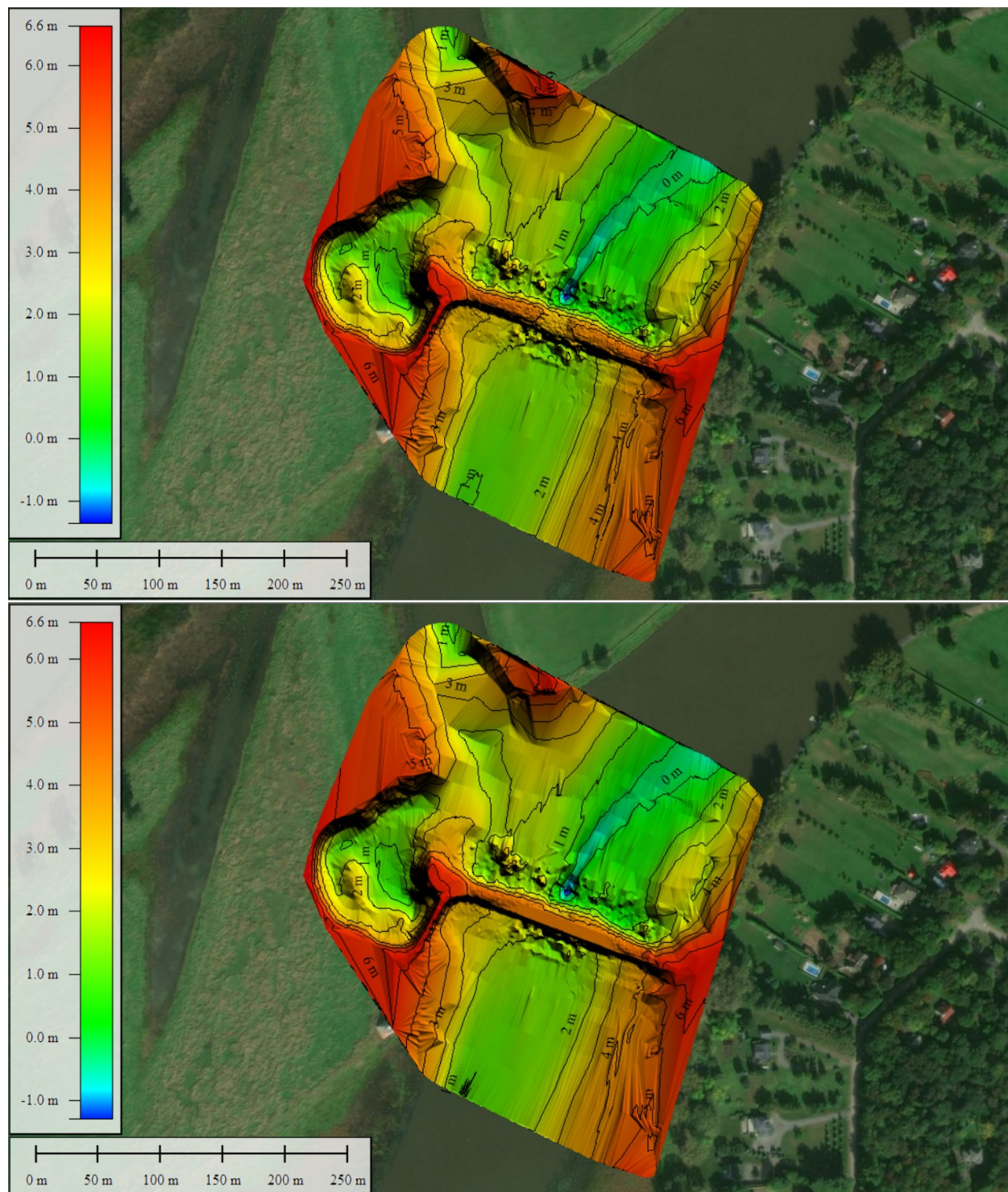
Source des données de 2017 : Relevés de la GCC

Figure 4 - Modèle numérique d'élévation du réservoir 2 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)



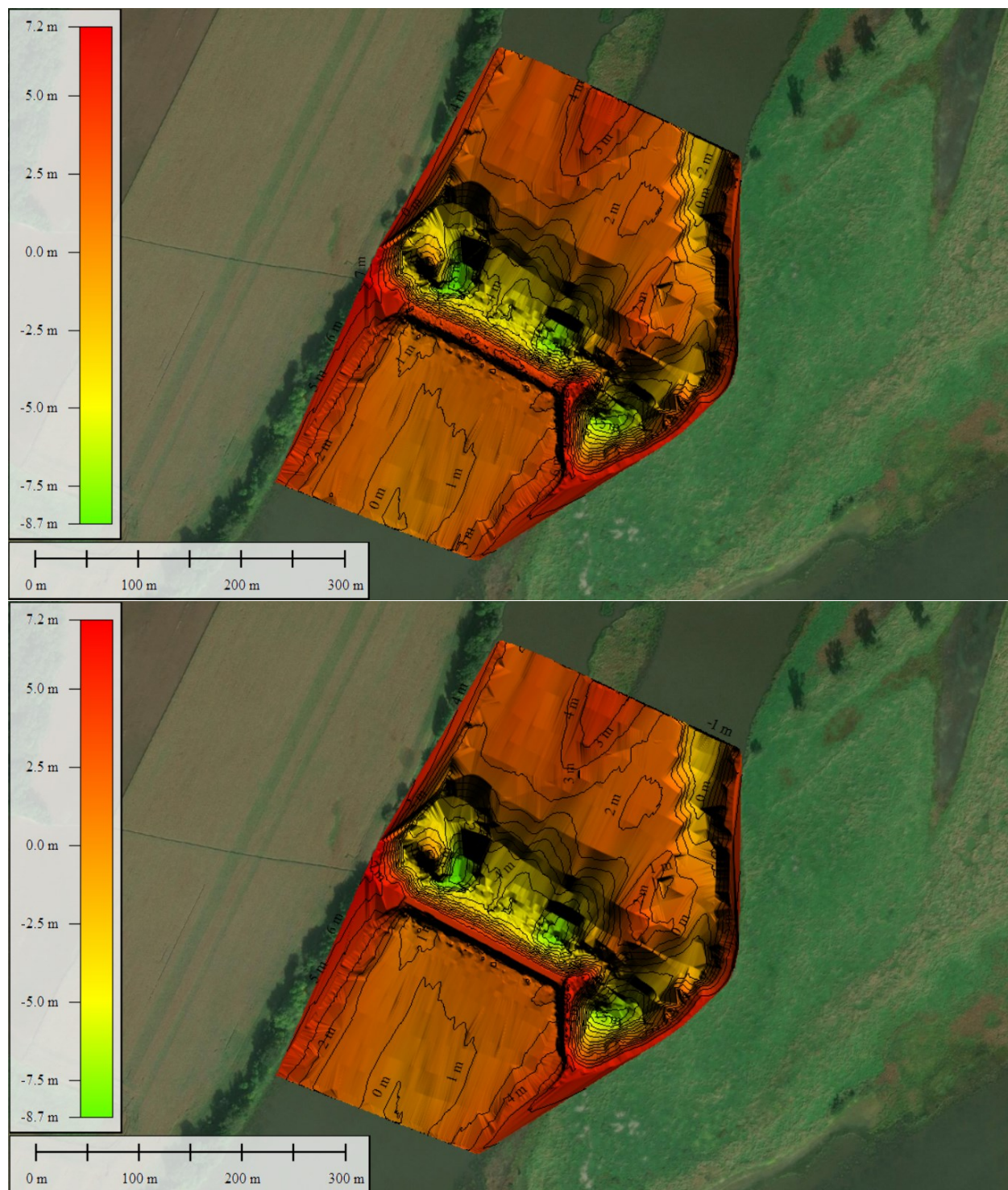
Source des données de 2017 : Relevés de la GCC

Figure 5 - Modèle numérique d'élévation du réservoir 3 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)



Source des données de 2017 : Relevés de la GCC

Figure 6 - Modèle numérique d'élévation du réservoir 4 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)



Source des données de 2017 : Relevés de la GCC

Figure 7 - Modèle numérique d'élévation du réservoir 5 en conditions pré-réfection (haut) et avec géométrie extérieure ajustée – Crête à la cote 4,385 m (IGLD85) (bas)

3 Conditions hydrodynamiques

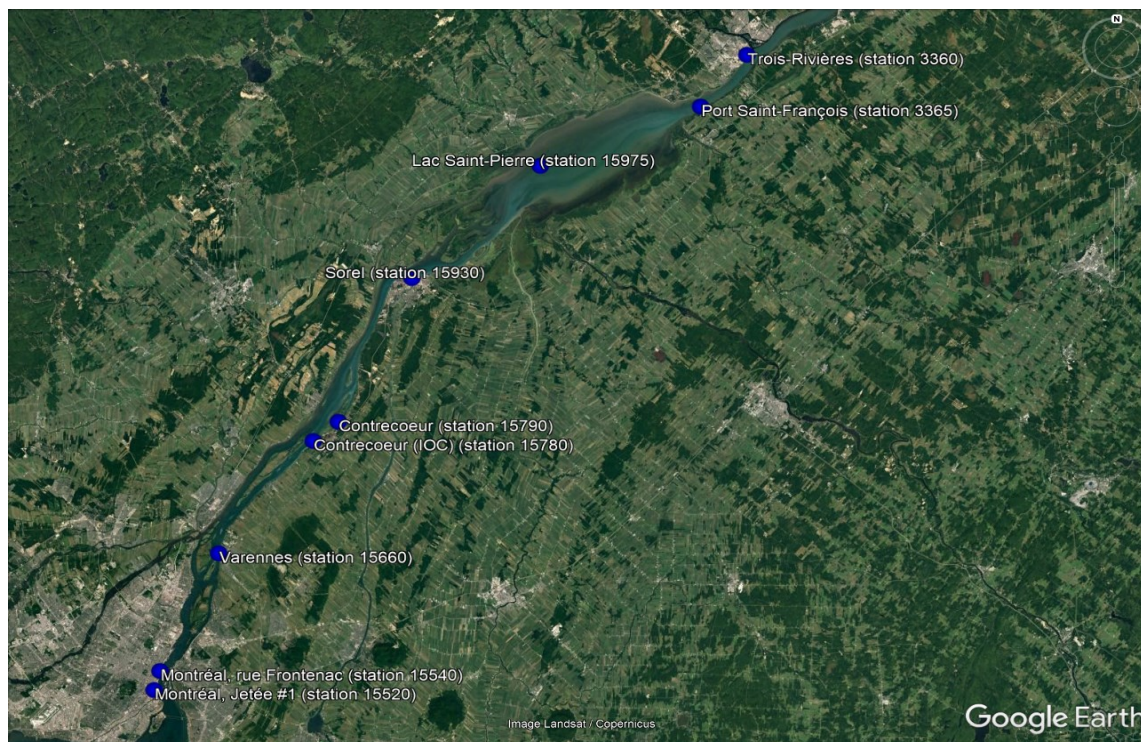
3.1 Niveaux d'eau

Les caractéristiques des stations hydrométriques retenues pour l'étude sont présentées au Tableau 5 et leurs localisations sont illustrées à la Figure 8. La Figure 9 compare les niveaux d'eau pour la période allant de 1963 à 2019 pour ces mêmes stations, entre Montréal et Trois-Rivières.

Tableau 5 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues pour l'étude

Nom de la station de Pêches et Océans Canada (n° de la station)	Période de données disponibles	Distance longitudinale de Sorel (km)
Jetée #1 (n° 15520)	1913-2020	67
Frontenac (n° 15540)	1961-2020	63
Varenes (n° 15660)	1961-2020	45
Contrecoeur (IOC) (n° 15780)	1992-2020	25
Contrecoeur (n° 15790)	1966-1993	20
Sorel (n° 15930)	1966-2020	N/A
Lac Saint-Pierre (n° 15975)	1914-1956, 1961, 1978-2020	22
Port Saint-François (n° 3365)	1966-1976, 1981-1995, 1999-2020	45
Trois-Rivières (n° 3360)	1912-1939, 1946, 1957-2020	54

Source : <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/list-liste-fra.asp?user=isdm-gdsi®ion=LAU&tst=1>



Source de l'imagerie satellitaire : Google Earth

Figure 8 - Localisation des stations hydrométriques de Pêches et Océans Canada à Jetée #1 (n° 15520), Frontenac (n° 15540), Varenes (n° 15660), Contrecoeur (IOC) (n° 15780), Contrecoeur (n° 15790), Sorel (n° 15930), Lac Saint-Pierre (n° 15975), Port Saint-François (n° 3365), Trois-Rivières (n° 3360)

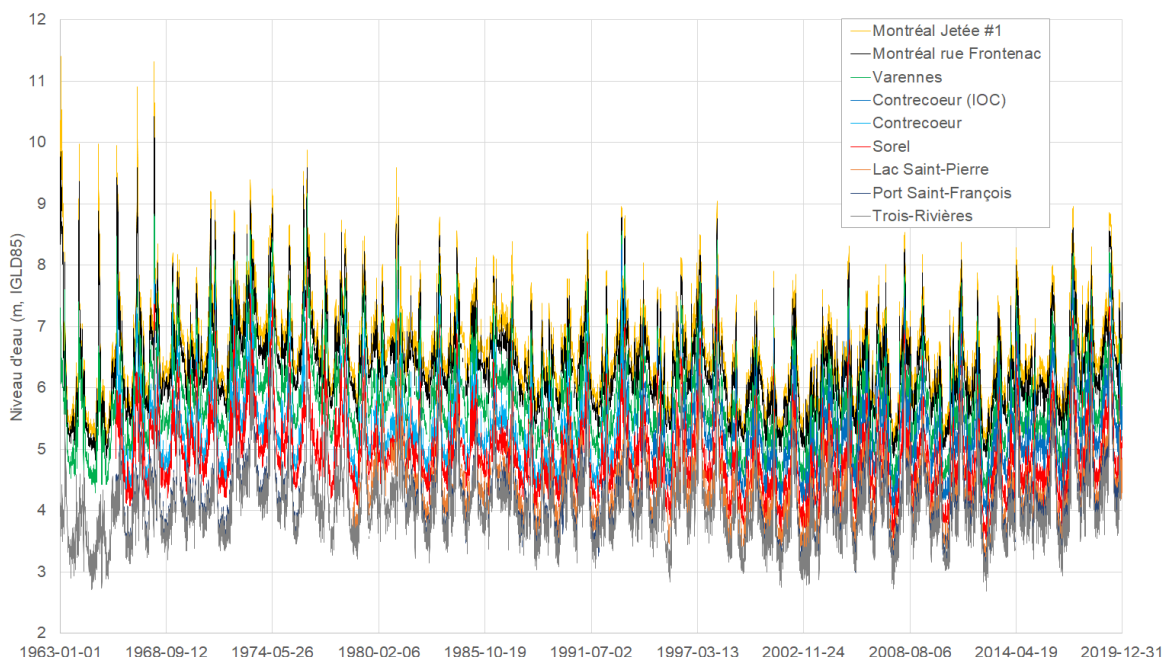
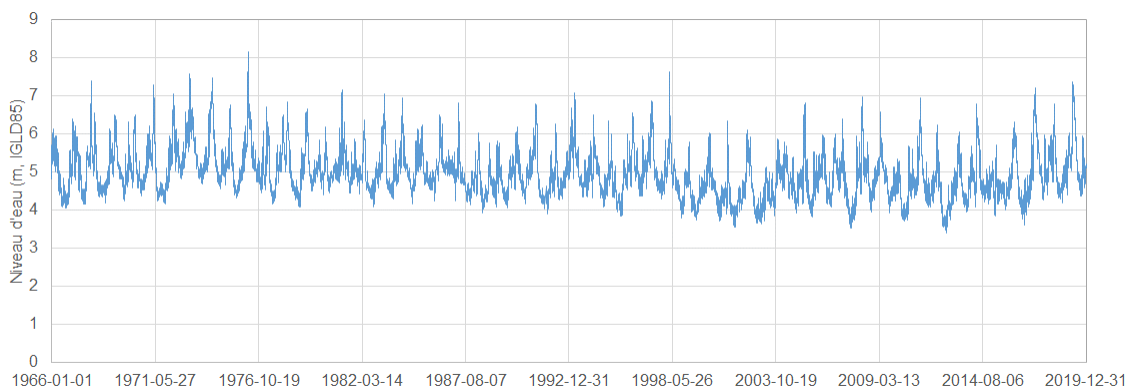


Figure 9 - Niveaux d'eau journaliers moyens aux stations hydrométriques Jetée #1 (n° 15520)⁴, Frontenac (n° 15540), Varennes (n° 15660), Contrecoeur (IOC) (n° 15780), Contrecoeur (n° 15790), Sorel (n° 15930)⁵, Lac Saint-Pierre (n° 15975), Port Saint-François (n° 3365), Trois-Rivières (n° 3360) pour la période comprise entre 1963 et 2019

La station de Sorel est celle située la plus près des revoirs. Le début des enregistrements numériques à cette station coïncide avec la réfection de 1966. Entre 1966 et 2019, les niveaux d'eau ont généralement varié entre 3,4 et 8,2 m (IGLD85) à cette station (Figure 10). Au cours de cette même période, on observe une tendance générale de la diminution des niveaux d'eau minimums, moyens et maximums annuels (Figure 11). Cette tendance n'a pas été quantifiée en raison de la variabilité interannuelle significative qui n'est pas négligeable et du fait que la tendance des vingt dernières années n'est pas aussi nette que celle des trente premières années. Ces tendances sont également observées sur les courbes classées pour lesquelles on note que globalement, les niveaux d'eau semblent plus élevés pour la période comprise entre 1966 et 1985 par rapport à ceux de la période 1996-2015 (Figure 12). Entre 2016 et 2019, on note une augmentation par rapport à la moyenne de la décennie précédente.

⁴ Écart de l'ordre de 5,56 m entre les référentiels IGLD85 et marégraphique à cette station.

⁵ Écart de l'ordre de 3,775 m entre les référentiels IGLD85 et marégraphique à cette station.



Source des données : <http://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/list-liste-fra.asp?user=isdm-gdsi®ion=LAU&tst=1>

Figure 10 - Niveaux d'eau horaires à la station hydrométrique Sorel (n° 15930) pour la période comprise entre 1966 et 2019

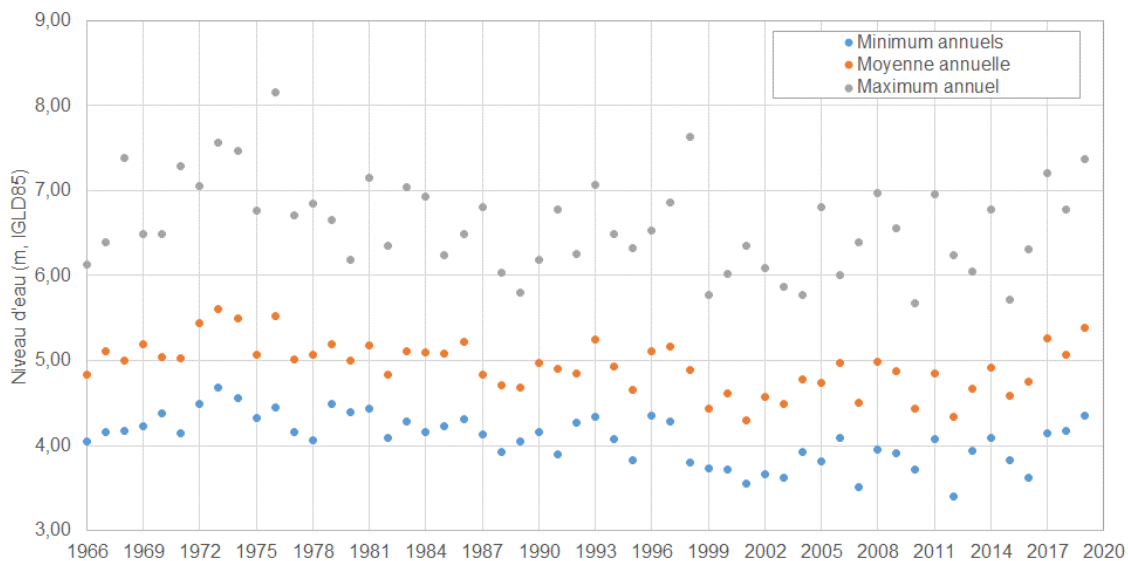


Figure 11 - Niveaux d'eau horaires minimum, moyen et maximum annuels à la station hydrométrique Sorel (n° 15930), pour la période comprise entre 1966 et 2019

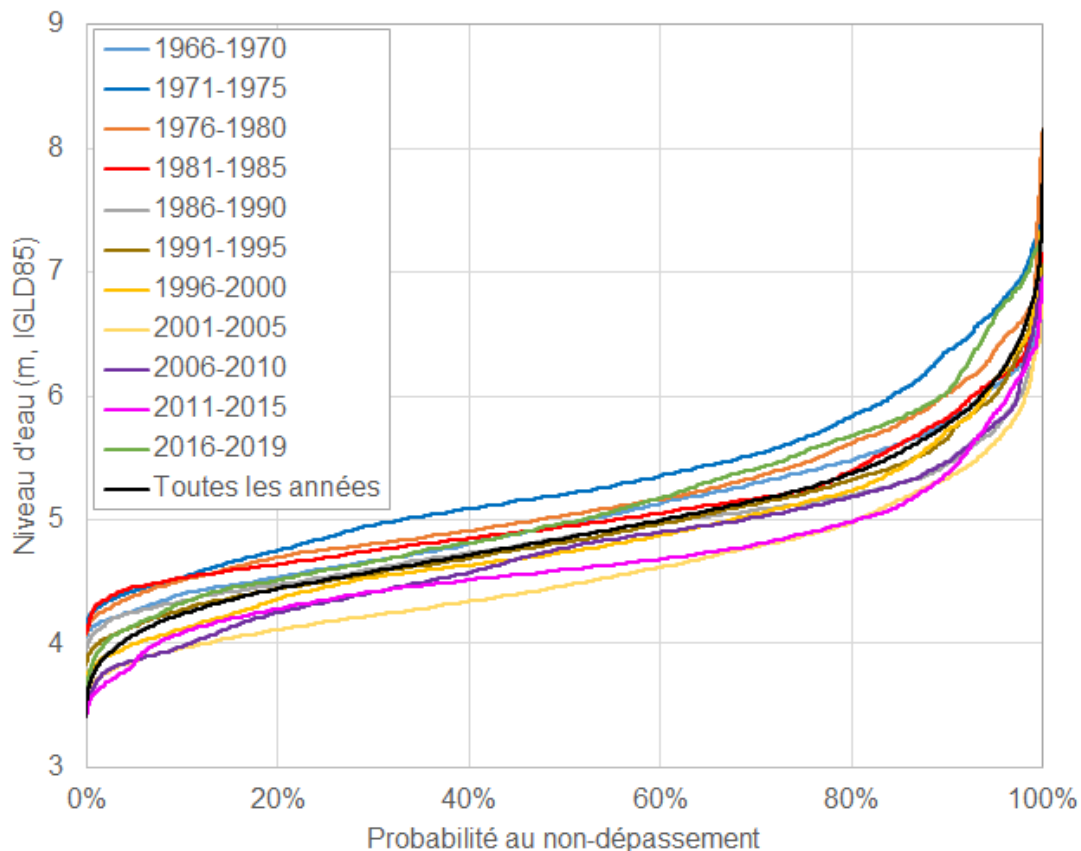


Figure 12 - Courbes classées des niveaux d'eau horaires à Sorel pour différentes périodes entre 1966 et 2019

Historiquement, on observe que les niveaux d'eau enregistrés à Sorel sont plus élevés en avril et mai, en raison de la crue printanière (Figure 13). Les niveaux d'eau sont généralement plus faibles dans les mois d'août, septembre et octobre. Enfin, on remarque qu'en février et mars⁶, soit en période où un couvert de glace recouvre généralement la portion hors chenal du lac Saint-Pierre, les niveaux d'eau sont généralement plus élevés que pour les mois de juin à décembre mais moins élevés qu'aux mois d'avril et mai.

⁶ Notons toutefois que des opérations de déglacage de plusieurs zones hors chenal de navigation du fleuve Saint-Laurent sont généralement entreprises lors du mois de mars.

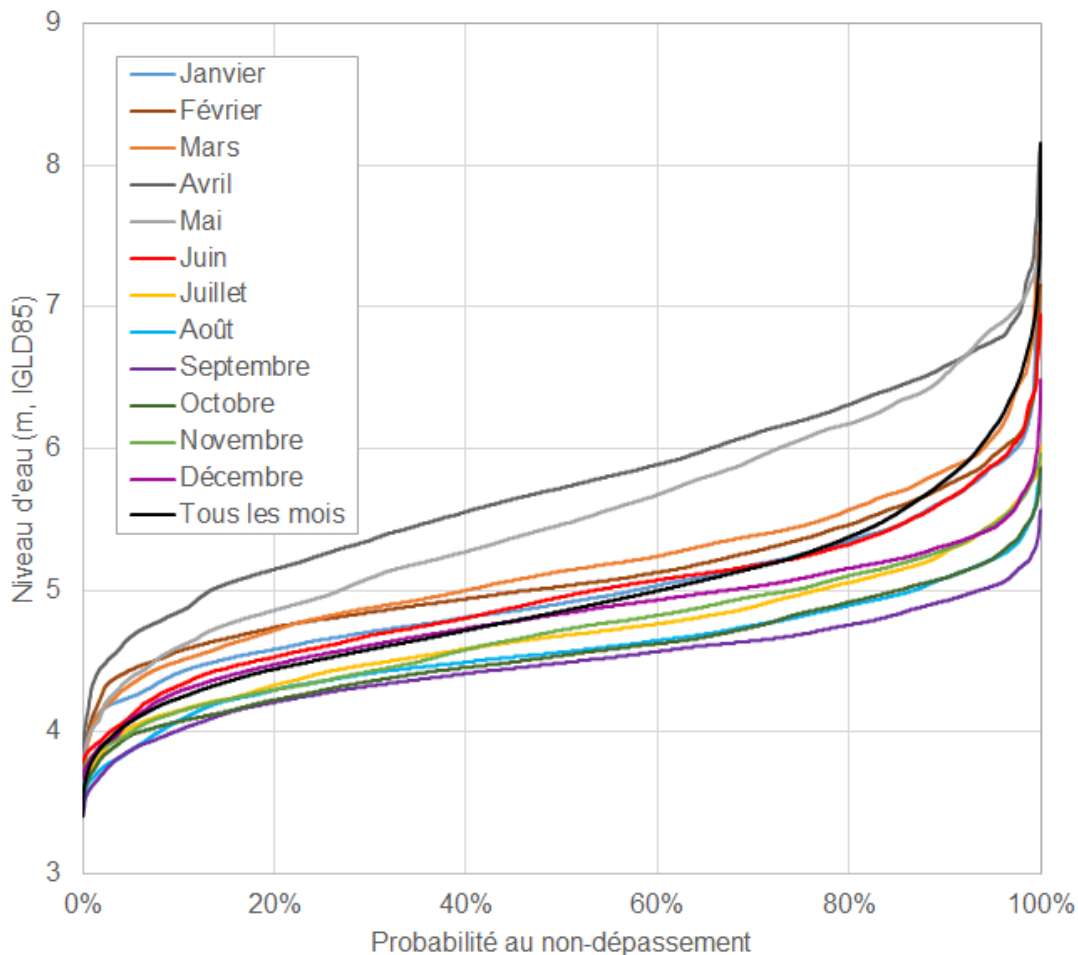


Figure 13 - Courbes classées des niveaux d'eau à Sorel pour différentes périodes de l'année. Données horaires pour la période comprise entre 1966 et 2019

3.2 Débits

Depuis 2000, le Secteur GH collecte et collige des données relatives à la répartition des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre (Figure 14). Ces relevés ont généralement été réalisés en périodes d'eaux libres de glace, la plupart du temps entre avril et novembre, et couvrent une vaste gamme de débits ainsi que des niveaux d'eau variant entre 3,78 et 6,6 m (IGLD85) à la station de Sorel. Ces données permettent d'établir des relations entre les niveaux d'eau et les débits au droit des tronçons relevés, lesquelles sont paramétrisées en fonction des niveaux d'eau à Sorel (Figures 15 à 25).



Source de l'imagerie satellitaire : Google Earth

Figure 14 - Localisation des transects de mesure des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre

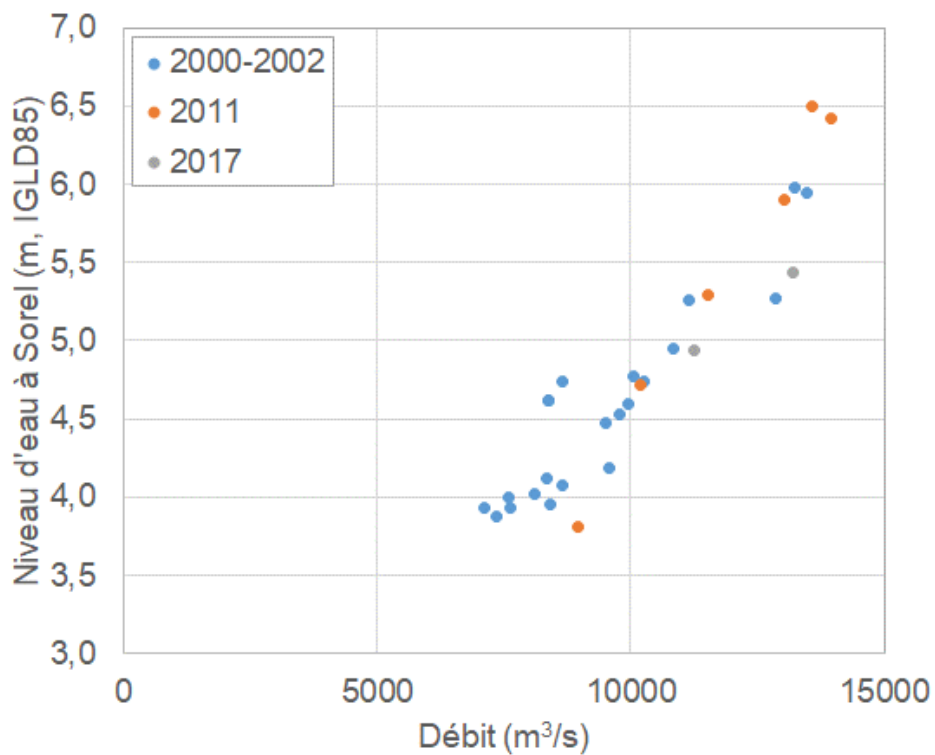


Figure 15 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits du fleuve Saint-Laurent à Tracy

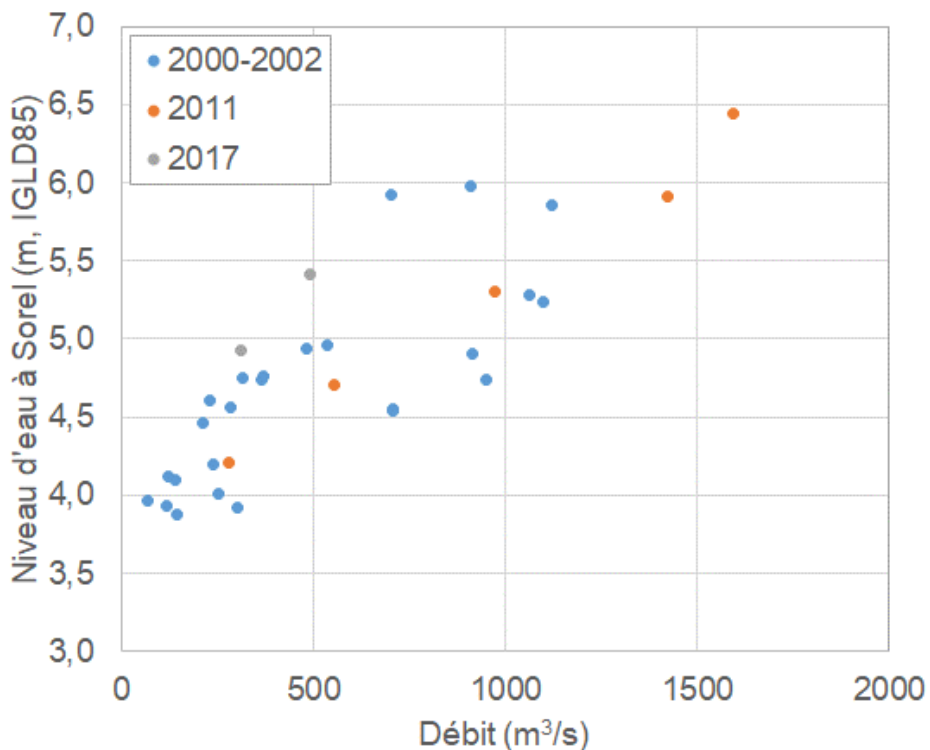


Figure 16 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'embouchure de la rivière Richelieu

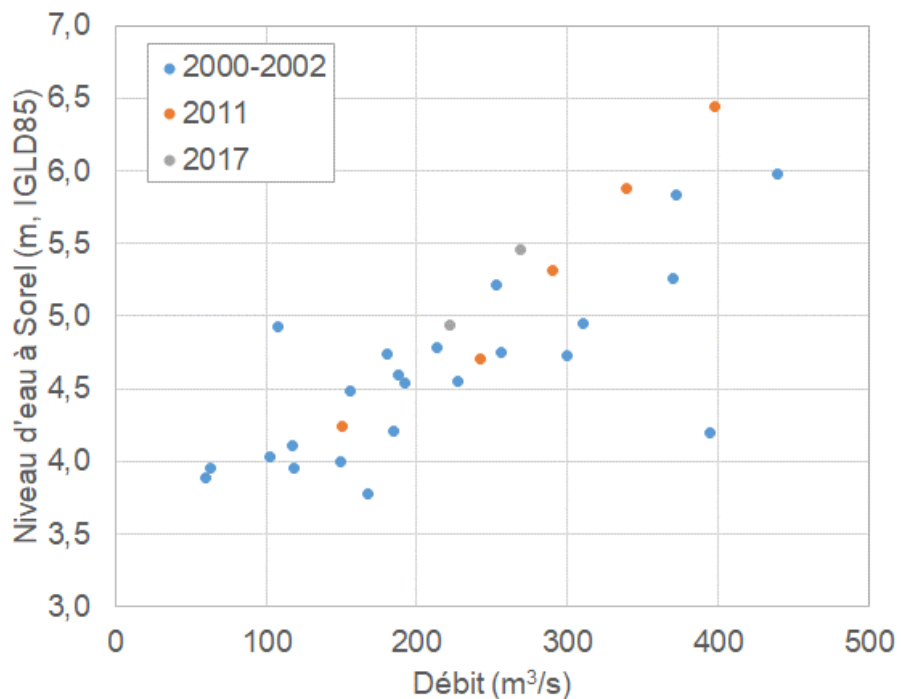


Figure 17 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du reervoir 1

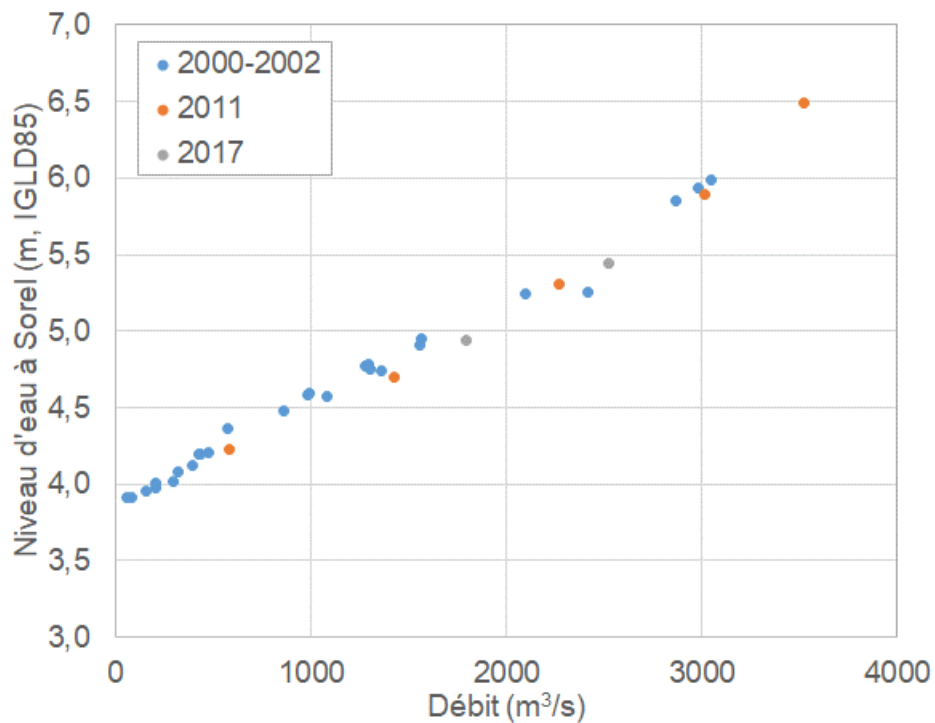


Figure 18 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du reversoir 2

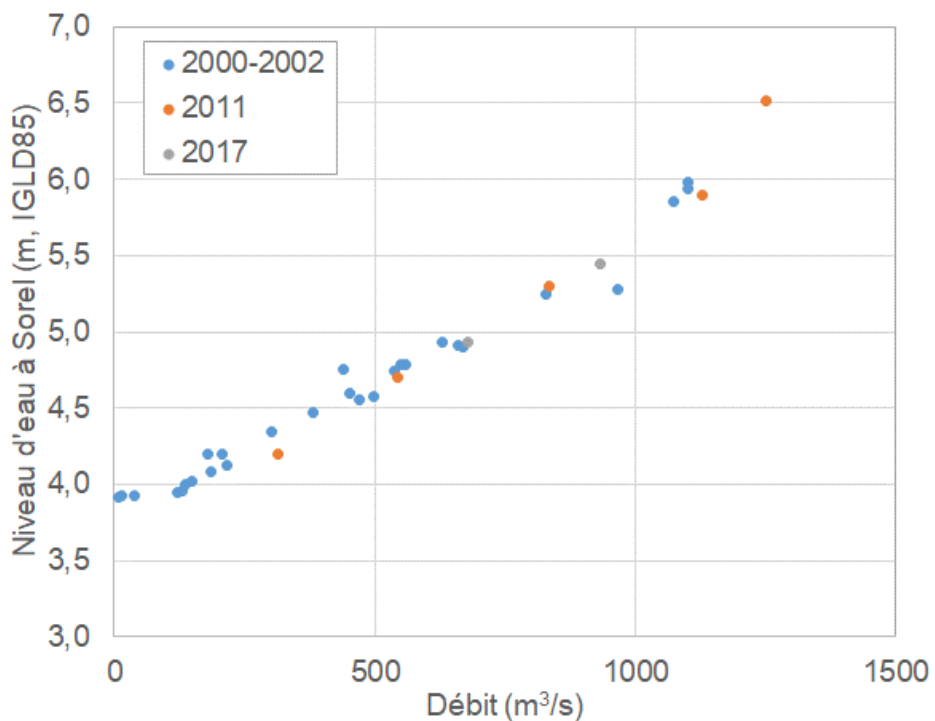


Figure 19 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du reversoir 3

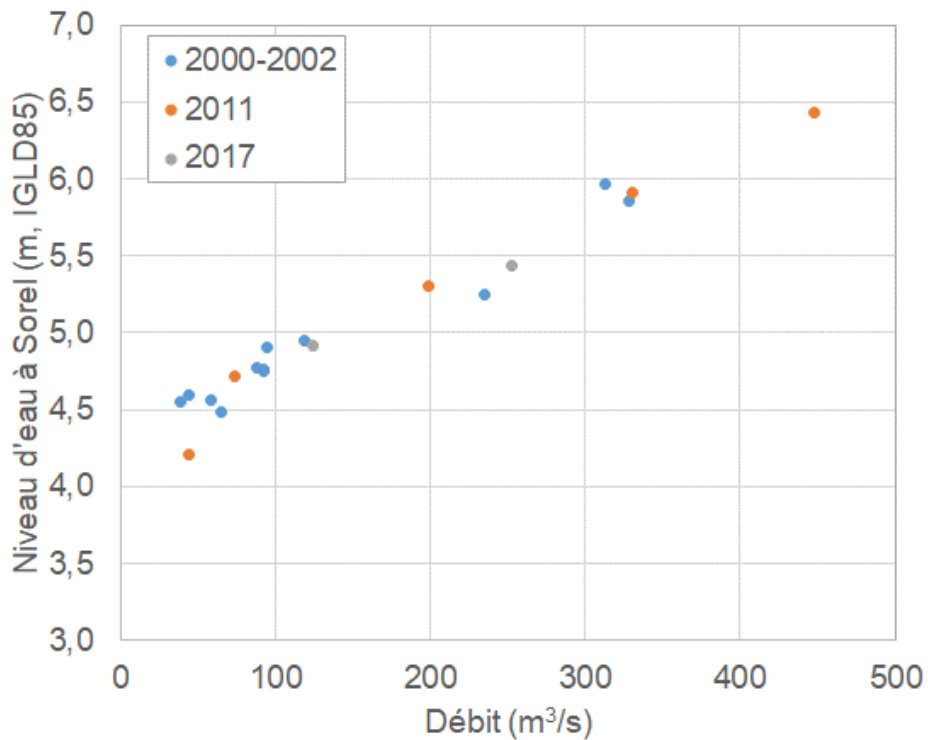


Figure 20 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du reervoir 4

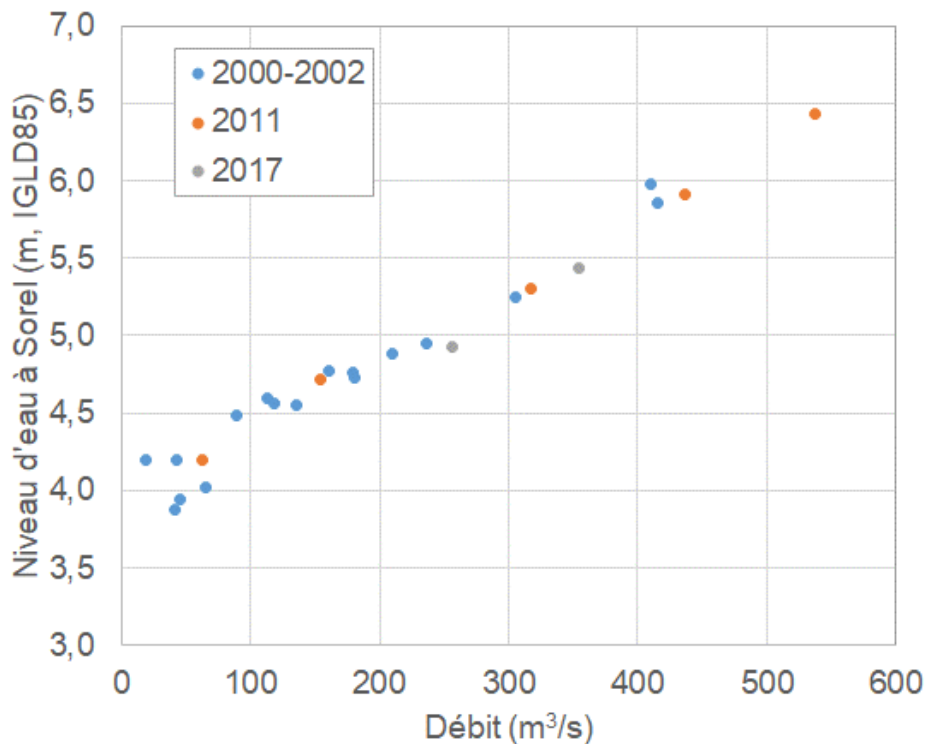


Figure 21 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits à l'amont du reervoir 5

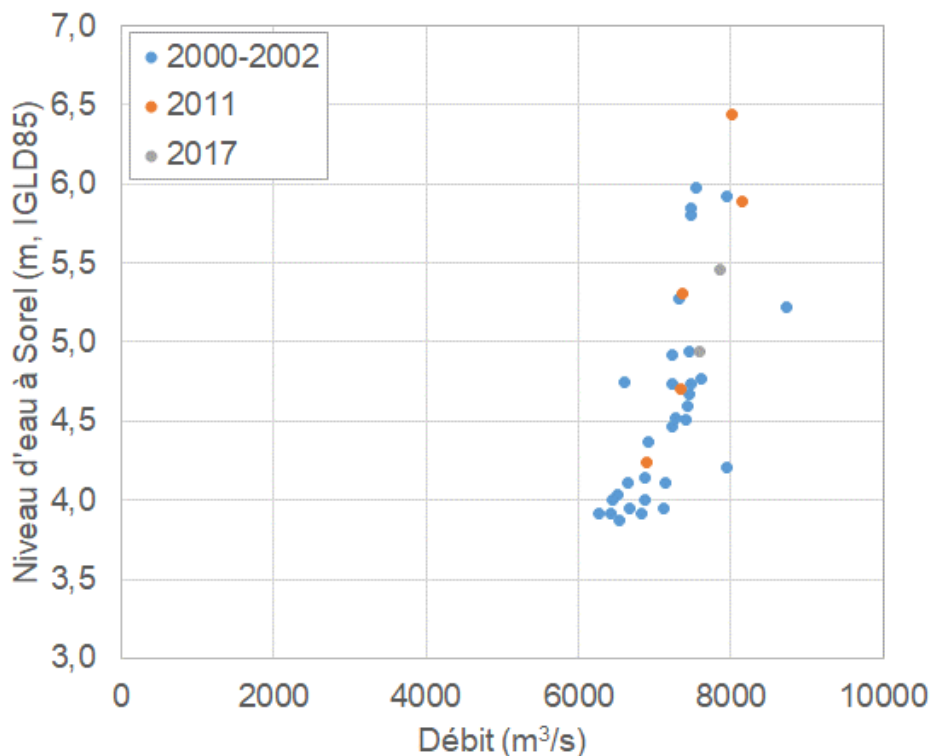


Figure 22 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits dans le bras du chenal de navigation, au droit de l'île des Barques

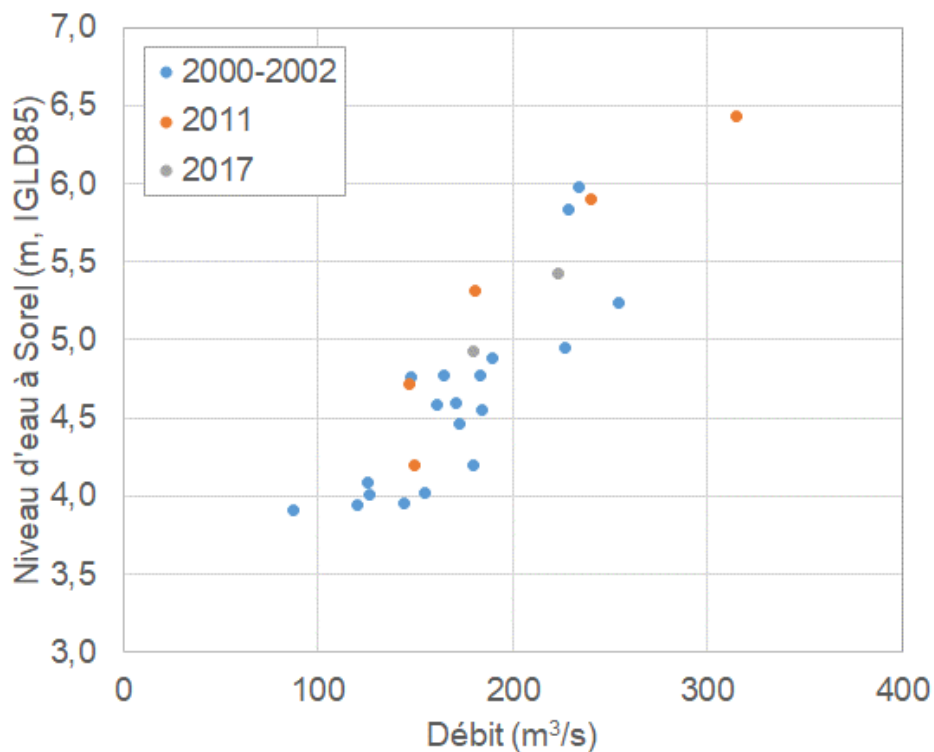


Figure 23 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits au Chenal de Berthier

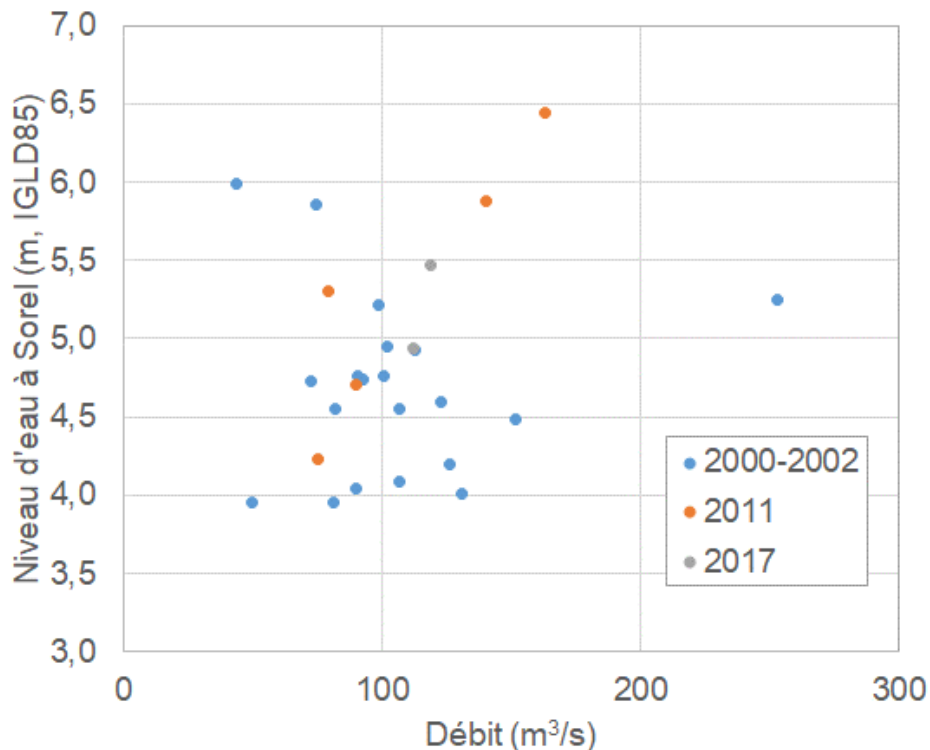


Figure 24 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits au Chenal du Moine

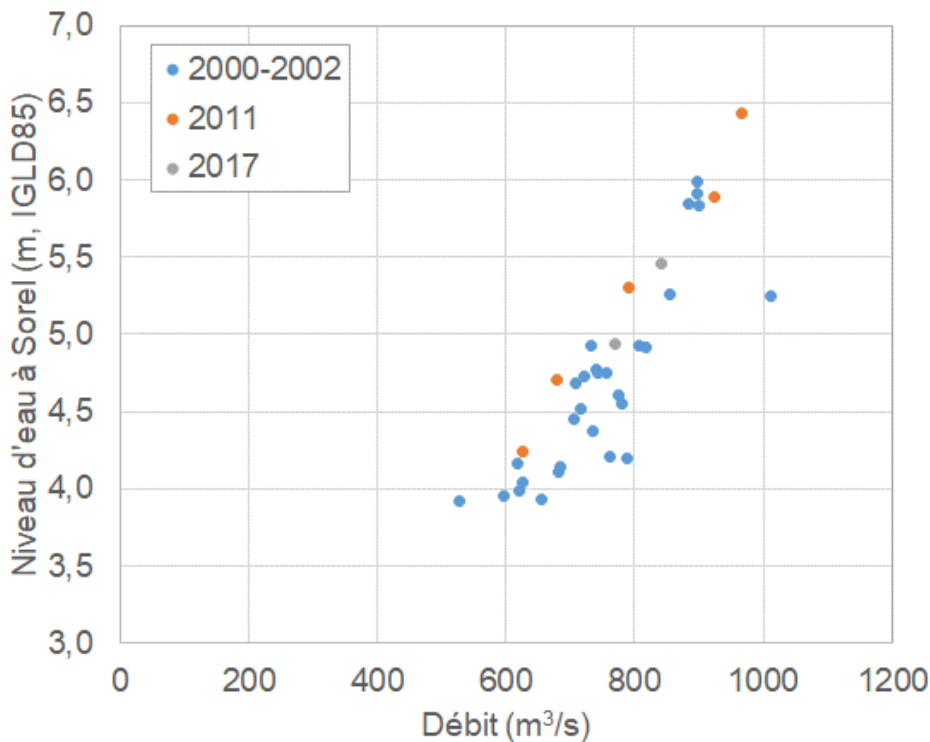


Figure 25 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits au Chenal aux Corbeaux

La majorité du débit entrant dans l'archipel du Lac Saint-Pierre par le fleuve Saint-Laurent à Tracy et par la rivière Richelieu transite par le canal principal de navigation entre l'île des Barques et l'île Lapierre (Figure 26 et Tableau 6). Cette proportionnalité varie toutefois avec le débit entrant. En effet, plus le débit entrant et les niveaux d'eau montent à Sorel, plus la proportion du débit qui transite par le bras du canal de navigation diminue et, conséquemment, celle des chenaux des revoirs augmente. La fraction du débit transitant au revoir 2 augmente de manière significative et sa proportion par rapport au débit total croît lorsque le niveau d'eau du fleuve à Sorel augmente.

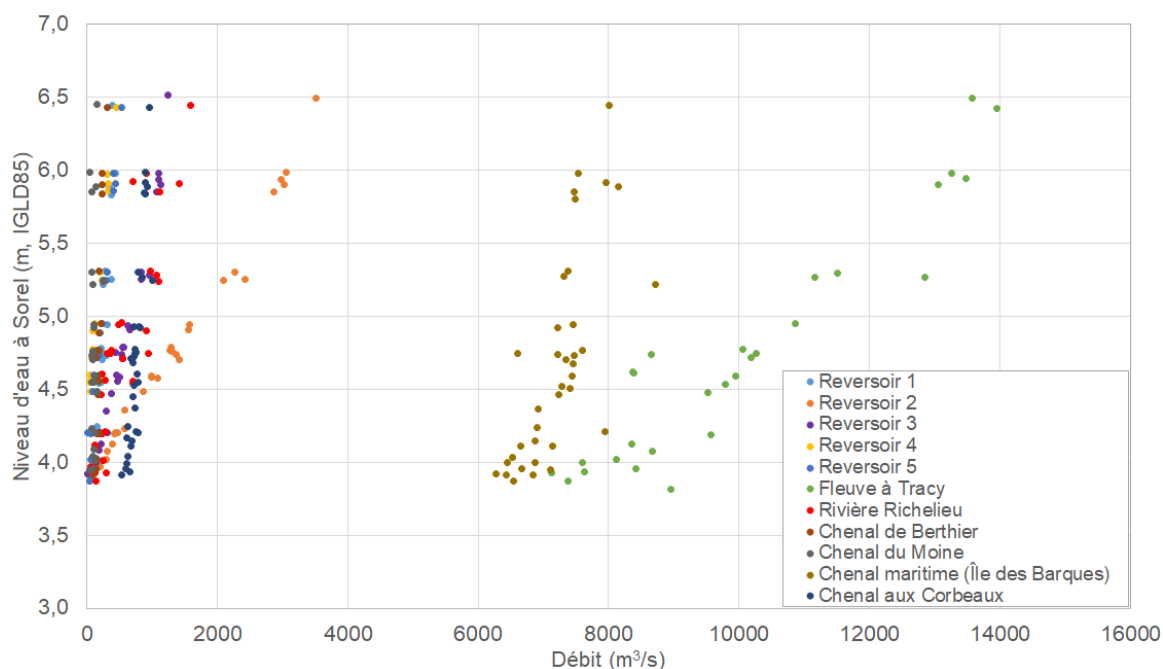


Figure 26 - Relation entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre en conditions d'eaux libres de glace

Tableau 6 - Plage de débits mesurés dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre en conditions d'eaux libres de glace

Localisation	Débit minimum (m³/s)	Débit maximum (m³/s)	Plage de débit (m³/s)
Fleuve à Tracy	7 121	13 947	6 826
Rivière Richelieu	69	1 593	1 523
Revoir 1	60	439	379
Revoir 2	60	3 520	3 460
Revoir 3	8	1 251	1 243
Revoir 4	39	448	409
Revoir 5	19	538	519
Chenal de Berthier	87	315	228
Chenal du Moine	44	253	209
Bras du canal de navigation (île des Barques)	6 277	8 725	2 448
Chenal aux Corbeaux	528	1 012	484

SNC-Lavalin (2003) a modélisé l'effet des conditions hivernales sur les relations entre les niveaux d'eau à Sorel et les débits des revoirs. Pour un niveau d'eau donné à Sorel, les débits modélisés au droit des revoirs en conditions hivernales sont inférieurs à ceux en conditions estivales.

3.3 Vitesses de courant

L'analyse des vitesses de courant repose sur les données relevées par le Secteur GH en conditions d'eaux libres de glace. Les vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation, entre l'île des Barques et l'île Lapierre, montrent une zone de courant dépassant 1 m/s qui varie selon le débit (Figure 27). L'augmentation du niveau d'eau et du débit à Sorel suggère une diminution de la largeur de cette zone de courant. À l'opposé, les vitesses de courant à l'amont des revoirs augmentent généralement lorsque le niveau d'eau et le débit à Sorel croissent (Figures 28 à 32). Au droit des chenaux du Moine, aux Corbeaux et de Berthier, cette tendance à l'accroissement des vitesses avec l'augmentation de débit est aussi observée mais de façon nettement moins marquée (Figures 33 à 35).

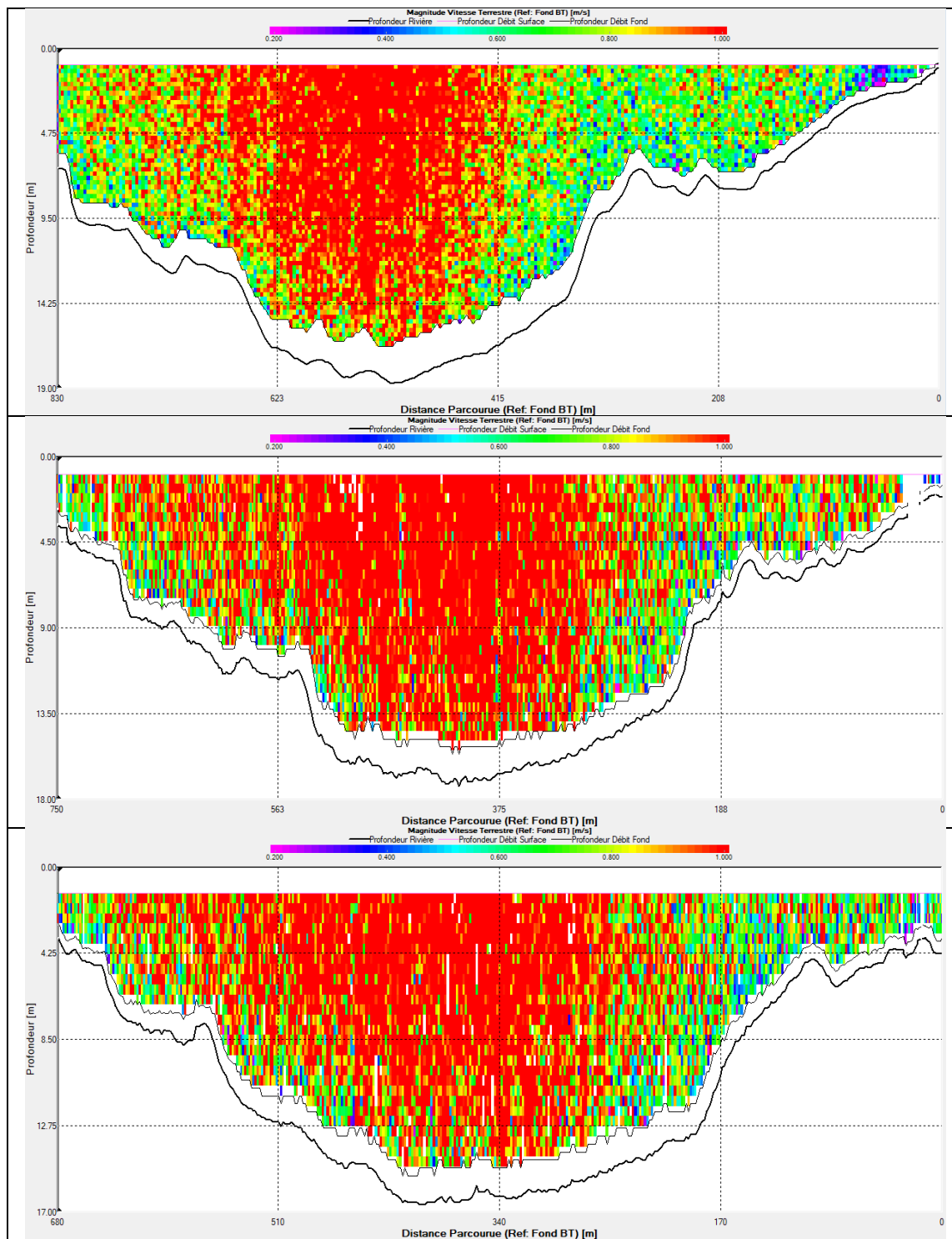


Figure 27 - Répartition des vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation entre l'île des Barques et l'île Lapierre pour différents niveaux d'eau à Sorel.
 Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 7 864 m³/s
 Centre : 2000-06-14, Niveau d'eau = 4,51 m (IGLD85), Débit relevé = 7 408 m³/s
 Bas : 2001-07-25, Niveau d'eau = 4,00 m (IGLD85), Débit relevé = 6 451 m³/s

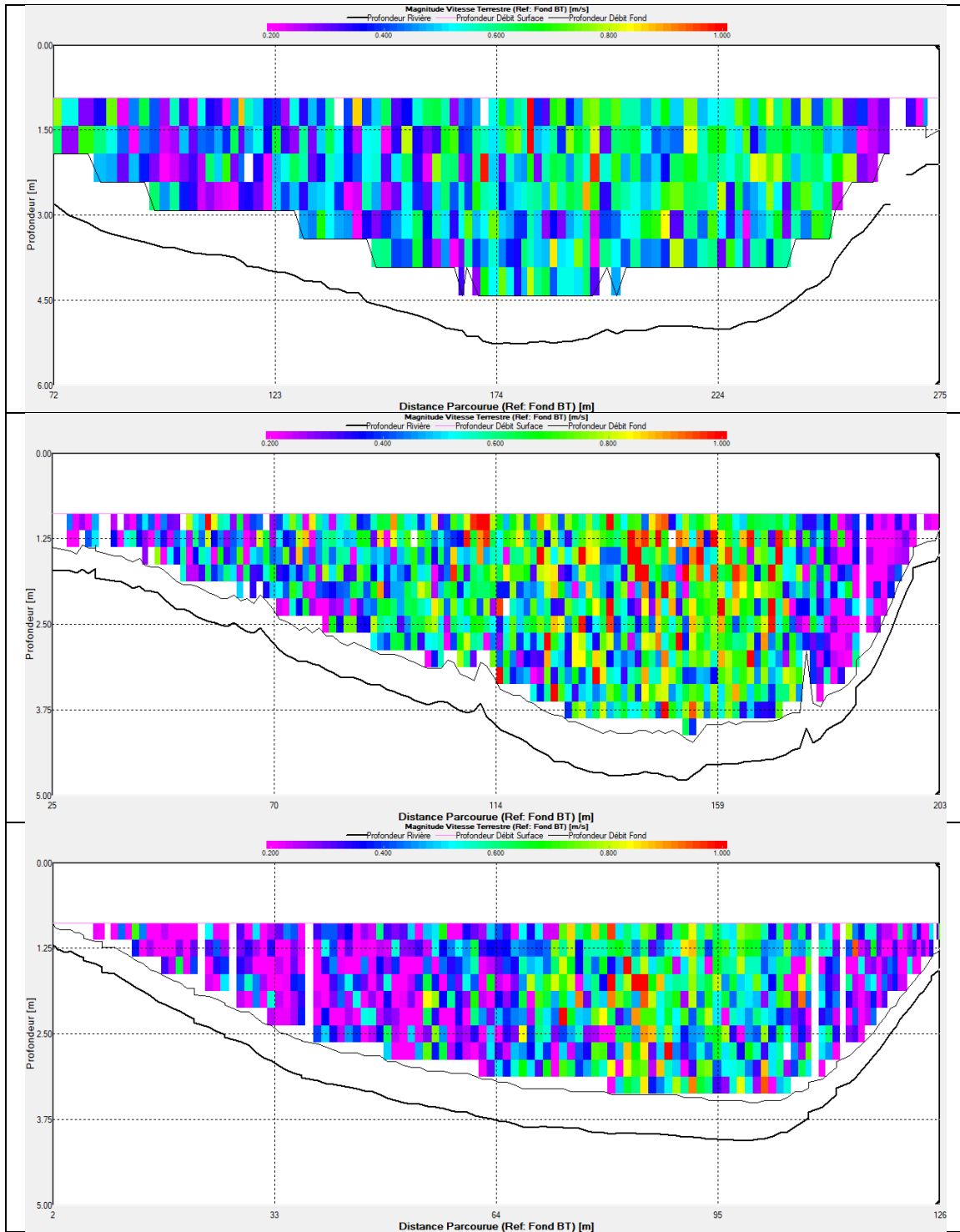


Figure 28 - Répartition des vitesses de courant (rà l'amont du reervoir 1 pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2001-04-18, Niveau d'eau = 5,98 m (IGLD85), Débit relevé = 439 m³/s
 Centre : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 269 m³/s
 Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 222 m³/s

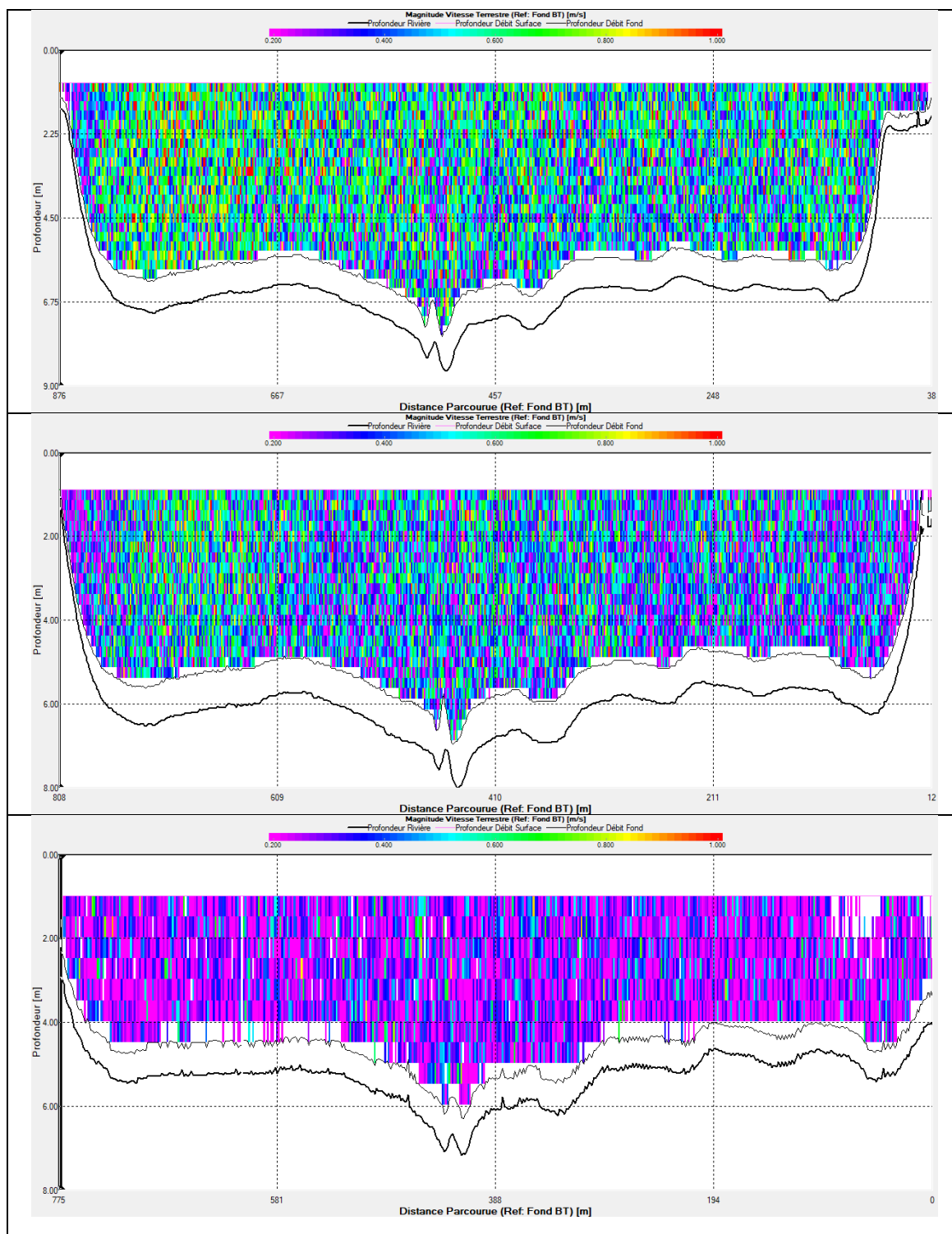


Figure 29 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reervoir 2 pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,44 m (IGLD85), Débit relevé = 2 528 m³/s
Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 1 796 m³/s
Bas : 2000-10-05, Niveau d'eau = 4,08 m (IGLD85), Débit relevé = 320 m³/s

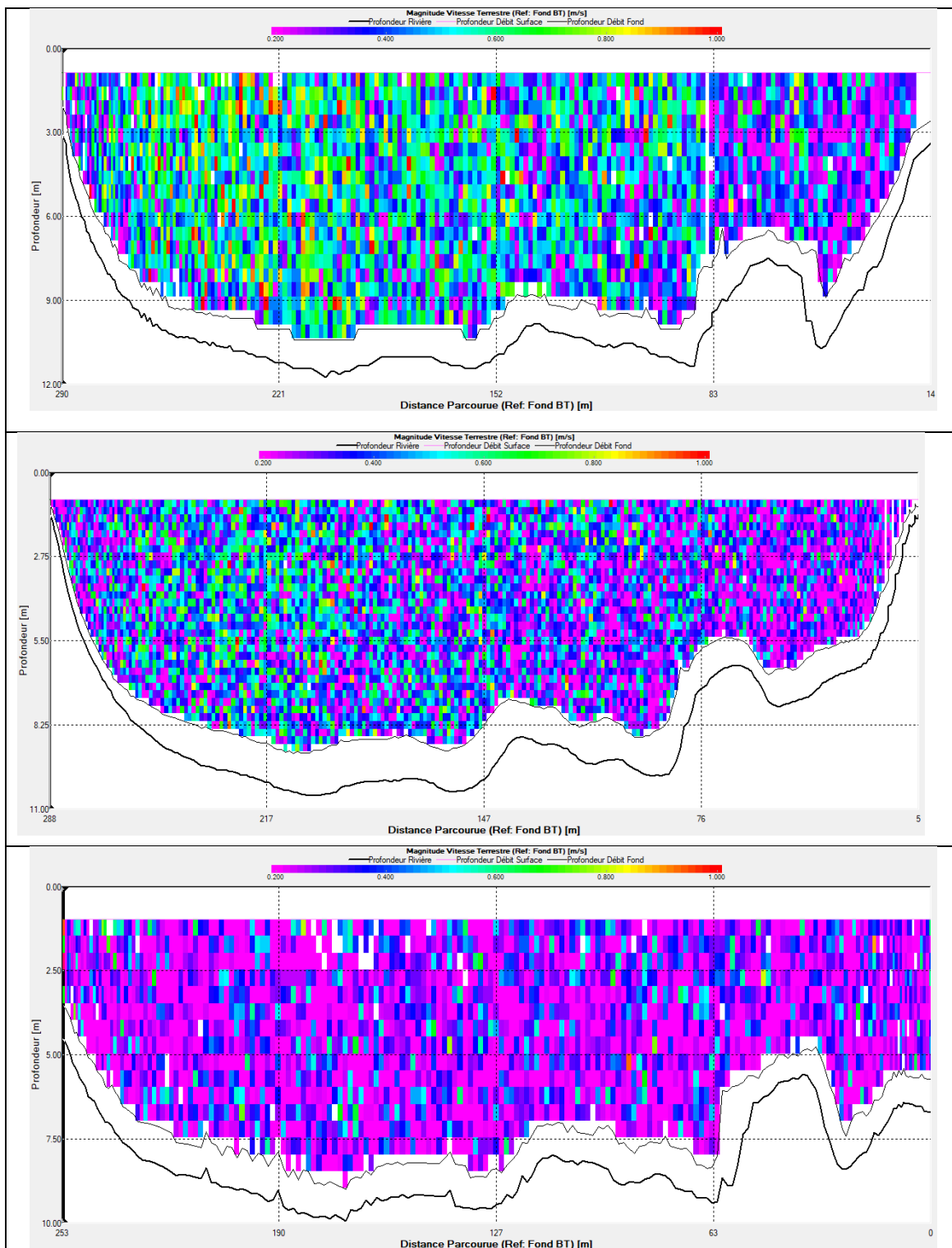


Figure 30 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reervoir 3 pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2000-05-12, Niveau d'eau = 5,85 m (IGLD85), Débit relevé = 1 075 m³/s

Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 680 m³/s

Bas : 2000-10-27, Niveau d'eau = 4,00 m (IGLD85), Débit relevé = 137 m³/s

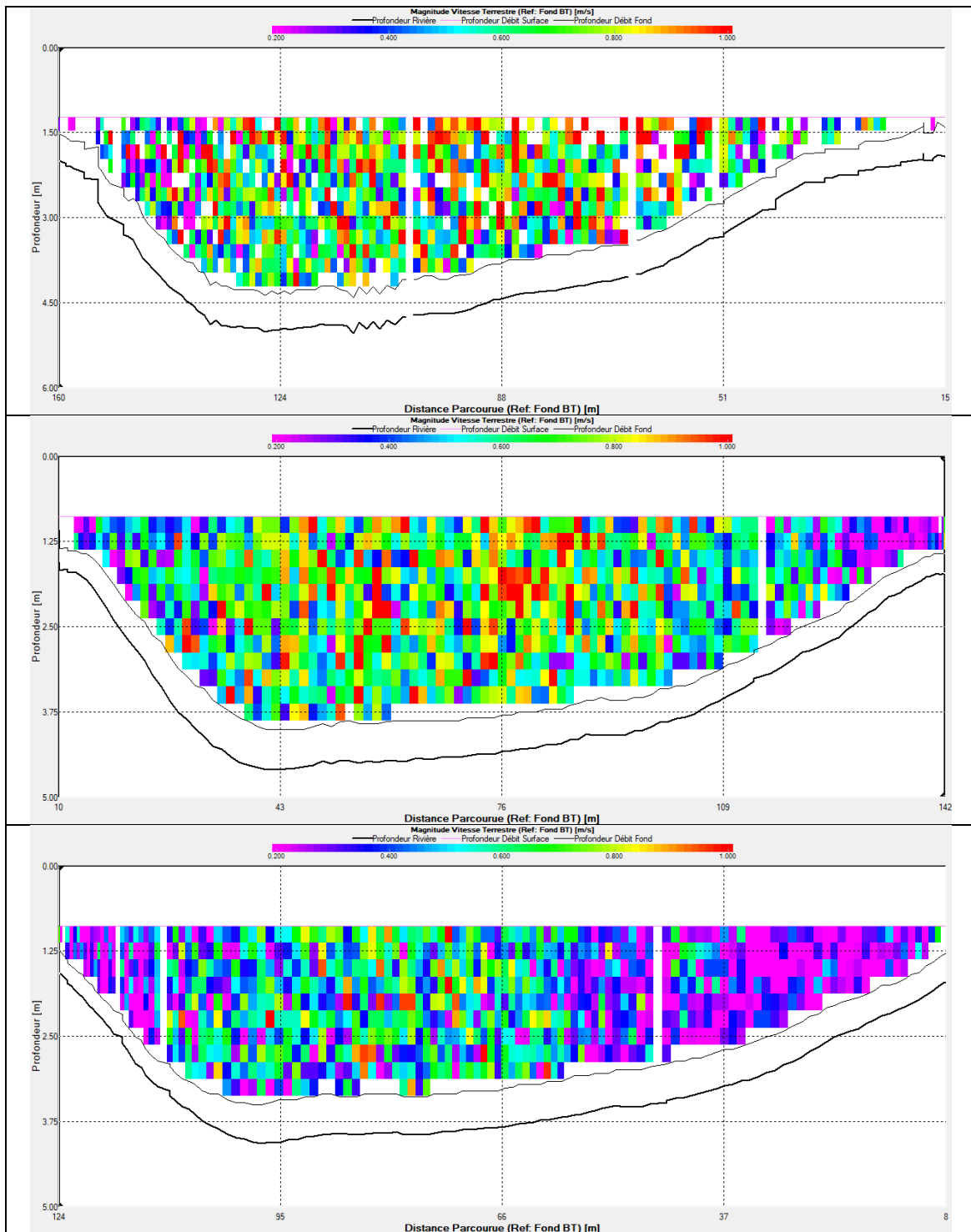


Figure 31 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reervoir 4 pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2011-06-01, Niveau d'eau = 5,91 m (IGLD85), Débit relevé = 331 m³/s
 Centre : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,43 m (IGLD85), Débit relevé = 252 m³/s
 Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,92 m (IGLD85), Débit relevé = 124 m³/s

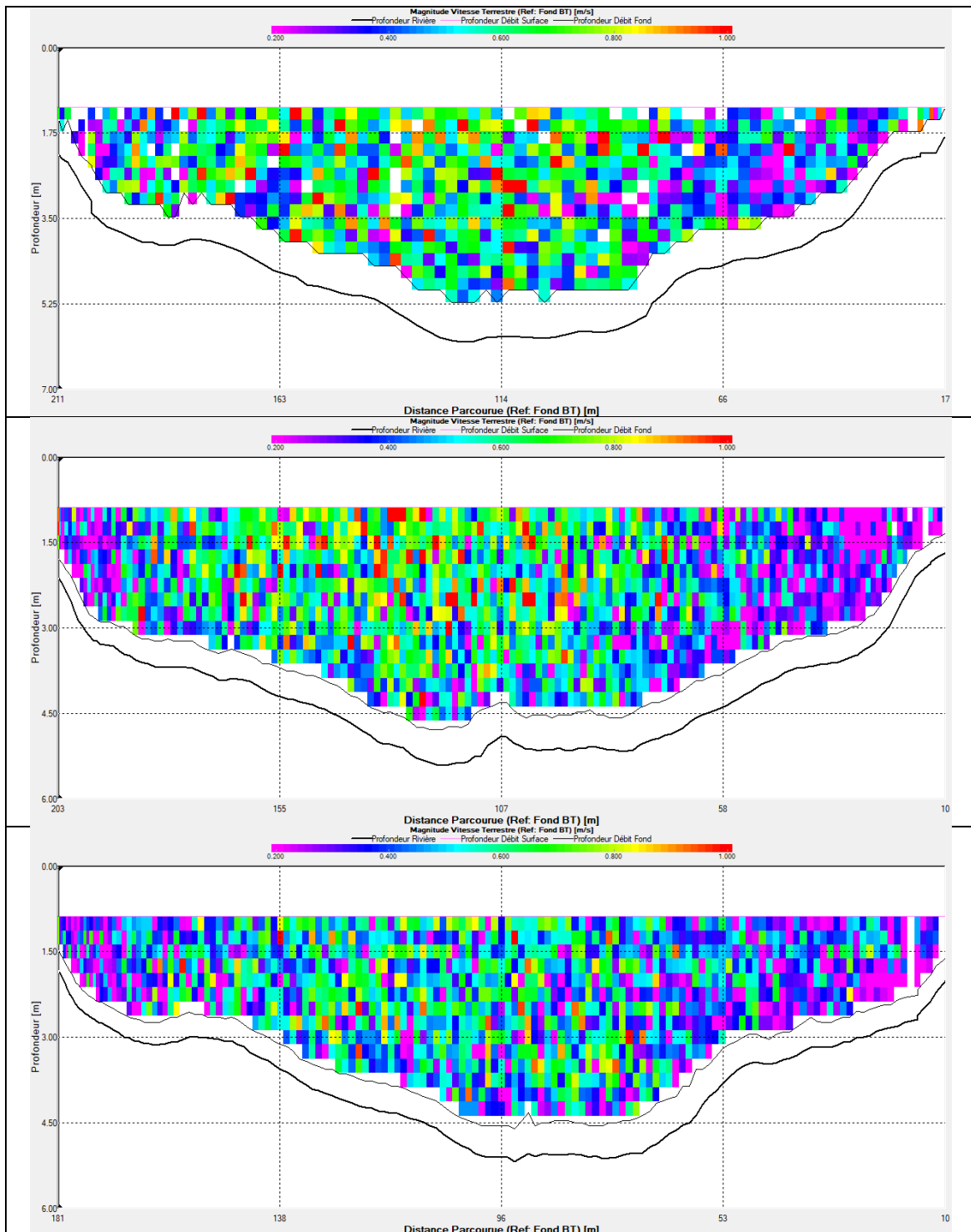


Figure 32 - Répartition des vitesses de courant à l'amont du reervoir 5 pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2011-06-01, Niveau d'eau = 5,91 m (IGLD85), Débit relevé = 437 m³/s

Centre : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,43 m (IGLD85), Débit relevé = 354 m³/s

Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,92 m (IGLD85), Débit relevé = 256 m³/s

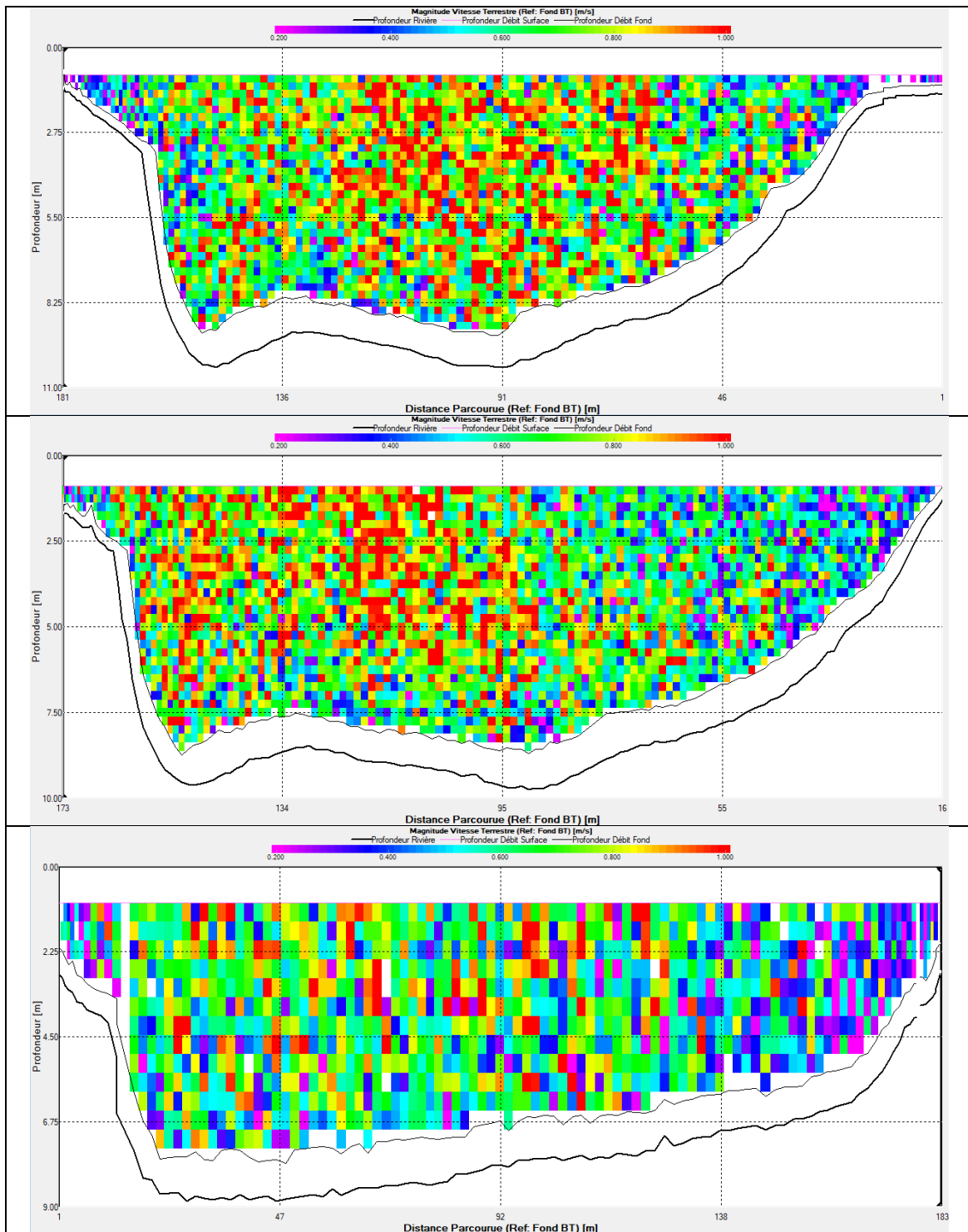


Figure 33 - Répartition des vitesses de courant au chenal aux Corbeaux pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 842 m³/s
 Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 769 m³/s
 Bas : 2000-08-23, Niveau d'eau = 4,45 m (IGLD85), Débit relevé = 705 m³/s

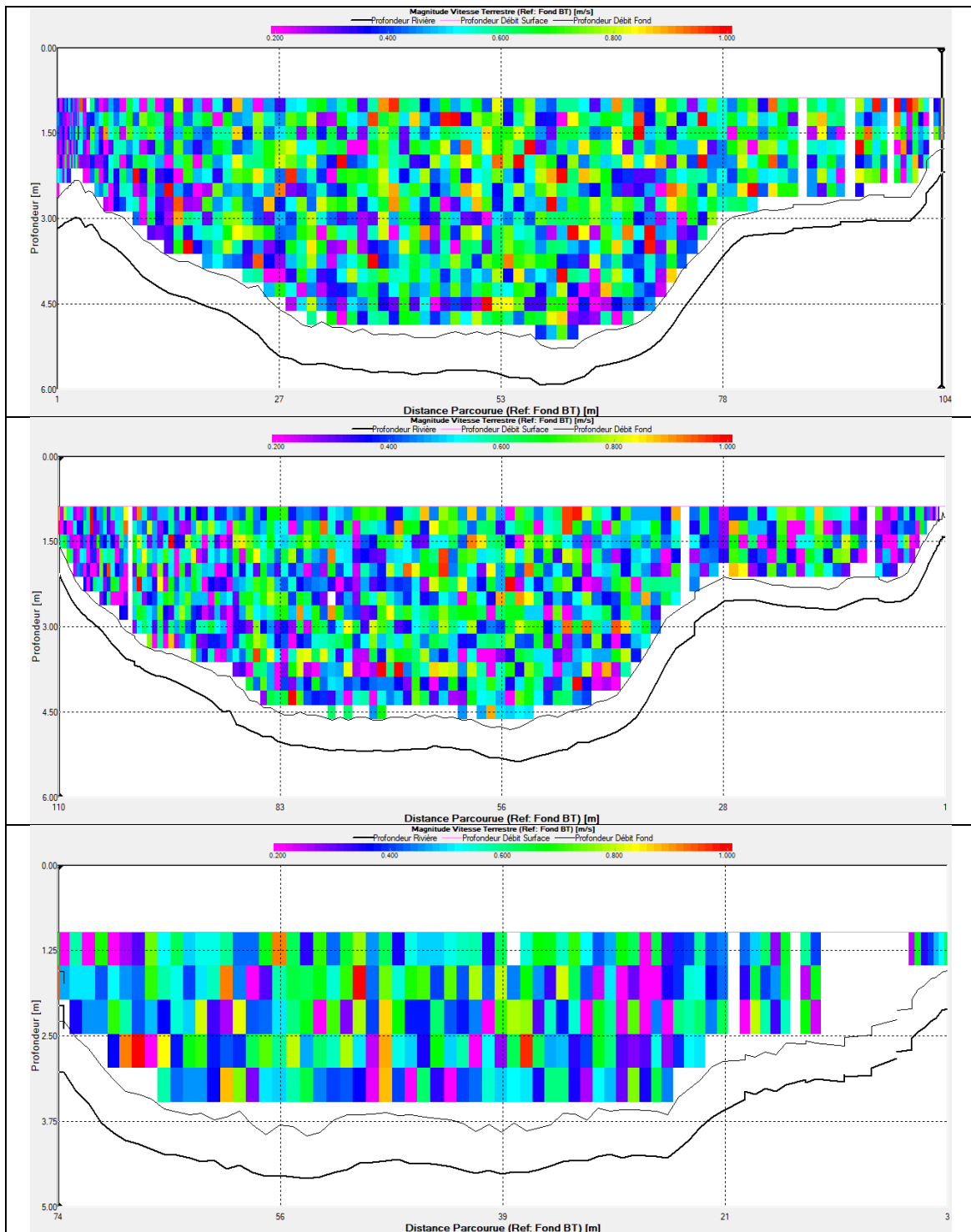


Figure 34 - Répartition des vitesses de courant au chenal de Berthier pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 223 m³/s
 Centre : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 180 m³/s
 Bas : 2000-10-27, Niveau d'eau = 4,01 m (IGLD85), Débit relevé = 126 m³/s

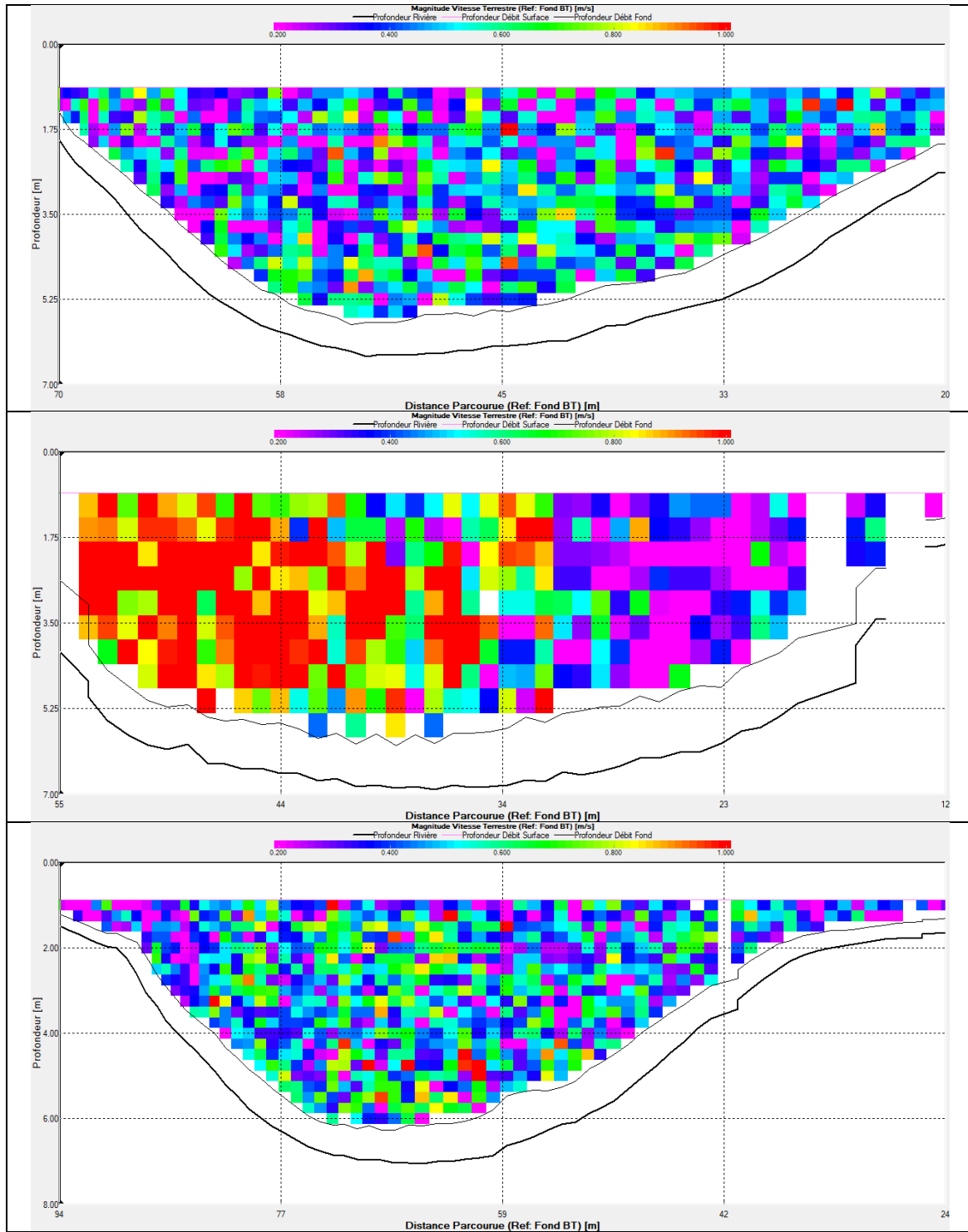


Figure 35 - Répartition des vitesses de courant au chenal du Moine pour différents niveaux d'eau à Sorel.

Haut : 2017-06-22, Niveau d'eau = 5,46 m (IGLD85), Débit relevé = 119 m³/s
 Centre : 2011-04-11, Niveau d'eau = 5,25 m (IGLD85), Débit relevé = 253 m³/s
 Bas : 2017-08-17, Niveau d'eau = 4,94 m (IGLD85), Débit relevé = 112 m³/s

3.4 Régime des glaces

Le régime des glaces dans le secteur de Sorel n'est plus naturel. En effet, pour rendre le chenal de navigation accessible durant tout l'hiver, il est devenu nécessaire d'installer à des endroits stratégiques du fleuve des estacades de retenue des glaces, de construire des îlots artificiels et de procéder régulièrement au déglacage du chenal de sorte que le régime des glaces à la hauteur de Sorel s'avère partiellement artificialisé. De plus, une surveillance et un suivi des conditions de glace sont également effectués tout au long de l'hiver.

3.4.1 Activités de déglacage du chenal de navigation

La GCC fournit des services de déglacage et d'escorte aux navires commerciaux, aux traversiers et aux bateaux de pêche dans les eaux canadiennes prises par les glaces. Elle offre entre autres les services suivants : escorte, dégagement des ports, entretien des voies de navigation et fournit de l'information sur les glaces. Ces services contribuent à :

- garantir une navigation sécuritaire;
- réduire les risques de formation d'embâcles et des inondations dues aux obstructions par la glace;
- maintenir les routes de transport maritime commercial.

Durant l'hiver, de la mi-novembre à la fin mai, les services de déglacage sont fournis sur le fleuve Saint-Laurent⁷. Ces services sont fournis par la flotte de brise-glaces disponibles dans les eaux de l'Est du Canada (Figure 36). Ces services contribuent à maintenir la route de transport maritime commercial entre Québec et Montréal.



Source : <http://www.marinfo.gc.ca/Fr/Flotte/PierreRadisson.asp>

Figure 36 - Brise-glace Pierre Radisson

⁷ Source : <http://www.ccg-gcc.gc.ca/Deglacage/accueil>

3.4.2 Estacades de retenue des glaces sur le fleuve Saint-Laurent

Pendant l'hiver 1966, la GCC a entrepris un vaste programme de gestion des glaces dans le but principal de réduire la fréquence des inondations et, par la même occasion, faciliter la navigation hivernale sur le fleuve Saint-Laurent jusqu'à Montréal. Parmi les diverses mesures prises, il a été décidé de fabriquer et déployer des estacades flottantes de retenue des glaces dans le tronçon du fleuve compris entre Montréal et Trois-Rivières. Ces estacades ont été modifiées au fil du temps. Actuellement, on en compte trois qui sont déployées à chaque hiver (Figures 37 et 38) :

- l'estacade de Lavaltrie (de l'ordre de 1000 mètres de longueur);
- l'estacade de Lanoraie, située près de l'île Saint-Ours (1340 mètres de longueur);
- l'estacade de Yamachiche, située sur le côté nord du lac Saint-Pierre, entre l'îlot artificiel n° 4 et la pointe de Yamachiche (2440 mètres de longueur).

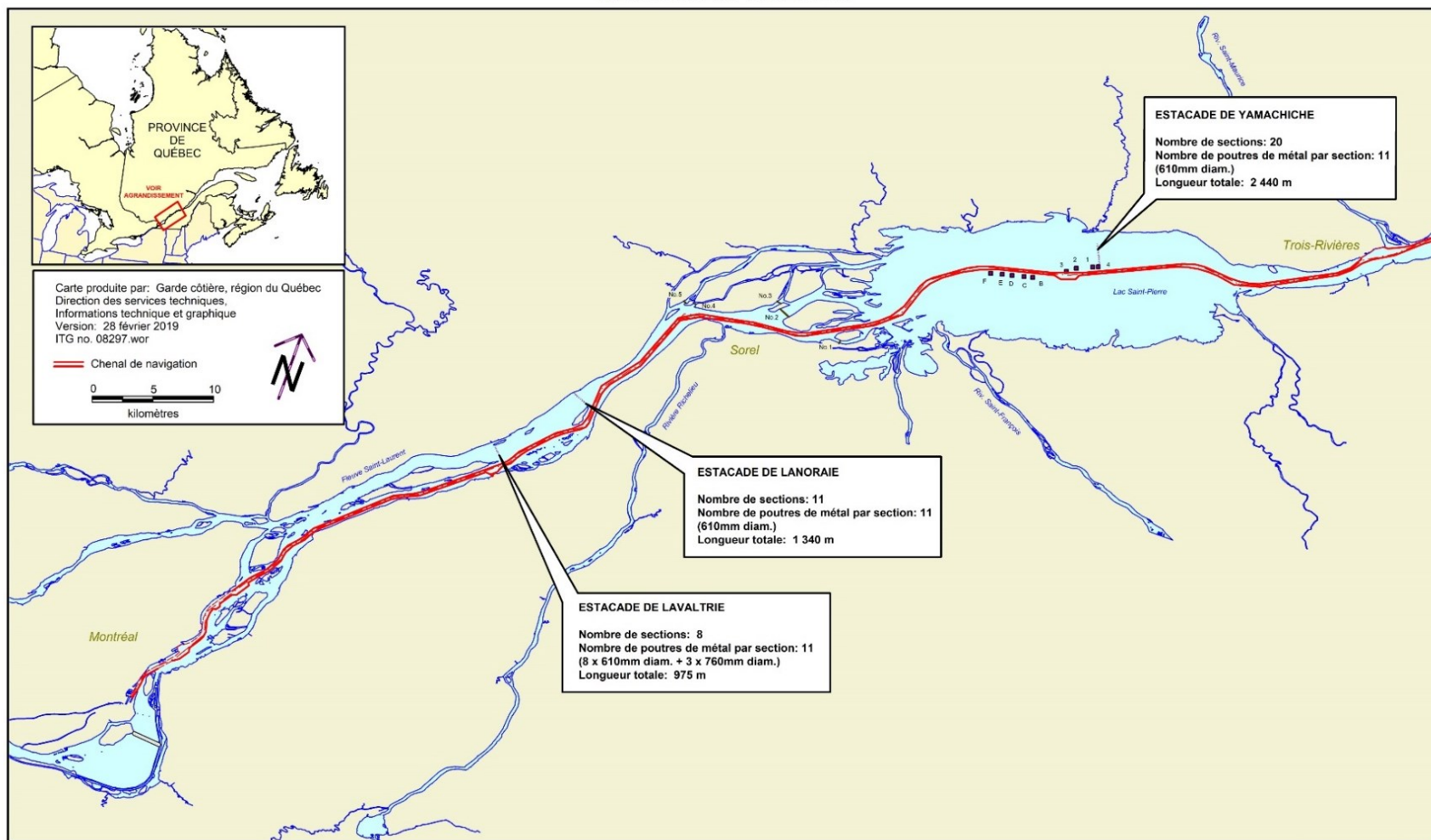
Le rôle principal des estacades est de protéger les communautés riveraines du fleuve Saint-Laurent, entre Montréal et le lac Saint-Pierre, en réduisant le risque d'inondations causées par des embâcles et les dommages qui en découlent. En stoppant la glace dérivante, les estacades favorisent la formation d'un couvert de glace. Une fois le couvert de glace en place, la production subséquente de glace s'en trouve freinée, ce qui diminue la quantité de glace pouvant dériver dans le chenal de navigation. Les estacades contribuent ainsi à maintenir le chenal de navigation ouvert et sécuritaire en favorisant l'évacuation de la glace et en réduisant du coup les risques d'embâcles.



Source : Garde côtière canadienne (2019)

Figure 37 - Estacades de retenue des glaces

INFRASTRUCTURES DE CONTRÔLE DES GLACES RÉGION DU QUÉBEC

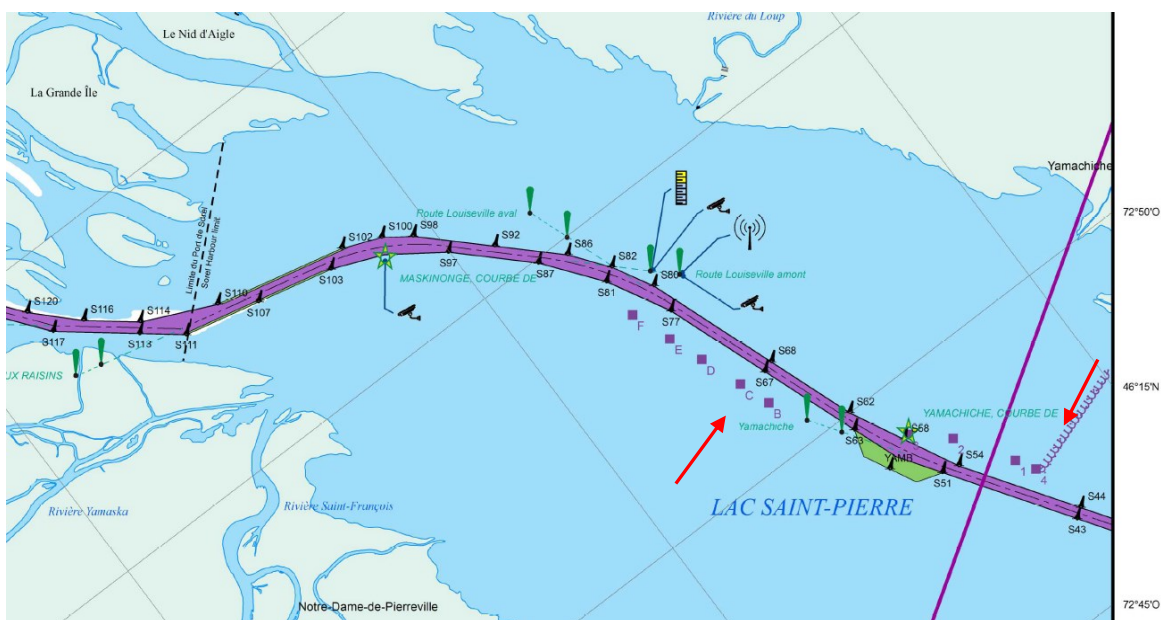


Source : Garde côtière canadienne (2019)

Figure 38 - Emplacement des estacades

3.4.3 Îlots artificiels dans le lac Saint-Pierre

Une série de neuf îlots artificiels ont été construits dans le lac Saint-Pierre (Figure 39) entre 1960 et 1987. Le but principal des îlots artificiels est de favoriser la stabilité du couvert de glace, spécialement contre les vents latéraux qui pourraient causer son décrochage et un empiètement dans le chenal de navigation. Les îlots artificiels protègent ainsi les communautés riveraines entre le lac Saint-Pierre et Montréal en réduisant les risques d'inondations causées par les embâcles et les dommages qui en résulteraient (Garde côtière canadienne, 2017b). Ils contribuent à garder le chenal de navigation ouvert et sécuritaire pendant l'hiver en favorisant l'évacuation de la glace et en réduisant du coup les risques de formation d'embâcles. Ainsi, les îlots artificiels, avec les estacades de retenue des glaces, contribuent à assurer la navigation commerciale pendant l'hiver dans le bras du chenal de navigation du fleuve Saint-Laurent.



Source cartographique : Garde côtière canadienne (2015)

Figure 39 - Localisation des îlots artificiels.
Îlots 1 à 4 : nord du chenal de navigation.
Îlots B à F : sud du chenal de navigation

3.4.4 Suivi et caractérisation des conditions de glace

Le programme initial de suivi d'épaisseur de glace canadien comprend deux jeux de données auxquels les utilisateurs peuvent accéder⁸. Dans le secteur à l'étude, la durée d'échantillonnage varie à chaque site mais les données s'échelonnent généralement sur plusieurs hivers. On note la présence d'une station à environ 15 km à l'amont de Sorel (Figure 40) et de 10 stations d'échantillonnage au lac Saint-Pierre. Dans ce secteur, les épaisseurs de glace varient généralement entre 20 et 80 cm et la valeur maximale mesurée a atteint 104 cm en 1978 au site A à Nicolet (Figure 41). Notons qu'au site P9, des glaces d'une épaisseur de plus de 70 cm ont été observées à un niveau d'eau supérieur à 6,3 m (IGLD85) et qu'au site P12, des glaces d'une épaisseur de plus de 50 cm ont été observées à un niveau d'eau supérieur à 5,5 m (IGLD85) (Figure 42).

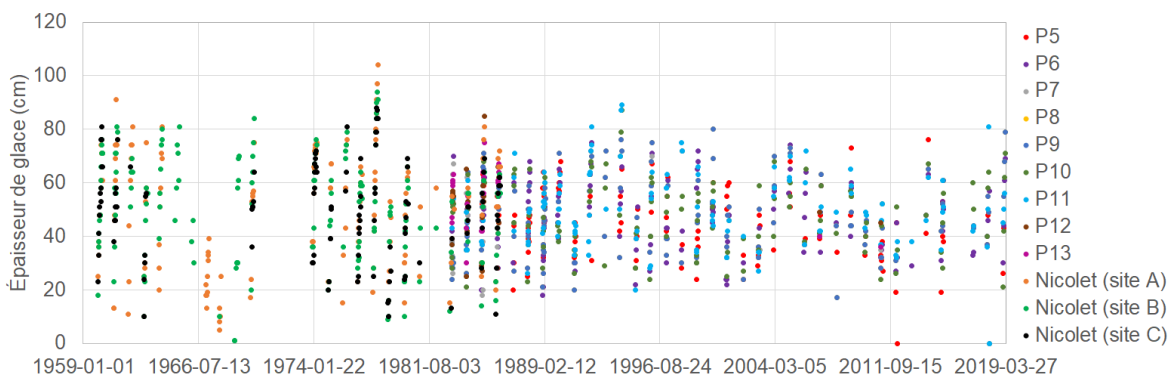
⁸ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/conditions-glaces-plus-recentes/archives-aperçu/données-épaisseur.html>

Par ailleurs, les conditions météorologiques ont permis la prise de photographies des conditions de glace au cours d'un survol par hélicoptère effectué le 6 février 2019 (Figure 43). Lors de ce survol, la présence d'un couvert de glace a été remarquée dans les chenaux au voisinage des reervoirs ainsi que la présence de zones d'eaux libres de glace à proximité des reervoirs.



Source de l'imagerie satellitaire : Google Earth

Figure 40 - Localisation des stations d'échantillonnage disponibles du programme d'épaisseur de glace canadien dans le secteur à l'étude



Sources des données : Centre des glaces de Montréal et <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-observations-glaces/conditions-glaces-plus-recentes/archives-aperçu/donnees-epaisseur.html>

Figure 41 - Épaisseurs de glace dans le secteur à l'étude

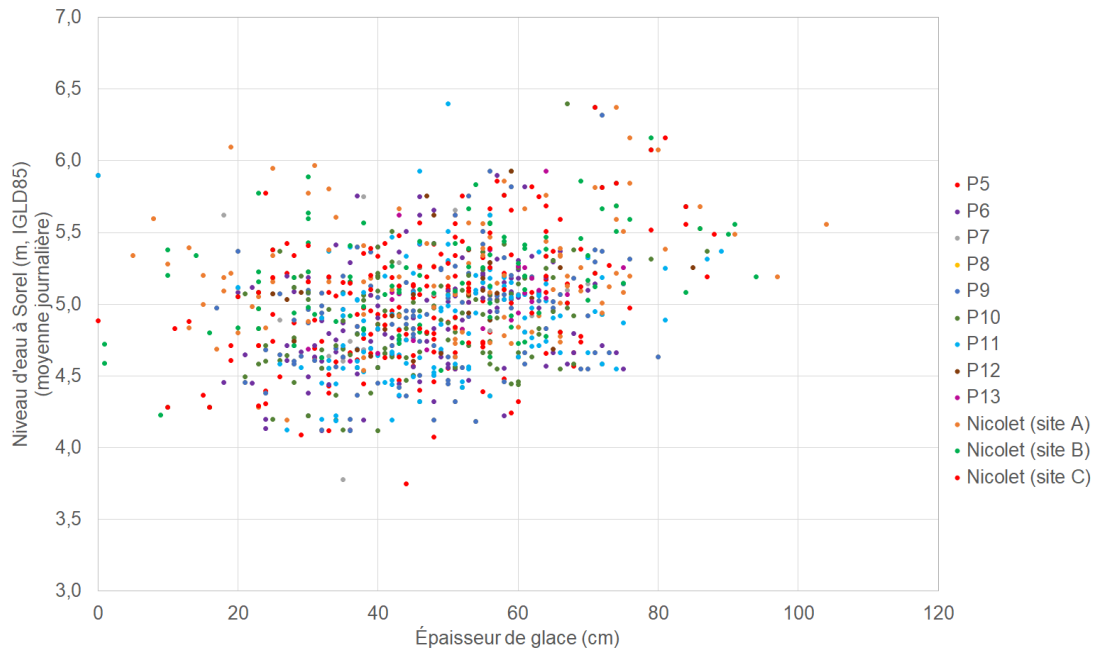


Figure 42 - Concomitance des épaisseurs de glace et des niveaux d'eau à Sorel pour les données disponibles échantillonnées à P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13 et aux sites A à C à Nicolet

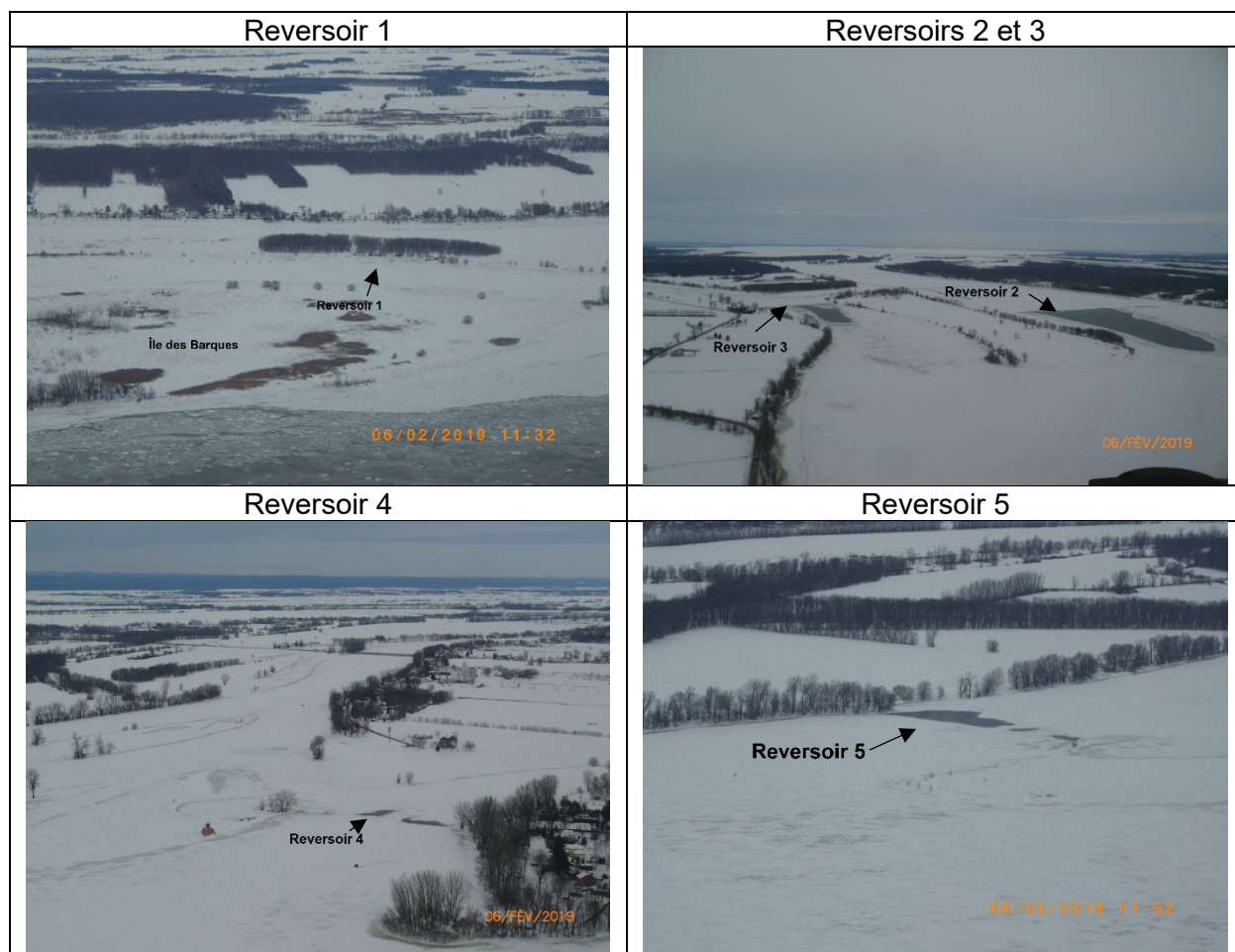
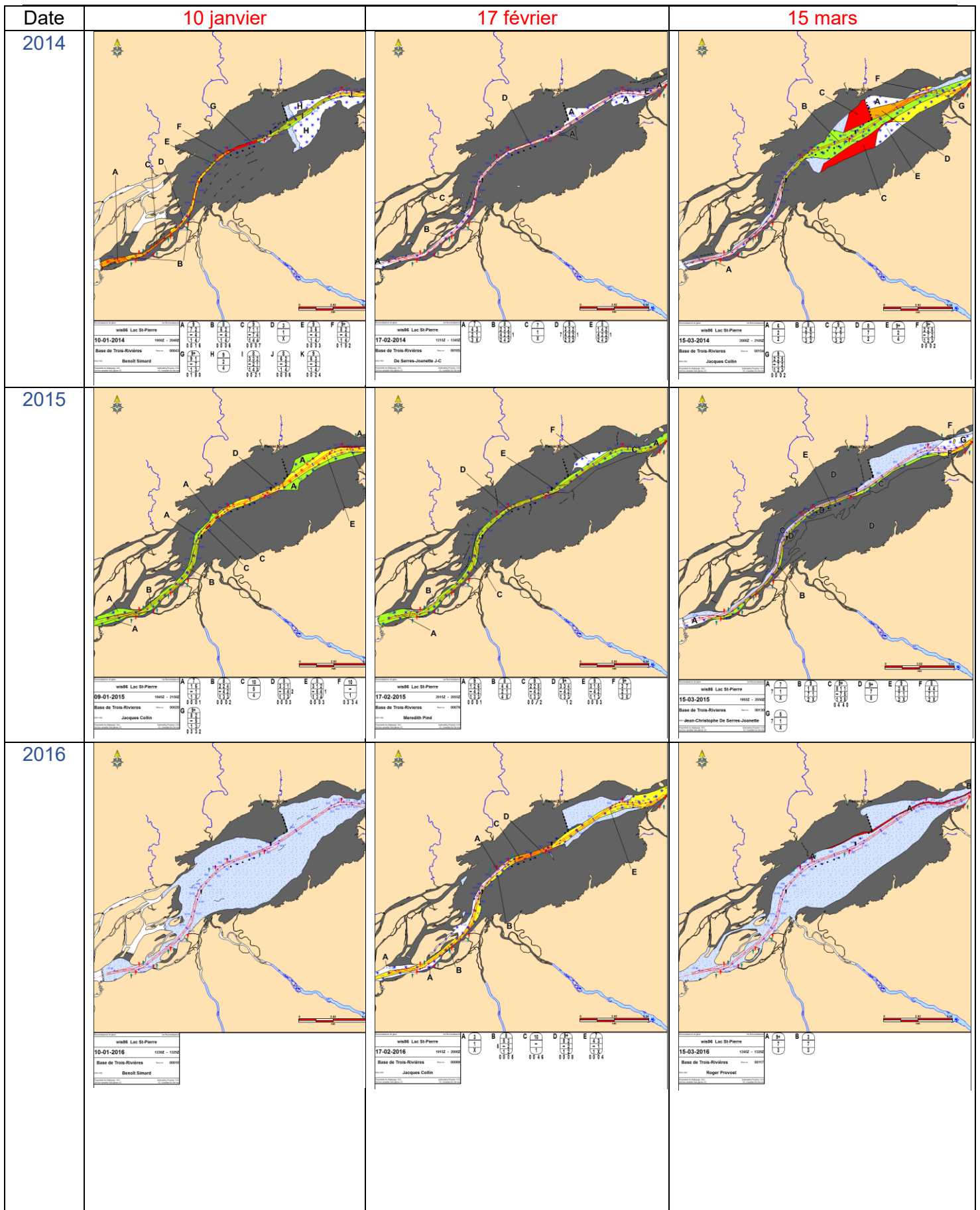


Figure 43 - Conditions de glace au voisinage des revoirs lors du survol du 6 février 2019

Les cartes de glace des années 2014 à 2018 montrent que la couverture spatiale et temporelle est très variable dans le secteur compris entre Sorel et Trois-Rivières (Figure 44 et Tableau 7). Le constat est similaire dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre.

Évaluation préliminaire des impacts hydrauliques de la réfection des réservoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre



Évaluation préliminaire des impacts hydrauliques de la réfection des revoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre

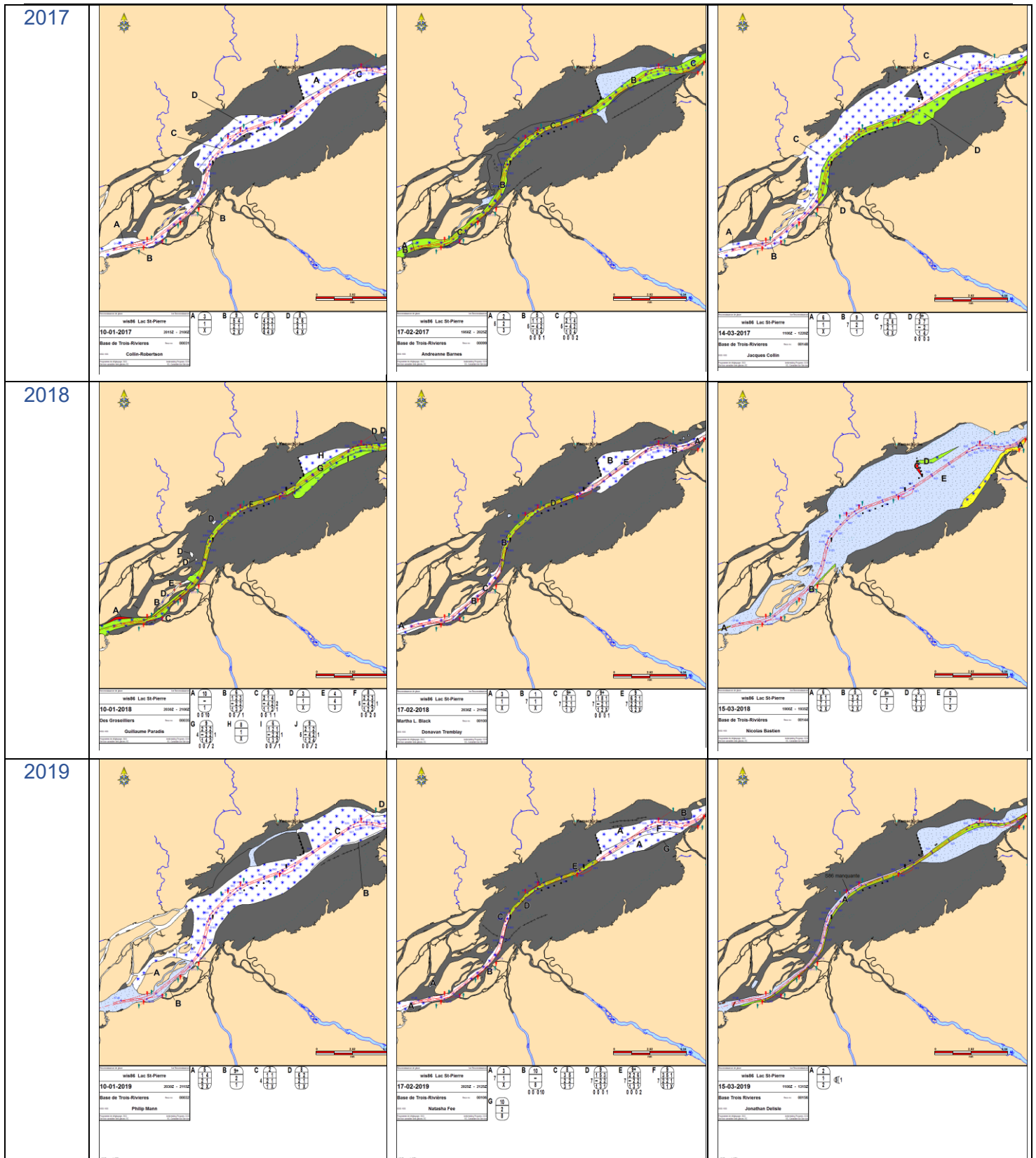


Figure 44 - Cartes de glace WIS86c des 10 janvier, 17 février et 15 mars des années 2014 à 2019

Tableau 7 - Caractérisation des conditions de glace dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre lors des hivers 2014 à 2019

Date	Chenal	2014	2015	2016	2017	2018	2019
10 janvier	Voie navigable (Ile des Barques) / Berges	9/10 / Couvert	8/10 / Couvert	N/D / N/D	9/10 / Couvert	9/10 / Couvert	9+/10 / 9+/10
	Reversoir 1	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert
	Reversoir 2	Couvert et N/D	Couvert	Couvert et N/D	Couvert	Couvert	5/10
	Reversoir 3	Couvert et N/D	Couvert	Couvert et N/D	Couvert	Couvert	5/10
	Aux Corbeaux	Couvert	Couvert	N/D	9/10	3/10	9+/10
	Du Moine	Couvert	Couvert	Partiellement couvert	Couvert	Couvert	Couvert
17 février	Voie navigable (Ile des Barques) / Berges	8/10 / Couvert	9/10 / Couvert	8/10 / Couvert	7/10 / Couvert	1/10 et 9/10 / Couvert	10/10 / Couvert
	Reversoir 1	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert
	Reversoir 2	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert
	Reversoir 3	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert
	Aux Corbeaux	Couvert	Couvert	8/10	7/10	Couvert	Couvert
	Du Moine	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert
15 mars	Voie navigable (Ile des Barques) / Berges	6/10 / Couvert	9/10 / Couvert	9+/10 / 9+/10	9/10 / 9/10	5/10 / 5/10	2/10 / Couvert
	Reversoir 1	Couvert	Couvert	Partiellement couvert et 9+/10	Couvert	5/10	Couvert
	Reversoir 2	Couvert	Couvert	Partiellement couvert et 9+/10	Couvert	Partiellement couvert et 6/10	Couvert
	Reversoir 3	Couvert	Couvert	Partiellement couvert et 9+/10	Couvert	Couvert	Couvert
	Aux Corbeaux	Couvert	Couvert	9+/10	9/10	5/10	Couvert
	Du Moine	Couvert	Couvert	Couvert	Couvert	Partiellement couvert et 6/10	Couvert

Une caractérisation de la couverture de glace a été effectuée dans le secteur compris entre l'embouchure de la rivière Richelieu et l'île Plate pour la période comprise entre décembre 2012 et avril 2019 (Figure 45). L'analyse montre que le pourcentage de couverture de glace a dépassé 30 % à tous les hivers de cette période, a atteint 40 % à quatre reprises et a dépassé les 60 % à l'hiver 2014 (Figure 46).

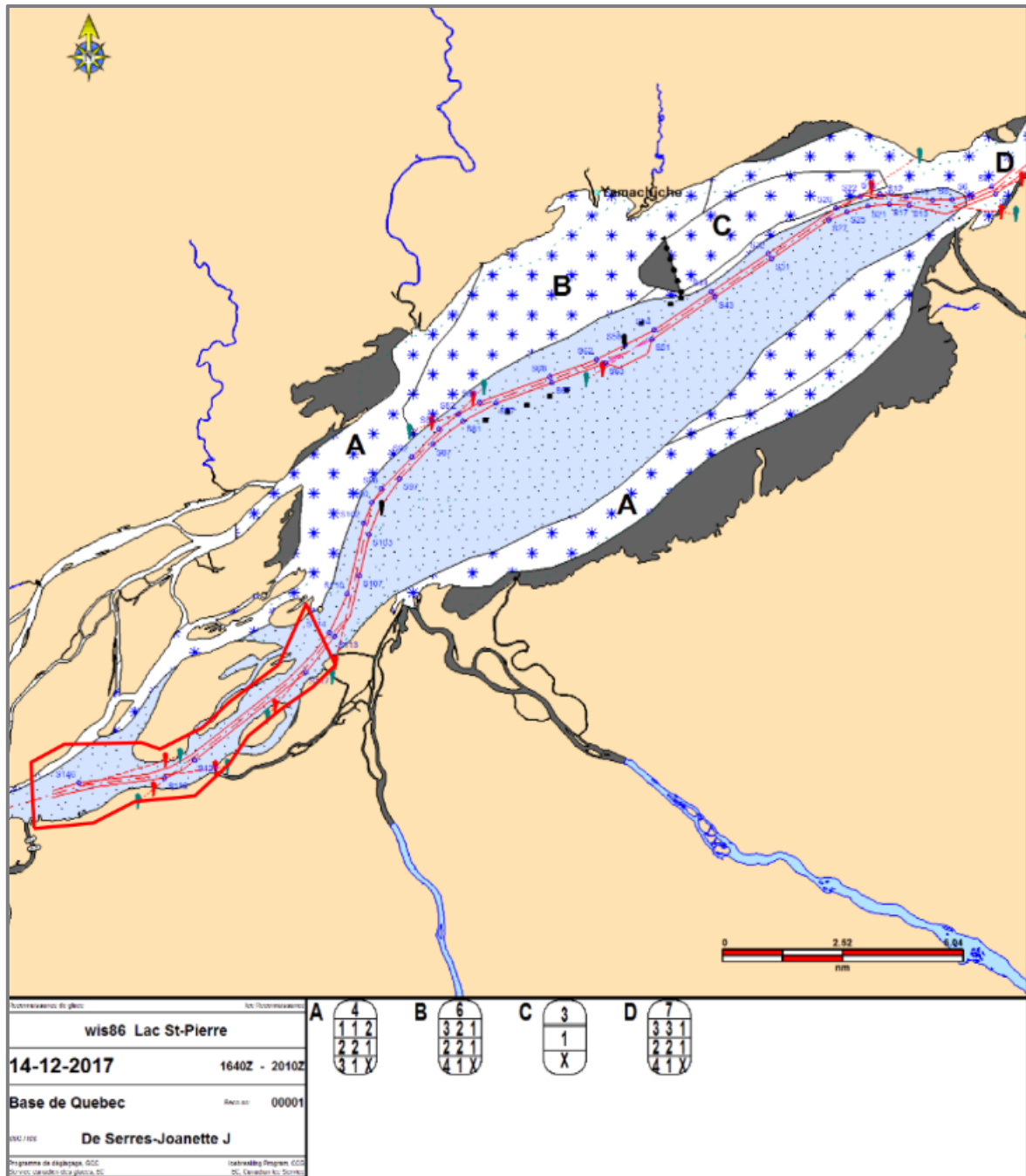


Figure 45 - Localisation du secteur à l'étude au voisinage de l'île des Barques pour la caractérisation du couvert de glace

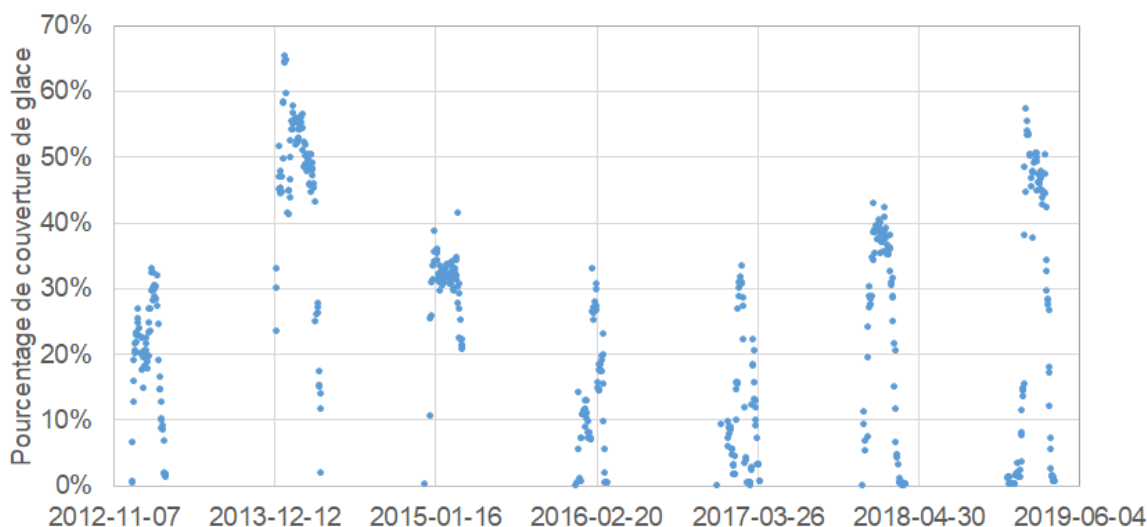


Figure 46 - Couverture de glace entre décembre 2012 et juin 2019

Par ailleurs, le Secteur GH a colligé des observations sur les conditions des glaces au lac Saint-Pierre, à Lavaltrie et Lanoraie. Un recensement de plusieurs événements significatifs en lien avec la gestion des glaces a été effectué et est présenté au Tableau 8.

En résumé, on retient que la gestion des glaces, laquelle comporte des activités de déglçage, la pose d'estacades, la présence des îlots artificiels et un suivi des conditions de glace, est également affectée par les paramètres suivants :

- variations importantes de température de l'air (redoux, vagues de froid);
- fluctuations des niveaux d'eau et effets des vagues;
- forts vents du nord-est et du sud-sud-ouest;
- précipitations (neige, pluie);
- conditions de glace déjà existantes;
- vitesses de courant;
- hauts niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent (qui influencent à leur tour la température de l'eau).

Tableau 8 - Événements significatifs pour la gestion des glaces entre Lavaltrie et Trois-Rivières

Date	Localisation des arrêts de glace	Remarque
17 janvier 2013	Îlot 3 et Pointe-du-Lac	Combinaison d'un redoux, d'un léger rehaussement des niveaux d'eau et de forts vents
15 décembre 2013	Pont Laviolette à Trois-Rivières	Vague de froid
22 au 27 décembre 2013	Entre Sorel et la courbe #2	Bordée de neige
31 décembre 2013 au 10 janvier 2014	De Montréal à Québec	Vague de froid combinée à de faibles précipitations
9 janvier 2015	Pont Laviolette à Trois-Rivières	Vague de froid précédant l'arrêt
20 février 2015	Entre Sorel et la courbe #2	Vague de froid précédant l'arrêt
19 mars 2015	Entre Sorel et la courbe #2	S/O
25 mars 2015	Pont Laviolette à Trois-Rivières	S/O
25 février 2016	Pont Laviolette à Trois-Rivières	Averses de neige et pluie
28 février 2016	Pont Laviolette à Trois-Rivières	Averses de neige et pluie
7 et 8 février 2016	Débâcle de l'estacade de Lavaltrie	Température douce et hauts niveaux du fleuve
28 et 29 janvier 2017	Débâcle de l'estacade de Lavaltrie	Température douce et forts vents
7 et 9 janvier 2018	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre/Sorel	Température inférieure à -15°C précédant l'événement
24 janvier 2018	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre	Vents du nord-est précédant l'événement
26 janvier 2018	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre	S/O
21 au 25 janvier 2019	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre/Sorel	Vague de froid précédant l'arrêt
7 et 8 février 2019	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre/Sorel	Vents du nord-est
10 février 2019	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre/Sorel	Redoux suivi d'une diminution marquée des températures
13 au 15 février 2019	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre/Sorel	Diminution des températures combinée à des vents du nord-est
15 mars 2019	Arrêt et ralentissement au lac Saint-Pierre	Vents du nord-est

Sources : Conditions des glaces au lac Saint-Pierre, à Lavaltrie et à Lanoraie. Hivers 2012-2013 à 2018-2019

4 Modélisation hydrodynamique

4.1 Méthodologie

Le modèle hydrodynamique TELEMAC-2D (EDF-R&D, 2014) a été utilisé dans la présente étude pour évaluer les conditions hydrauliques du fleuve Saint-Laurent dans le tronçon compris entre Montréal et Trois-Rivières. Ce domaine est suffisamment étendu pour permettre d'étudier les effets des revoirs sur les conditions hydrodynamiques du fleuve entre l'archipel du Lac Saint-Pierre et Montréal. Le modèle TELEMAC-2D est utilisé afin de modéliser l'écoulement, c'est-à-dire les profondeurs d'eau et les vitesses de courant moyennées sur la verticale, à chaque point de maillage du domaine de calcul et ce, en deux dimensions.

4.2 Domaine de calcul et maillage

Le domaine de calcul a été discrétisé à l'aide d'un maillage triangulaire à résolution variable. Le maillage est raffiné autour des revoirs en raison des gradients bathymétriques observés et des gradients de vitesse attendus. Le maillage est composé de plus de 625 000 nœuds répartis sur tout le domaine et sa résolution, i.e. la taille des mailles, varie généralement entre 5 et 250 m (Figure 47).

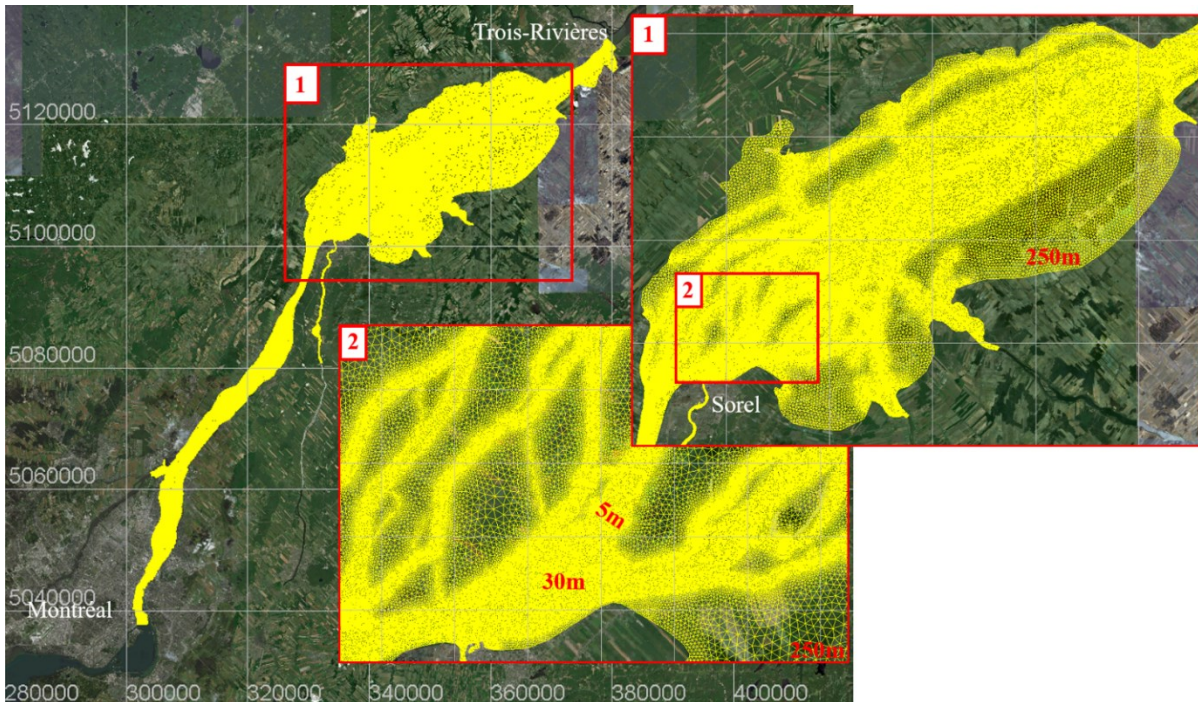


Figure 47 - Domaine modélisé et résolution variable du maillage (résolution du maillage indiquée en rouge)

4.3 Bathymétrie et modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT) couvre le tronçon du fleuve Saint-Laurent, de Montréal à Trois-Rivières. Il s'étend de la jetée #1 à Montréal jusqu'à la condition limite à l'aval du modèle située juste à l'amont de l'embouchure de la rivière Saint-Maurice (Figure 48). Le MNT a été préparé en combinant plusieurs sources d'informations géographiques (Tableau 9). Dans le cadre de cet exercice, les revoirs sont considérés comme des structures rigides, imperméables et exemptes de tassement géotechnique. De plus, une hypothèse est posée à l'effet que leur géométrie n'évolue pas dans le

temps, peu importe les conditions hydrauliques. De façon analogue, les berges de l'archipel sont considérées stables par le modèle hydraulique. En d'autres mots, la bathymétrie et la topographie n'évoluent pas et ce, peu importe les conditions hydrauliques; les seuls changements en termes de bathymétrie et de topographie sont exprimées dans les 3 variantes à l'étude.

Tableau 9 - Provenance des différents jeux de données topographiques et bathymétriques

Données	Source des données
Topographie	Modèle numérique d'élévation du Canada Ressources naturelles Canada
Topographie environnante des revoirs	Relevé par drone Pêches et Océans Canada – Biens immobiliers, environnement, sécurité et santé
Bathymétrie et topographie des revoirs	Relevés de la GCC Secteur Génie hydraulique
Bathymétrie du chenal de navigation	Relevés bathymétriques de la GCC Gestion des voies navigables
Bathymétrie des zones hors chenal	Données des cartes marines Service hydrographique du Canada (SHC)
Bathymétrie des embouchures de tributaires	Relevés bathymétriques de la GCC Secteur Génie hydraulique

En ce qui a trait aux revoirs, les trois géométries à l'étude correspondent aux variantes présentées à la section 2, soit :

- les conditions relevées en 2017 (conditions dites « pré-réfection »);
- la réfection des 5 revoirs avec des géométries extérieures dont la crête est à la cote de conception de 4,385 m;
- la réfection des revoirs 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête est à la cote de conception de 4,385 m.

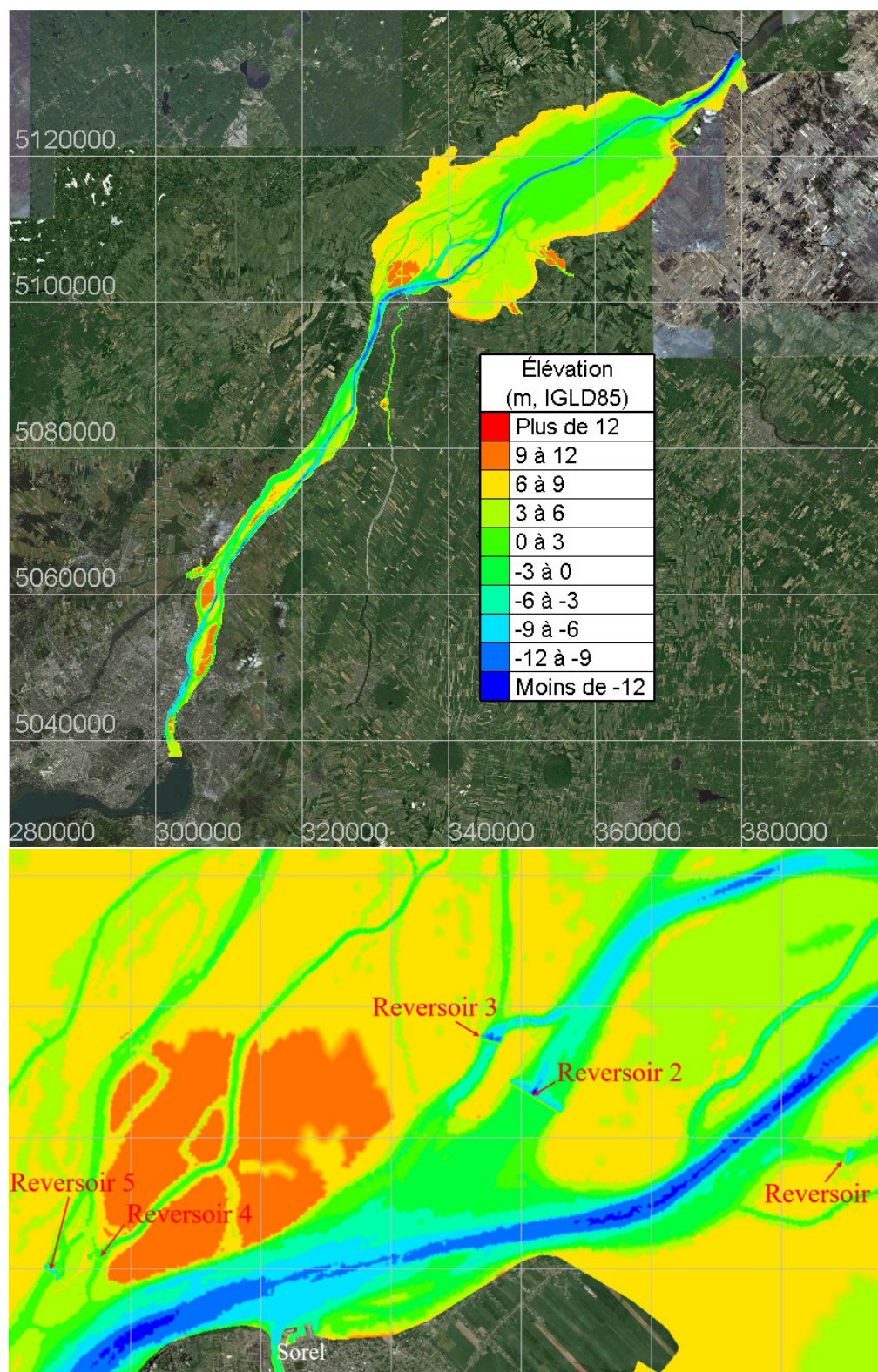


Figure 48 - Modèle numérique de terrain du domaine modélisé
Haut : Tronçon Montréal – Trois-Rivières
Bas : Secteur des revoirs (relevés des revoirs effectués en 2017)

4.4 Conditions aux limites et paramétrisation du modèle

Le modèle comprend 10 frontières avec débits entrants et une condition limite aval pour laquelle le niveau d'eau est imposé (Figure 49). Les données de débits utilisées proviennent des stations d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (Tableau 10). Une carte des coefficients de frottement a été élaborée afin de tenir compte des rugosités propres aux différents substrats en période printanière (Figure 50). Le modèle $k-\varepsilon$ a été utilisé pour le traitement de la turbulence.

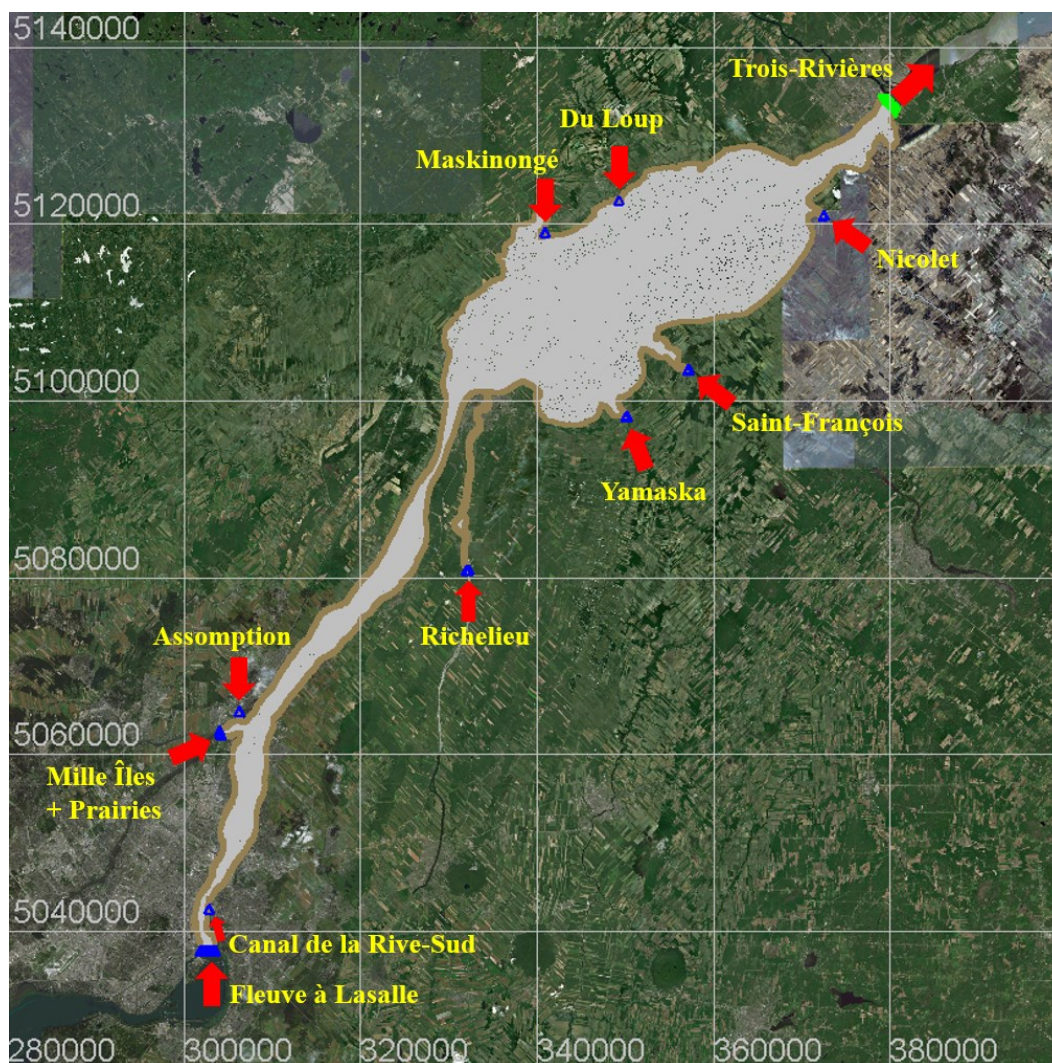


Figure 49 - Débits entrants (bleus), condition limite du domaine de modélisation (vert) et sens de l'écoulement (flèches rouges)

Tableau 10 - Stations hydrométriques utilisées pour évaluer les débits entrants

Frontière	Source	N° de la station
Fleuve Saint-Laurent à Lasalle + Canal Rive-Sud	ECCC	02OA016
	ECCC	02OA024
Rivière des Mille Îles	ECCC	02OA003
Rivière des Prairies	ECCC	02OA004
	CEHQ	043301
Rivière L'Assomption	ECCC (CEHQ)	02OB002 (052202)
		02OB007 02OB008
	CEHQ	052219 052202
Rivière Richelieu	ECCC	02OJ001 02OJ007
Rivière Yamaska	ECCC	02OG043 02OG047
		CEHQ
Rivière Saint-François	ECCC	02OF019 02OF002
Rivière Nicolet	ECCC	02OD003
	CEHQ	030101 030103
Rivière Maskinongé	ECCC	02OC002
	CEHQ	052601
Rivière du Loup	ECCC(CEHQ)	02OC001 (052801) 02OC005 (052802)
	ECCC	02OC019 02OC004
	CEHQ	052805 052801
		052802

Sources : https://eau.ec.gc.ca/google_map/google_map_f.html?map_type=historical&search_type=province&province=QC
https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/ListeStation.asp?regionhydro=05&Tri=Non

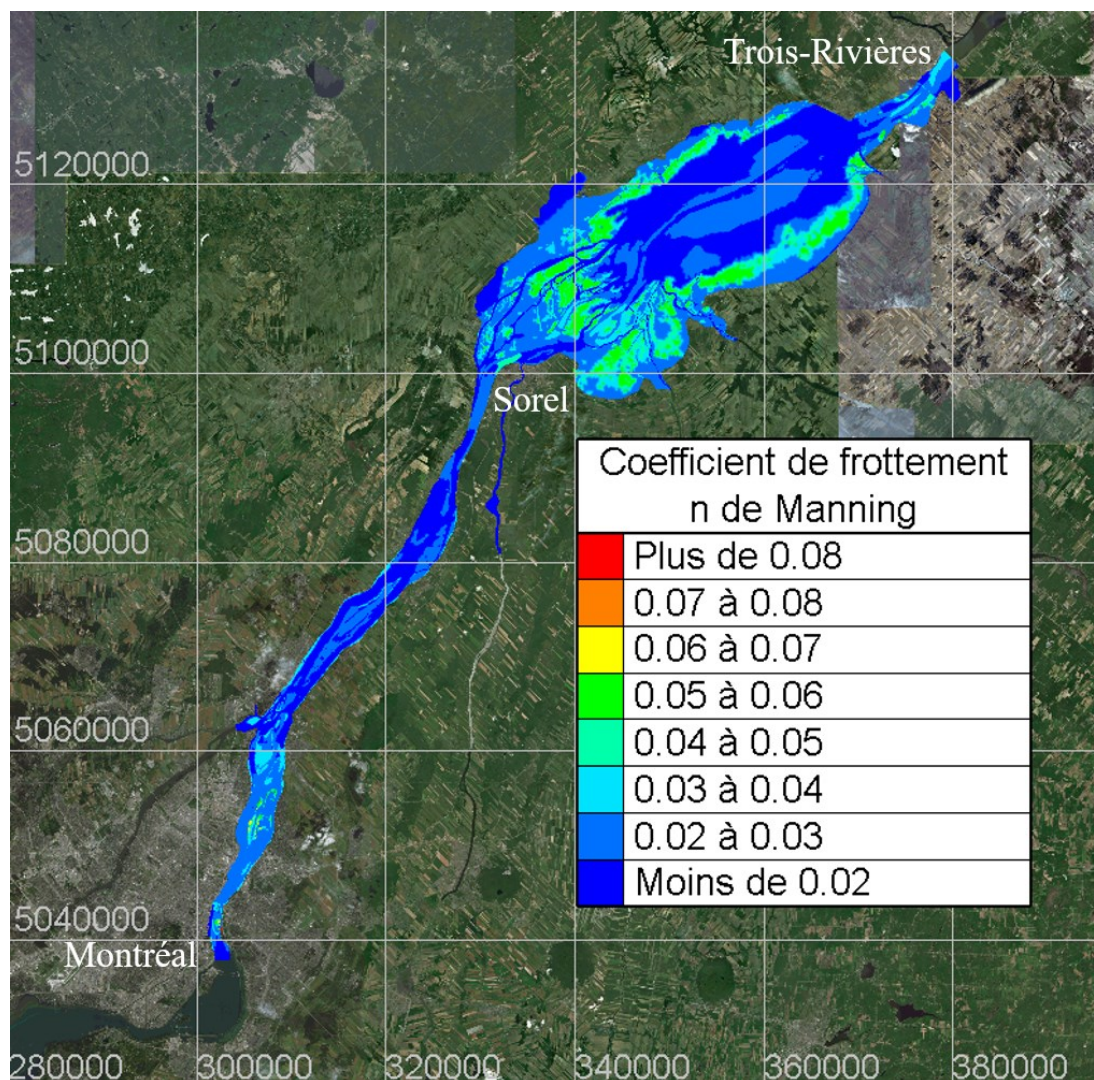


Figure 50 - Coefficients de frottement (Manning) appliqués dans le domaine

4.5 Validation du modèle et scénarios de modélisation

Les événements hydrauliques des printemps 1996 et 1999 sont retenus pour fins de calibration et de validation du modèle hydrodynamique (Tableau 11). Le premier événement correspond à un épisode de hautes eaux alors que le second est représentatif d'un épisode de basses eaux. Avec ces événements, c'est une plage de niveaux d'eau de l'ordre de 2,5 m et de débits à Tracy variant entre 7 600 et 14 500 m³/s⁹ qui est couverte. De plus, un troisième événement survenu en juin 2015 où le niveau d'eau à Sorel avoisinait 4,39 m (IGLD85) a été modélisé afin d'évaluer des conditions qui permettent de mieux mettre en évidence l'effet de la réfection des réservoirs. La validation des résultats est effectuée par le contrôle des niveaux d'eau modélisés entre Montréal et Trois-Rivières avec ceux mesurés aux stations hydrométriques (Figure 51). L'erreur est inférieure à 6 cm pour ces événements aux stations de mesure.

⁹ Cette plage de débits à Tracy n'inclut pas les débits de la rivière Richelieu.

Tableau 11 - Événements de modélisation retenus

Frontière	Mai 1999 Niveau d'eau à Sorel : 4,02 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 7 980 m ³ /s	Juin 2015 Niveau d'eau à Sorel : 4,39 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 10 000 m ³ /s	Avril - Mai 1996 Niveau d'eau à Sorel : 6,40 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 15 500 m ³ /s
	Débit (m ³ /s)	Débit (m ³ /s)	Débit (m ³ /s)
Lasalle + Canal Rive-Sud	6732	8320	11015,6
Rivière des Mille Îles	59	108	651,6
Rivière des Prairies	739,7	797,4	2336
Rivière l'Assomption	74,6	39,3	422,6
Rivière Richelieu	359,2	681,7	1040,6
Rivière Yamaska	38,5	33,3	230,6
Rivière St-François	101,9	153,7	613,4
Rivière Nicolet	33,4	23,8	108,2
Rivière Maskinongé	34,1	5,0	198,4
Rivière du Loup	25,9	11,4	194,4
Condition limite aval	Niveau d'eau (m, IGLD85)	Niveau d'eau (m, IGLD85)	Niveau d'eau (m, IGLD85)
Trois-Rivières	3,35	3,65	5,72

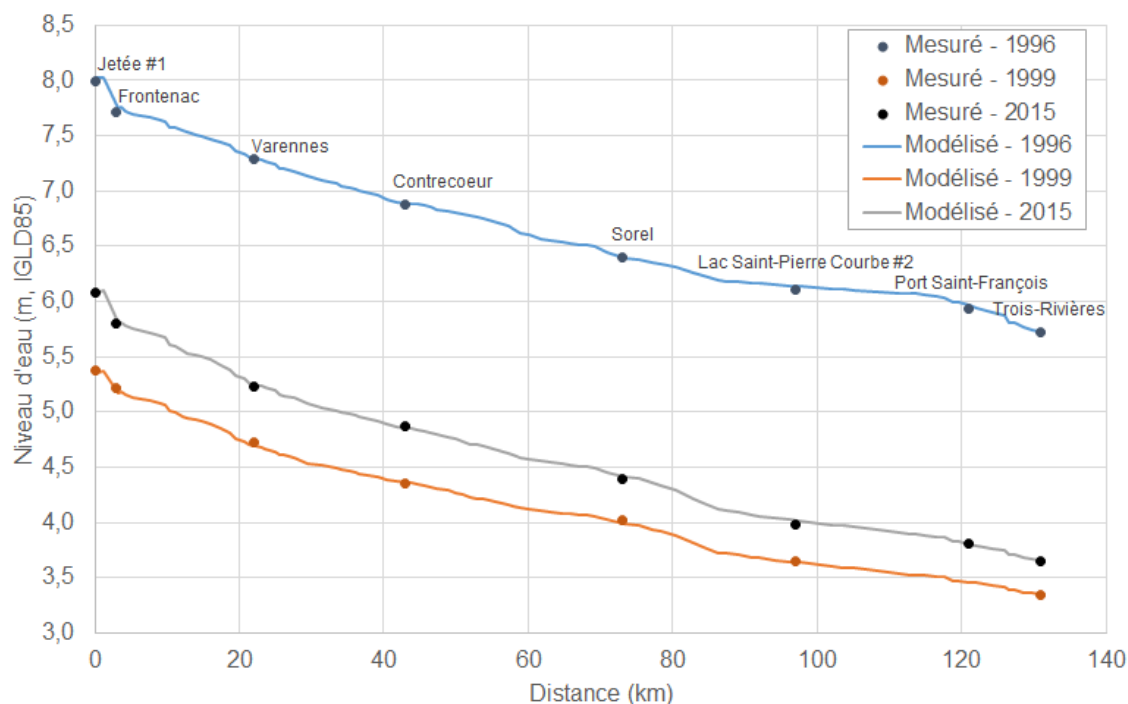


Figure 51 - Niveaux d'eau mesurés et modélisés pour les événements d'avril-mai 1996, mai 1999 et juin 2015

4.6 Incertitudes et limitations

Les incertitudes et les limitations de l'exercice de modélisation sont principalement liées aux incertitudes techniques du modèle hydrodynamique, aux incertitudes en lien avec la représentation du terrain ainsi qu'aux incertitudes du projet de réfection des revoirs.

Les incertitudes sur les niveaux d'eau modélisés sont variables en fonction de l'hydraulicité et de la position dans le domaine. Il existe plusieurs sources potentielles d'incertitudes liées au modèle hydrodynamique et à la représentation du domaine modélisé. Parmi les sources potentielles, notons entre autres les incertitudes liées à la bathymétrie, à la méthode, aux mesures et aux conditions aux limites.

Par ailleurs, aucune évolution de la bathymétrie et de la topographie n'est considérée dans le cadre de cette modélisation. En ce sens, hormis les changements antérieurs aux relevés de 2017 et qui sont déjà exprimés dans le MNT utilisé pour cet exercice de modélisation, aucun effet de tassement géotechnique, aucun dommage structural post-réfection ni aucun phénomène d'érosion des revoirs ou des berges de l'archipel ne sont tenus en compte par la présente modélisation. Il est recommandé d'étudier ces phénomènes dans le cadre du projet de réfection.

Les événements modélisés couvrent une longue période, soit de 1996 à 2015 et surtout, une large plage en terme d'hydraulicité à Sorel. Le fait de couvrir une longue période permet d'accroître la compréhension générale de l'hydraulicité de l'archipel et d'utiliser la grande quantité de données disponibles au début des années 2000 en dépit des incertitudes liées à l'évolution de la configuration des revoirs et des sections d'écoulement dans l'archipel. L'exercice a été effectué de manière à

tirer profit d'un maximum de données disponibles dans les circonstances. Néanmoins, la comparaison entre les niveaux d'eau mesurés et ceux modélisés apparaît raisonnable.

Les relevés bathymétriques utilisés pour caractériser l'état dit « pré-réfection » datent de 2017, ceux-ci correspondant aux relevés les plus récents au moment d'effectuer les modélisations. Naturellement, il est possible que l'événement de crue extrême de 2019 ait modifié la géométrie des revoirs. Si c'était le cas, ces modifications à la géométrie des ouvrages pourraient avoir des impacts significatifs sur l'hydraulique du secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. De nouveaux relevés topographiques et bathymétriques des revoirs mettraient en évidence ces changements de géométrie et leur impact sur l'écoulement. Du seul point de vue du présent exercice de modélisation, de nouveaux relevés ne sont pas indispensables puisque le choix du scénario de comparaison pré-réfection a été arrêté sur les conditions de 2017. Par contre, il faudra garder à l'esprit qu'il existera un décalage entre les conditions retenues pour l'exercice de modélisation et celles qui prévaudront au moment où seront effectués d'autres travaux de caractérisation au voisinage des revoirs.

Cette démarche de modélisation s'inscrit dans un processus de conception itératif qui, à cette étape, permet au Secteur GH d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts hydrauliques anticipés découlant de la réfection des revoirs. Comme aucune géométrie extérieure n'était disponible au moment de réaliser les modélisations (cf. section 1.1), la configuration dite post-réfection des ouvrages est limitée, en guise de première itération, à la géométrie ajustée avec une crête d'ouvrage dont la cote s'élève à 4,385 m (IGLD85). Or, il est possible que, suite à la conception des nouveaux ouvrages, les géométries post-réfection des revoirs comportent des différences significatives avec celles modélisées. Il est également possible que ces différences géométriques aient des impacts non négligeables sur l'hydraulique locale, au voisinage des ouvrages, et dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Une réévaluation des impacts hydrauliques devra être conduite une fois que les options de réfection deviendront disponibles.

Par ailleurs, il convient de noter que le modèle bidimensionnel ne permet pas de représenter les phénomènes tridimensionnels (vitesses verticales) et que les modélisations effectuées n'incluent pas d'effets locaux liés aux variations météorologiques telles que l'effet des vents ainsi que les variations de pression atmosphérique.

Enfin, la dynamique hydrosédimentaire du secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre est sujette aux processus d'érosion, de sédimentation, de transport de sédiments, etc. Or, l'évaluation des impacts hydrauliques ne comprend pas d'étude des impacts hydrosédimentaires à ce stade du projet. La modification des conditions hydrauliques peut changer la dynamique hydrosédimentaire de l'archipel *via* les processus énumérés plus haut. À leur tour, les changements à la dynamique sédimentaire du delta de Sorel peuvent modifier l'hydraulique dans le secteur de l'archipel. Il est recommandé de procéder à une étude des enjeux et des impacts hydrosédimentaires potentiels du projet de réfection des revoirs.

5 Effets de la réfection des reversoires sur les conditions hydrodynamiques

5.1 Niveaux d'eau

Pour les géométries étudiées, la réfection des reversoires a pour effet d'augmenter les niveaux d'eau à Sorel. Cet effet s'amenuise progressivement vers l'amont dans le fleuve Saint-Laurent jusqu'à Montréal (Jetée #1) et dans la rivière Richelieu jusqu'au barrage de Saint-Ours (Figure 52). Cette augmentation est variable en fonction du niveau d'eau ainsi que des débits du fleuve à Sorel et elle est plus élevée lorsque les niveaux d'eau affleurent la crête des reversoires qu'en conditions d'étiage, laquelle est plus élevée qu'en conditions de crue (Tableau 12). L'augmentation variable des niveaux d'eau dans le fleuve Saint-Laurent peut être perçue, dépendamment des niveaux d'eau et des débits du fleuve, à l'embouchure des rivières des Prairies, des Mille Îles et l'Assomption.

Le modèle prédit une augmentation maximale comprise entre 11 et 13 cm à Sorel pour un niveau d'eau de 4,39 m (IGLD85), dépendamment si la réfection des reversoires 1 à 3 uniquement est effectuée ou si la réfection des 5 reversoires est réalisée (Figures 53 à 58). Dans les zones à l'amont des reversoires, une augmentation des niveaux d'eau est anticipée alors qu'une diminution des niveaux d'eau est généralement prédite à l'aval des reversoires pour lesquels une réfection est effectuée. Une augmentation des niveaux d'eau est généralement prédite dans les chenaux du Moine, aux Corbeaux et de Berthier sur des tronçons de longueur variable en fonction des conditions de niveaux d'eau à Sorel et de débits du fleuve.

Tableau 12 - Comparaison de l'impact moyen de la réfection* des 5 reversoires et de la réfection des reversoires 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85) par rapport aux conditions relevées en 2017 sur le niveau d'eau à Sorel et à Jetée #1

		Impact moyen en cm sur les niveaux d'eau		
		Mai 1999 Niveau d'eau à Sorel : 4,02 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 7 980 m ³ /s	Juin 2015 Niveau d'eau à Sorel : 4,39 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 10 000 m ³ /s	Avril - Mai 1996 Niveau d'eau à Sorel : 6,40 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 15 500 m ³ /s
Réfection des 5 reversoires à la cote d'élévation 4,385 m (IGLD85)	Sorel	De l'ordre de +6	De l'ordre de +12 à +13	De l'ordre de +2
	Jetée #1	De l'ordre de +4	De l'ordre de +7	De l'ordre de +1
Réfection des reversoires 1 à 3 uniquement à la cote d'élévation 4,385 m (IGLD85)	Sorel	De l'ordre de +5 à +6	De l'ordre de +11	De l'ordre de +2
	Jetée #1	De l'ordre de +3	De l'ordre de +6	De l'ordre de +1

* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des reversoires

*** Les reversoires remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

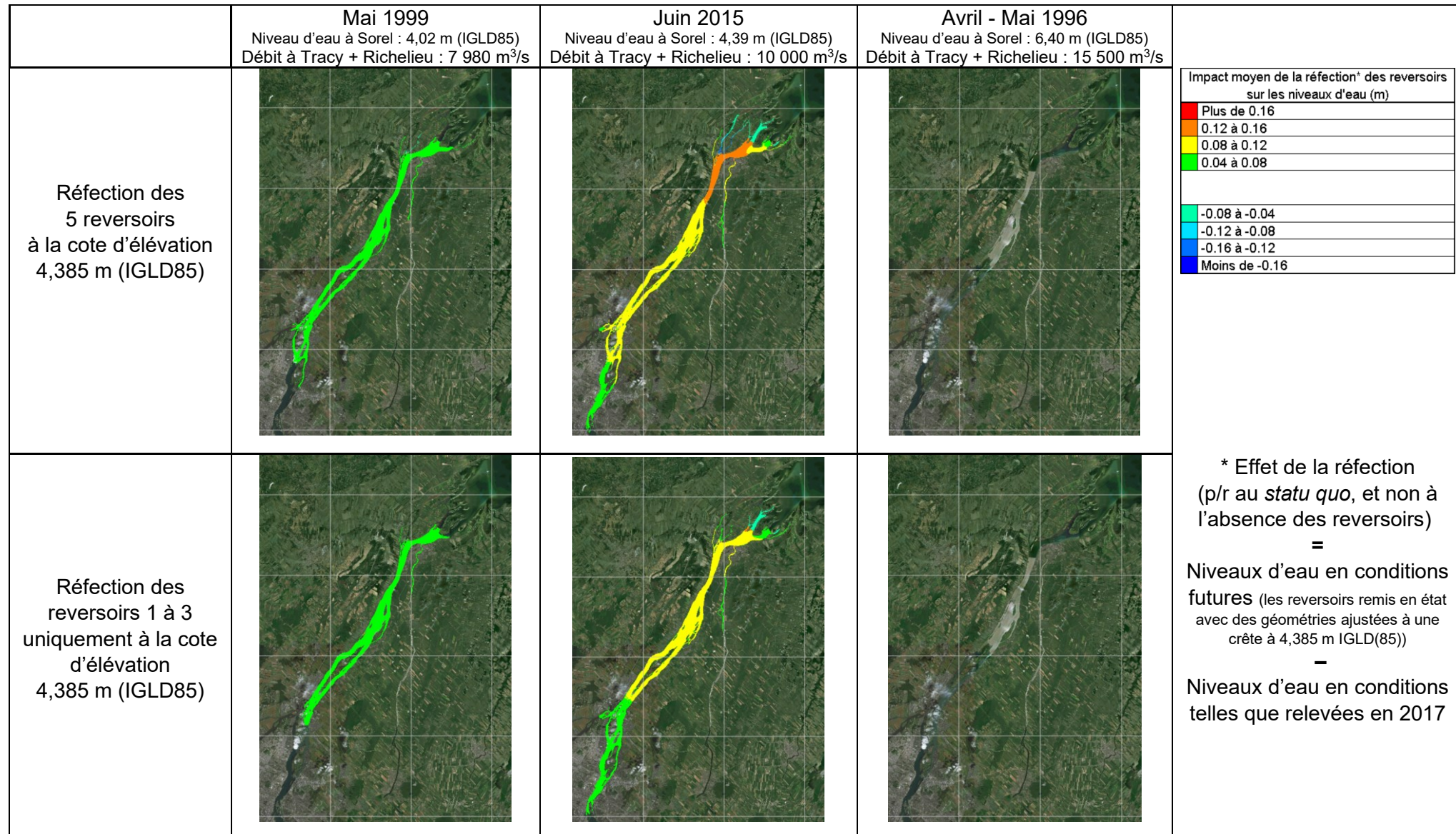
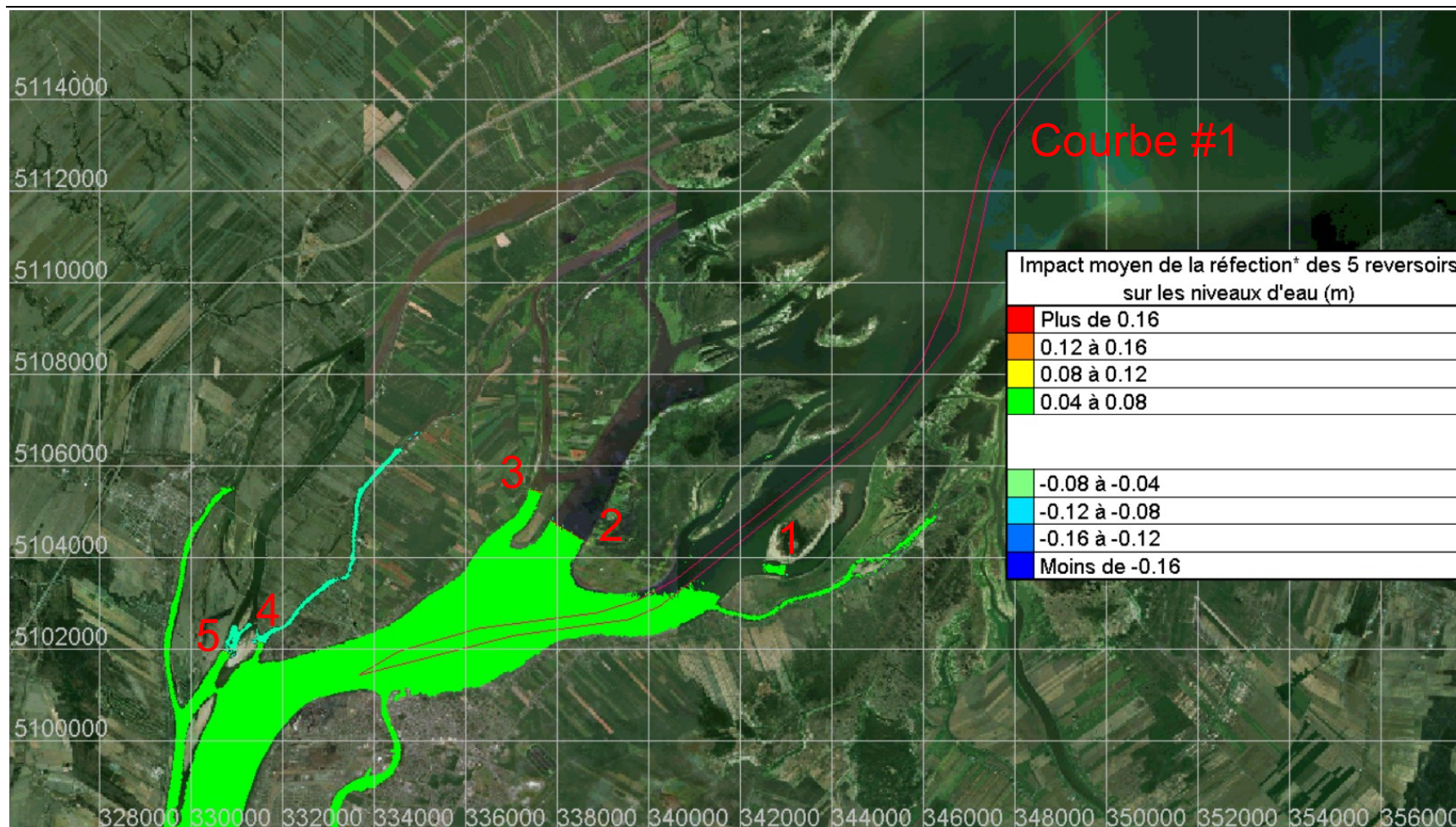


Figure 52 - Comparaison de l'ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs et de la réfection des revoirs 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85) par rapport aux conditions relevées en 2017 sur le niveau d'eau

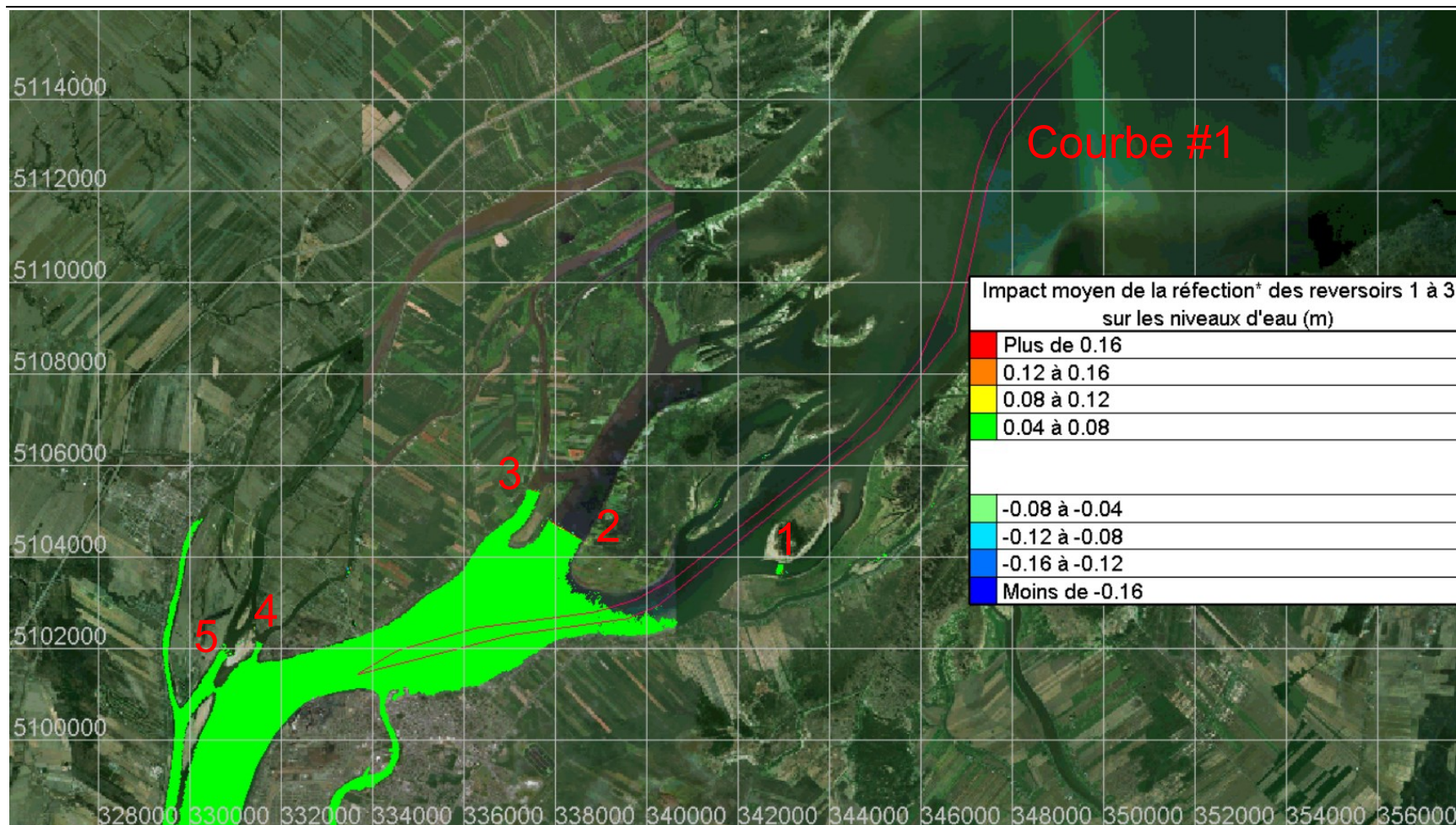


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 53 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les niveaux d'eau pour l'événement de mai 1999

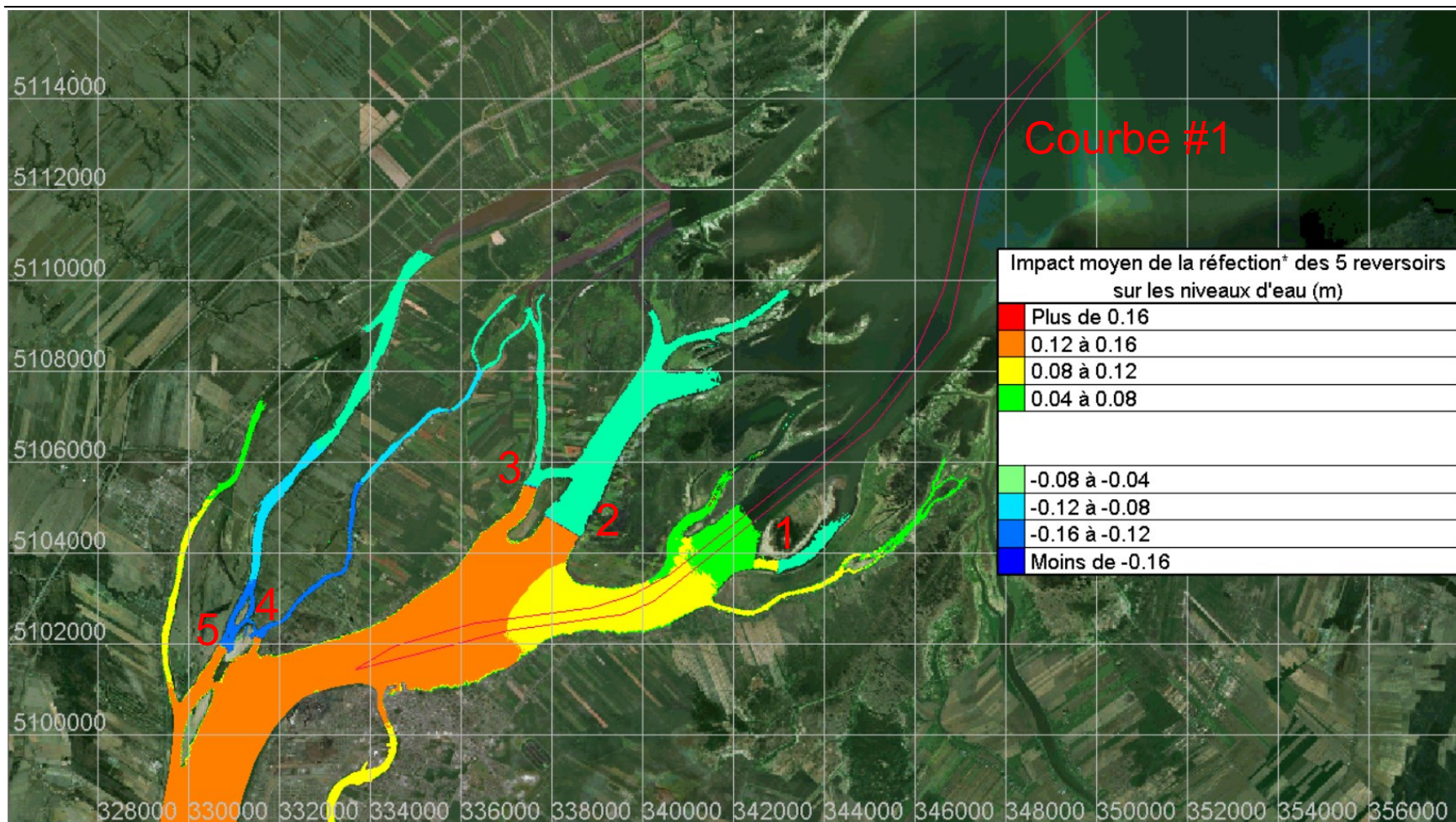


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 54 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les niveaux d'eau pour l'événement de mai 1999

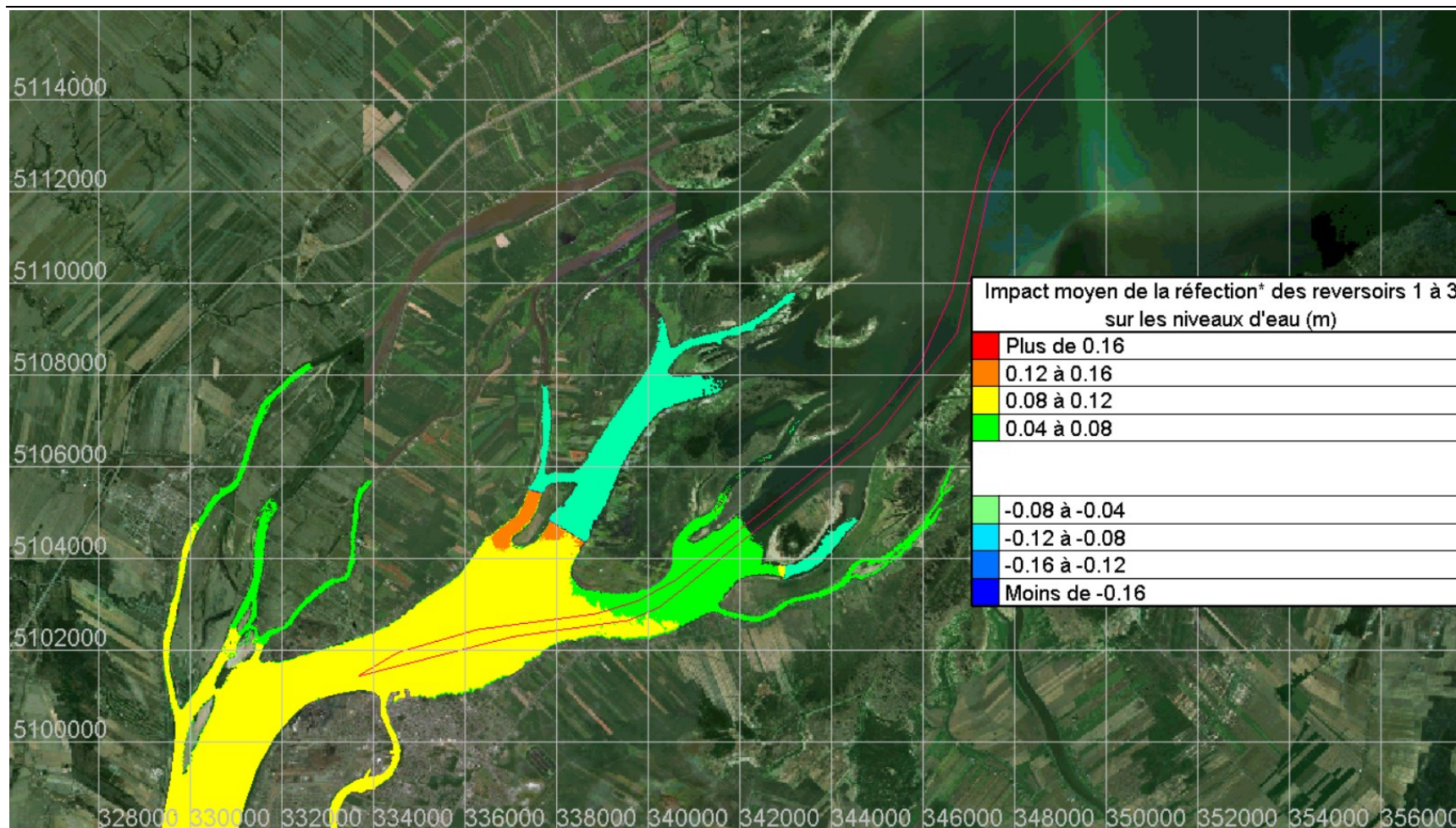


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des réservoirs

*** Les réservoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 55 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 réservoirs sur les niveaux d'eau pour l'événement de juin 2015

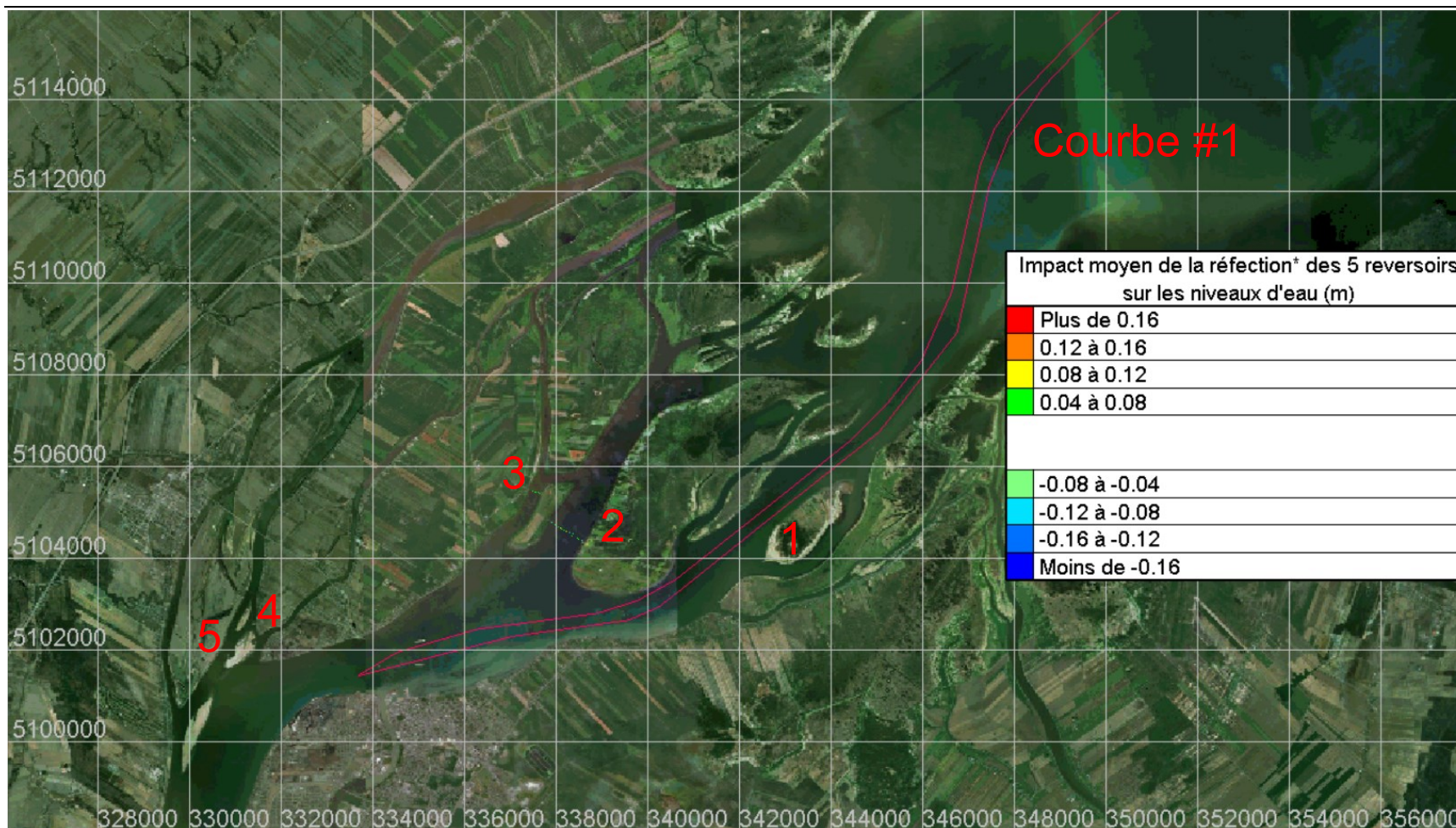


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 56 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les niveaux d'eau pour l'événement de juin 2015

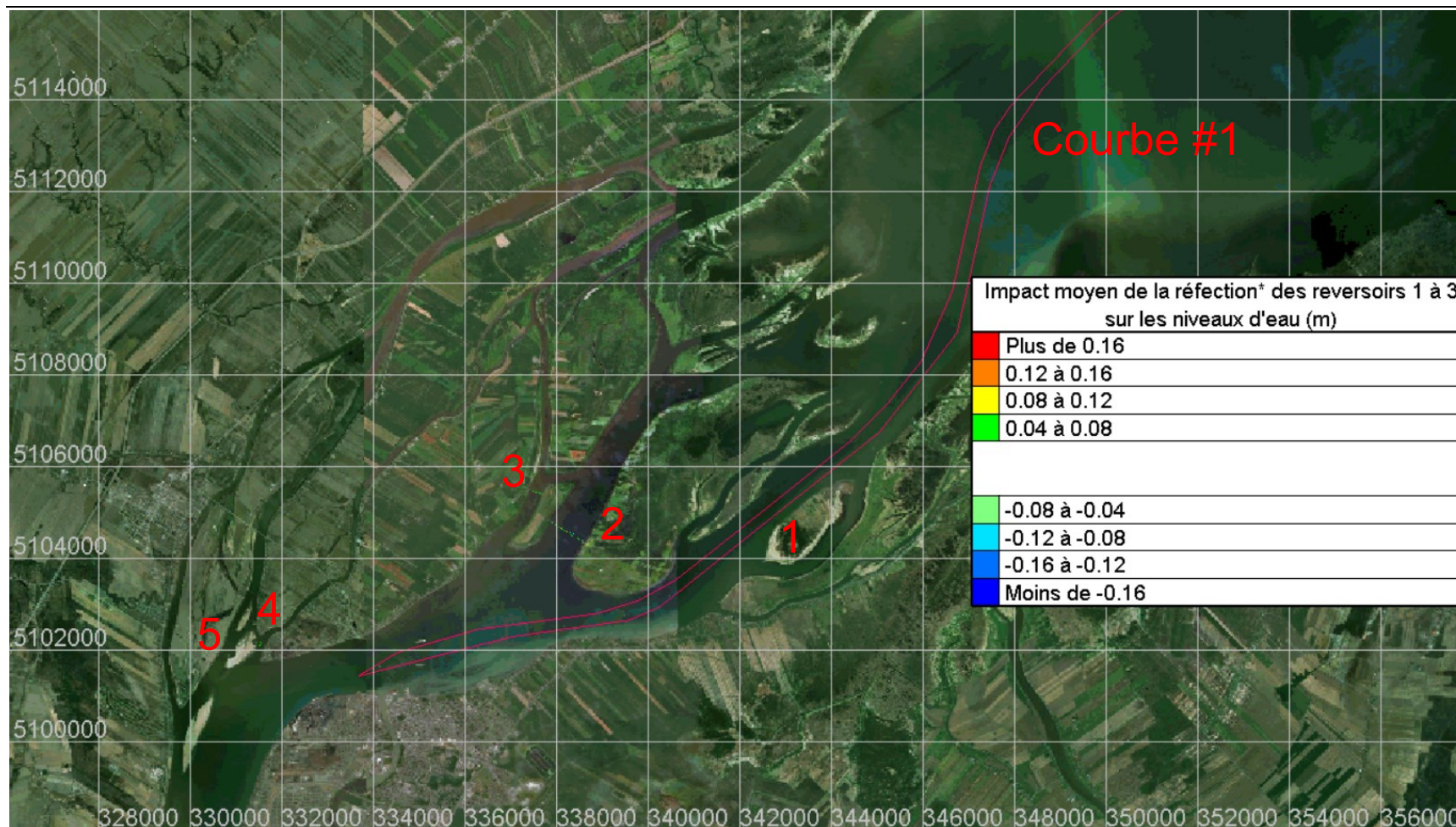


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 57 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les niveaux d'eau pour l'événement d'avril-mai 1996



* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 58 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les niveaux d'eau pour l'événement d'avril-mai 1996

En résumé, le modèle hydrodynamique prédit que la réfection des revoirs aura généralement les impacts potentiels¹⁰ suivants sur les niveaux d'eau :

- Une augmentation des niveaux d'eau dans le fleuve Saint-Laurent dans le tronçon compris entre Montréal et Sorel;
- Une augmentation des niveaux d'eau dans le chenal de navigation entre l'île Lapierre et l'île des Barques, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Une augmentation des niveaux d'eau dans les chenaux à l'amont des revoirs restaurés;
- Une diminution des niveaux d'eau dans les chenaux à l'aval des revoirs restaurés, diminution qui s'amenuise jusqu'au lac Saint-Pierre;
- Une augmentation des niveaux d'eau dans la rivière Richelieu dans le tronçon compris entre le barrage de Saint-Ours et son embouchure avec le fleuve Saint-Laurent;
- Une légère augmentation des niveaux d'eau à l'embouchure de la rivière des Prairies;
- Une légère augmentation des niveaux d'eau à l'embouchure de la rivière des Mille Îles;
- Une augmentation des niveaux d'eau dans le chenal aux Corbeaux, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Une augmentation des niveaux d'eau dans le chenal de Berthier, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Une augmentation des niveaux d'eau dans le chenal du Moine, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité.

5.2 Débits

La comparaison des débits modélisés s'écoulant au droit des chenaux de l'archipel pour les variantes présentées à la section 2 permet d'évaluer l'ordre de grandeur de l'effet de la réfection des revoirs sur la répartition des débits dans ces chenaux. Pour les géométries étudiées, les niveaux d'eau et les débits du fleuve considérés, la réfection des revoirs tend principalement à augmenter le débit dans le bras du chenal de navigation ainsi que dans les chenaux aux Corbeaux et de Berthier en raison de la diminution des débits passant dans les chenaux des revoirs pour lesquels une réfection est effectuée. Cet impact potentiel est variable en fonction du niveau d'eau et du débit du fleuve à Sorel (Tableau 13). Lorsque le niveau d'eau est inférieur à l'élévation de la crête des revoirs en conditions post-réfection, le modèle, qui considère que les revoirs sont imperméables, force la redistribution des débits s'écoulant entre les îles. De tout le débit dévié, environ 80 à 95% du débit est redirigé vers le bras du chenal de navigation, le reste de l'eau empruntant principalement les chenaux de Berthier et aux Corbeaux.

¹⁰ Impacts variables en fonction des niveaux d'eau et des débits du fleuve à Sorel.

Tableau 13 - Ordre de grandeur de l'effet moyen de la réfection des reversoires sur la répartition des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre

		Impact moyen en m ³ /s et en % sur les débits		
		Mai 1999 Niveau d'eau à Sorel : 4,02 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 7 980 m ³ /s	Juin 2015 Niveau d'eau à Sorel : 4,39 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 10 000 m ³ /s	Avril - Mai 1996 Niveau d'eau à Sorel : 6,40 m (IGLD85) Débit à Tracy + Richelieu : 15 500 m ³ /s
Réfection des 5 reversoires à la cote d'élévation 4,385 m (IGLD85)	Bras du chenal principal	+847 / +13%	+1 747 / +24%	+489 / +6%
	Reversoire 1	-85 / -100%	-149 / -97%	-5 / -1%
	Reversoire 2	-535 / -100%	-1 087 / -95%	-371 / -11%
	Reversoire 3	-251 / -100%	-482 / -97%	-225 / -19%
	Reversoire 4	-20 / -100%	-42 / -74%	+30 / +8%
	Reversoire 5	-22 / -99%	-103 / -78%	-4 / -1%
	Chenal aux Corbeaux	+62 / +12%	+76 / +12%	+55 / +6%
	Chenal de Berthier	+8 / +13%	+22 / +25%	+14 / +5%
	Chenal du Moine	+1*	+9*	+11*
Réfection des reversoires 1 à 3 uniquement à la cote d'élévation 4,385 m (IGLD85)	Bras du chenal principal	+795 / +12%	+1 578 / +22%	+483 / +6%
	Reversoire 1	-85 / -100%	-150 / -98%	-6 / -1%
	Reversoire 2	-535 / -100%	-1 097 / -95%	-374 / -11%
	Reversoire 3	-250 / -100%	-486 / -97%	-226 / -19%
	Reversoire 4	+3 / +15%	+18 / +31%	+16 / +4%
	Reversoire 5	+9 / +40%	+35 / +27%	+22 / +4%
	Chenal aux Corbeaux	+60 / +11%	+70 / +11%	+54 / +6%
	Chenal de Berthier	+6 / +10%	+16 / +17%	+12 / +4%
	Chenal du Moine	+1*	+8*	+11*

* Les niveaux d'eau à Sorel ne présentent pas de corrélation élevée avec le débit transitant dans le chenal du Moine. L'hypothèse la plus plausible est à l'effet que les débits dans le chenal du Moine dépendent de ceux de la rivière Yamaska et du niveau d'eau du lac Saint-Pierre. Les impacts de la réfection sur les débits dans le chenal du Moine sont inférieurs à 20 m³/s. Pour de faibles valeurs de débits, les impacts relatifs ne fournissent pas d'indication permettant une interprétation claire.

En résumé, le modèle hydrodynamique prédit que la réfection des reversoires aura généralement les impacts potentiels¹¹ suivants sur les débits :

- Une diminution des débits dans les chenaux des reversoires pour lesquels il y a une réfection;
- Une augmentation des débits dans le bras du chenal de navigation entre l'île Lapierre et l'île des Barques;
- Une augmentation des débits dans le chenal aux Corbeaux;
- Une augmentation des débits dans le chenal de Berthier;
- Une augmentation des débits dans le chenal du Moine¹².

En somme, la réfection des reversoires tend à modifier la répartition des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre. En conséquence, la modification de cette répartition des débits se ferait potentiellement sentir dans la partie amont du lac Saint-Pierre.

5.3 Vitesses de courant

Pour les géométries étudiées, les niveaux d'eau et les débits considérés, la réfection des reversoires aurait potentiellement pour effet de modifier les vitesses de courant de manière perceptible et non négligeable dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre (Figures 59 à 65). Ces modifications seraient variables en fonction du niveau d'eau et du débit du fleuve à Sorel. De manière générale, le modèle prédit une augmentation des vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation entre l'île des Barques et l'île Lapierre, une augmentation variant entre 0,1 et 0,2 m/s en conditions d'étiage et variant entre 0,2 et 0,3 m/s lorsque le niveau d'eau à Sorel avoisine 4,385 m (IGLD85) (Figure 59). Dans les chenaux des reversoires pour lesquels une réfection est effectuée, une diminution des vitesses de courant est prédite à l'amont et à l'aval de ces reversoires. Bien que cet effet serait variable en fonction du débit du fleuve, il est très marqué lorsque le niveau d'eau est inférieur à la crête des reversoires. Une légère augmentation des vitesses de courant est anticipée par endroit dans les chenaux des reversoires 4 et 5 dans le cas où seules les réfections des reversoires 1 à 3 uniquement sont effectuées. Ces impacts potentiels s'amenuisent vers l'amont jusqu'au bras du chenal principal du fleuve et vers l'aval jusqu'au lac Saint-Pierre. Une augmentation des vitesses de courant, variable par endroit et en fonction du niveau d'eau à Sorel, est anticipée dans les chenaux aux Corbeaux et de Berthier. Enfin, un déplacement des corridors de courant est anticipé à l'amont et à l'aval de l'île de Grace en raison de l'augmentation de débit dans le bras du chenal principal entre l'île des Barques et l'île Lapierre qui se traduit par une augmentation de la zone de courant dans le chenal de navigation.

Le modèle bidimensionnel ne prédit pas d'augmentation des vitesses tout juste à l'aval des reversoires. Par contre, un modèle tridimensionnel permettrait d'évaluer cet impact potentiel contrairement au modèle bidimensionnel qui ne prédit pas de vitesses verticales (en Z). Les vitesses prédites par le modèle sont moyennées sur la verticale et présentées dans le plan XY (cf. section 4.1).

¹¹ Impacts variables en fonction des niveaux d'eau et des débits à Sorel.

¹² Voir la note au bas du Tableau 5-2. Les niveaux d'eau au droit du chenal du Moine ne présentent pas de corrélation élevée avec le débit y transitant.

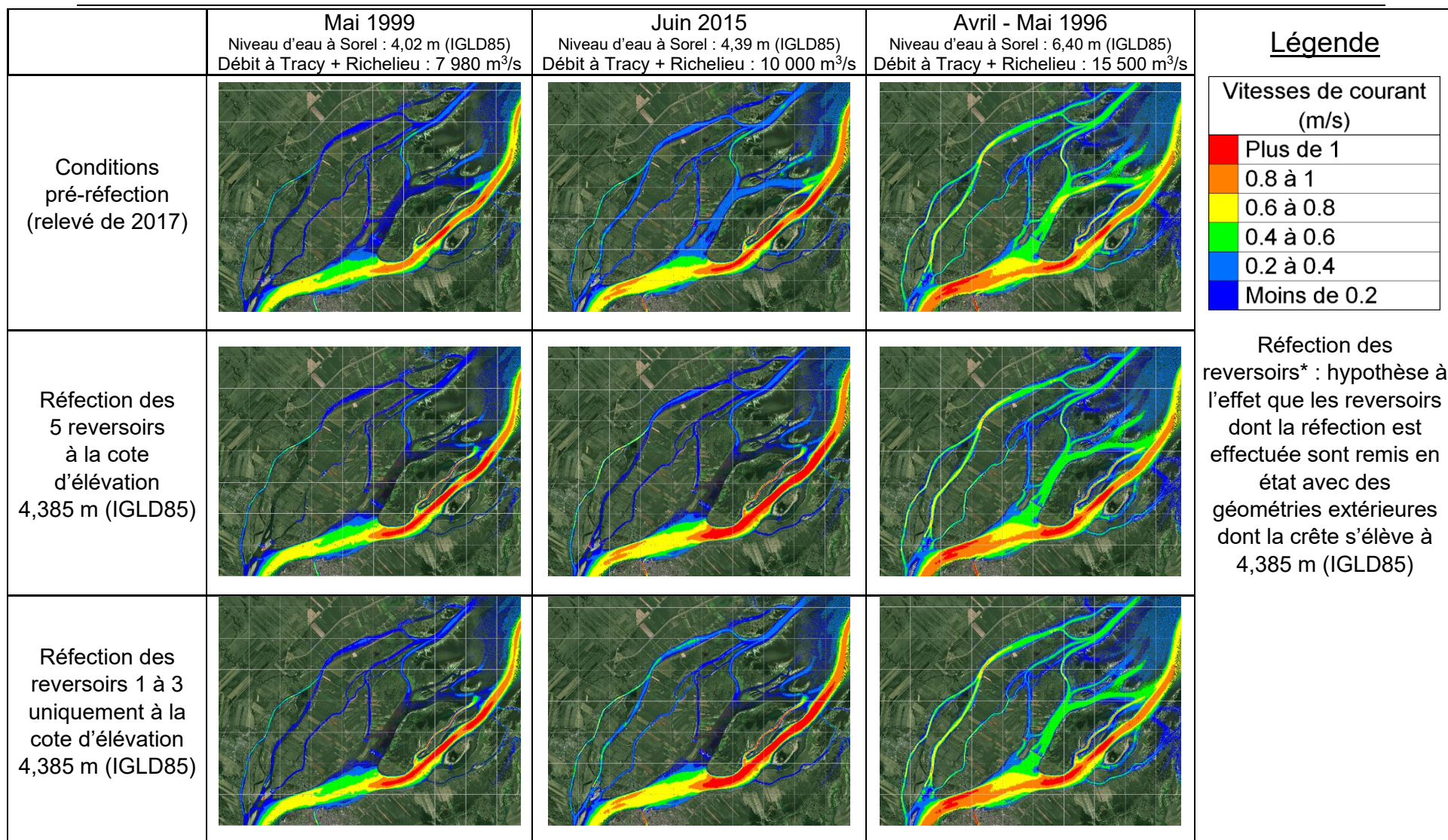
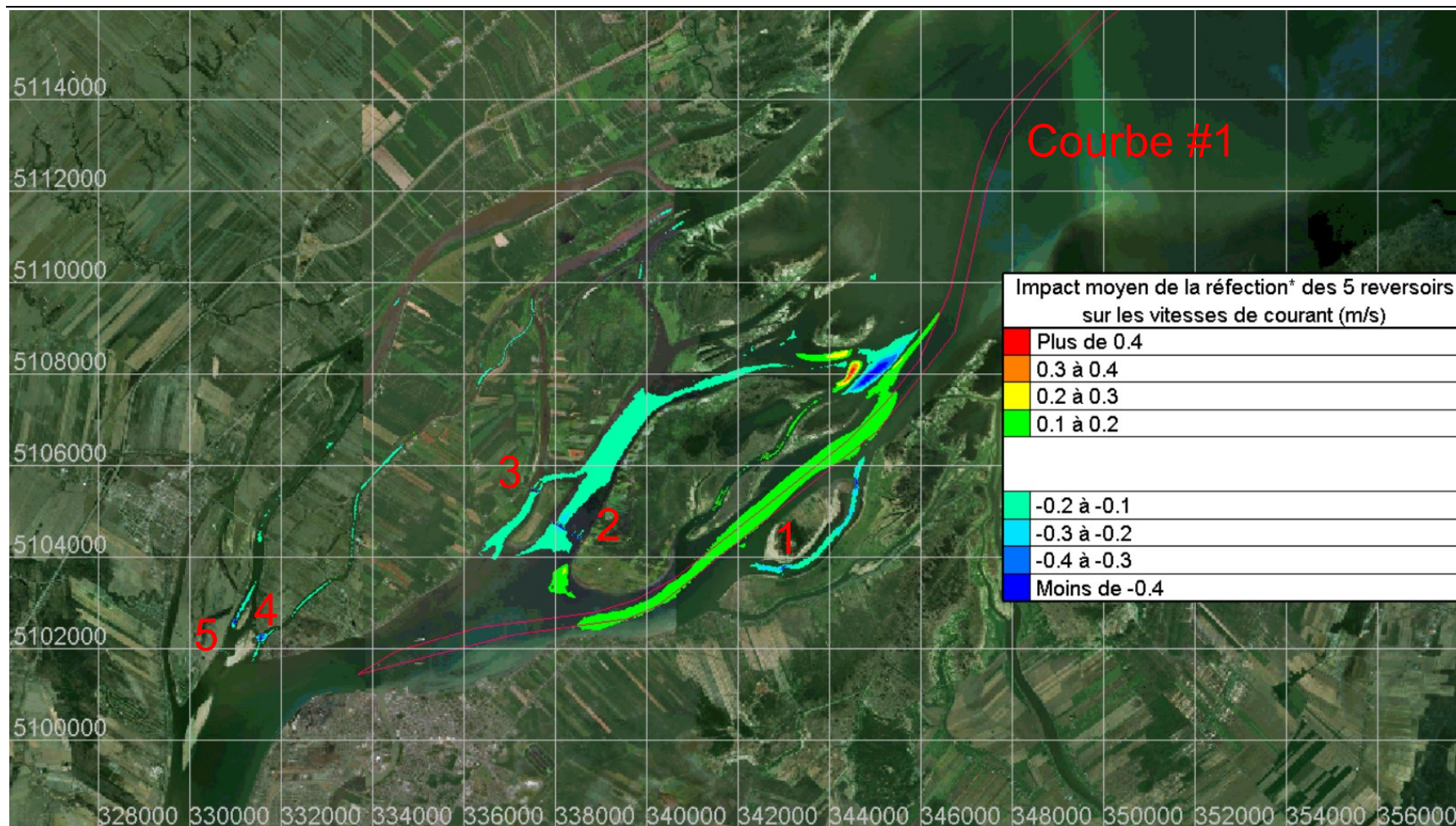


Figure 59 - Comparaison de l'ordre de grandeur des vitesses de courant pour les conditions pré-réfection, pour la réfection* des 5 revoirs et pour la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement avec des géométries extérieures dont la crête s'élève à la cote 4,385 m (IGLD85)

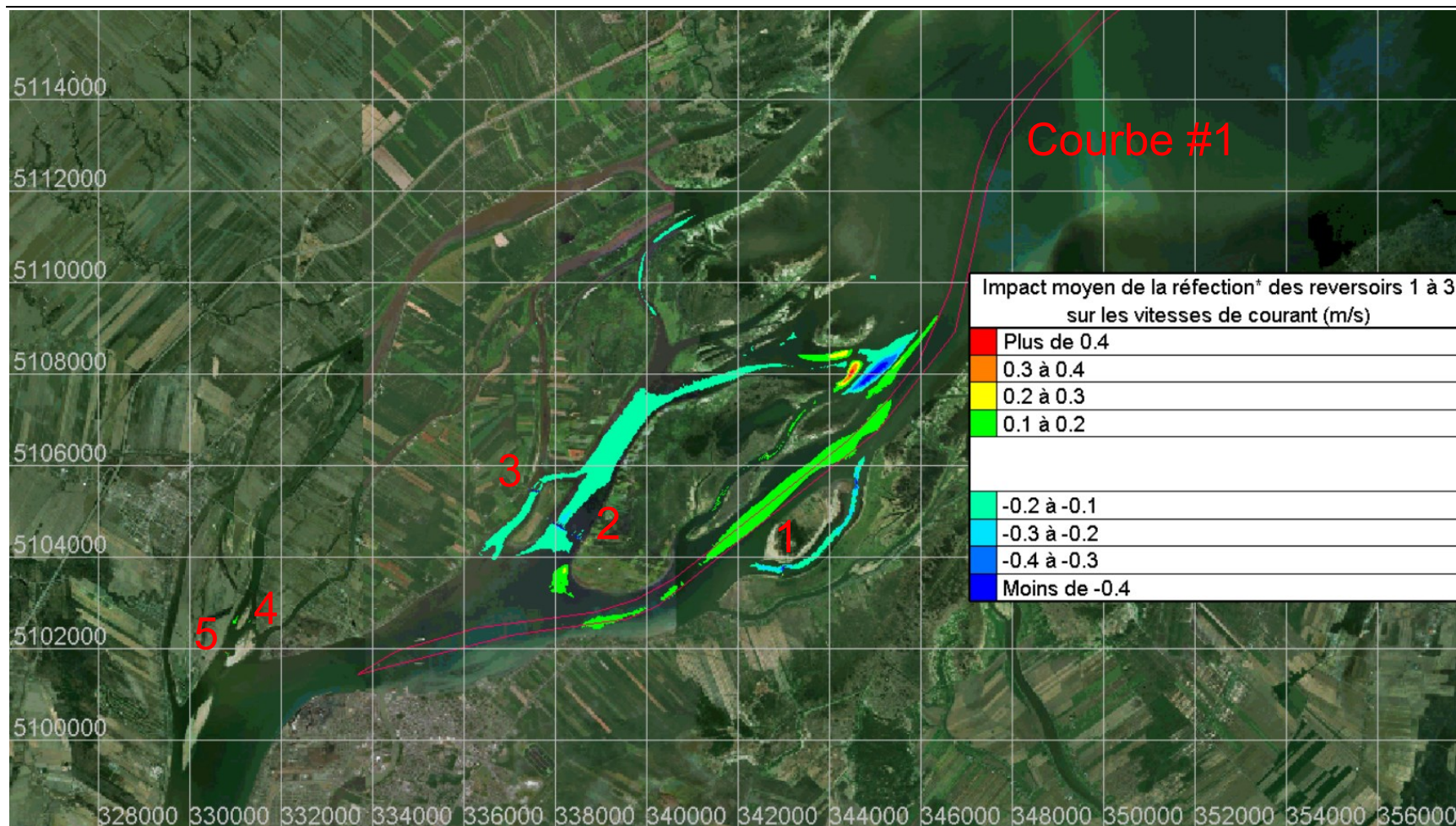


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 60 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les vitesses de courant pour l'événement de mai 1999

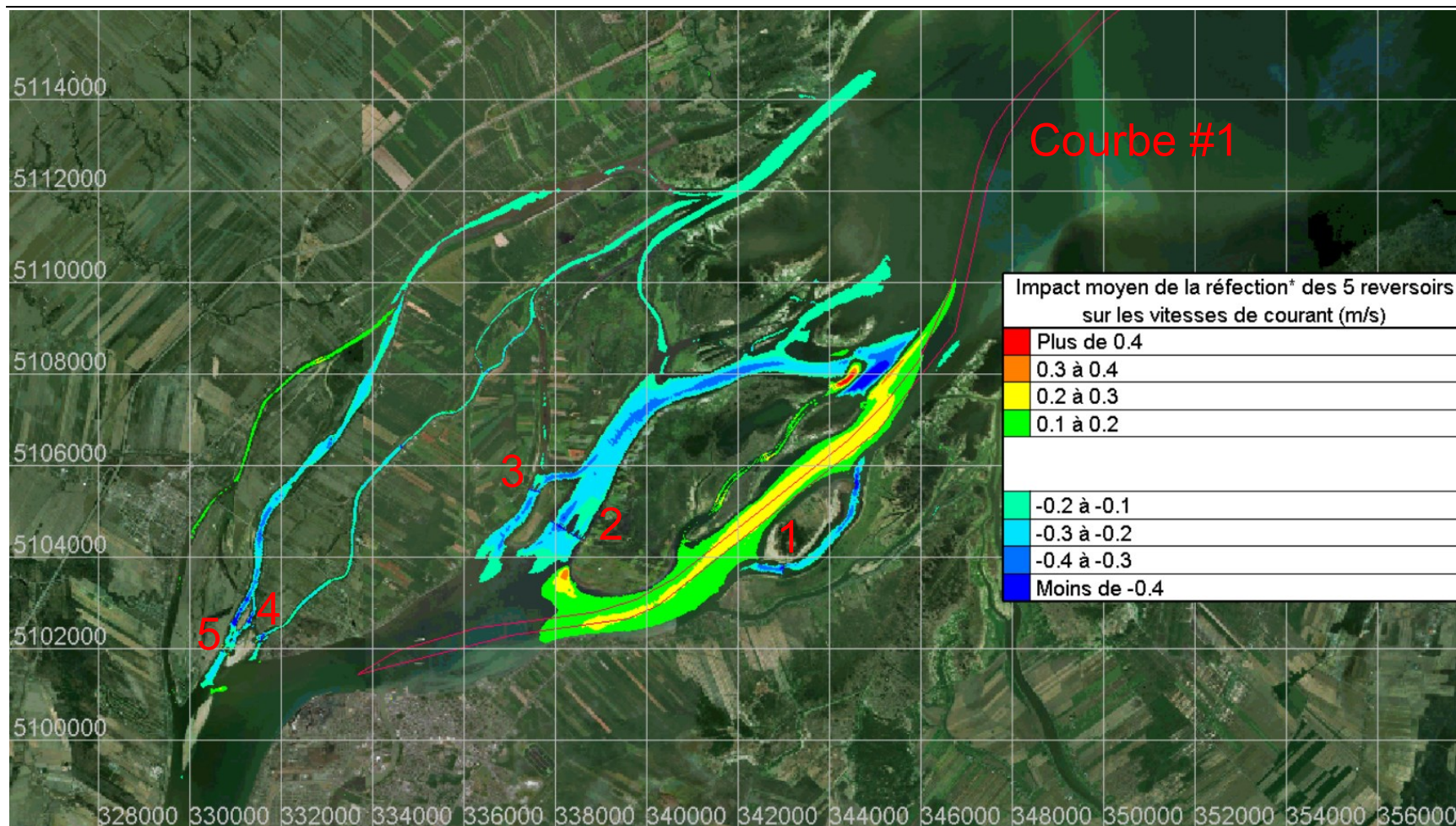


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 61 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les vitesses de courant pour l'événement de mai 1999

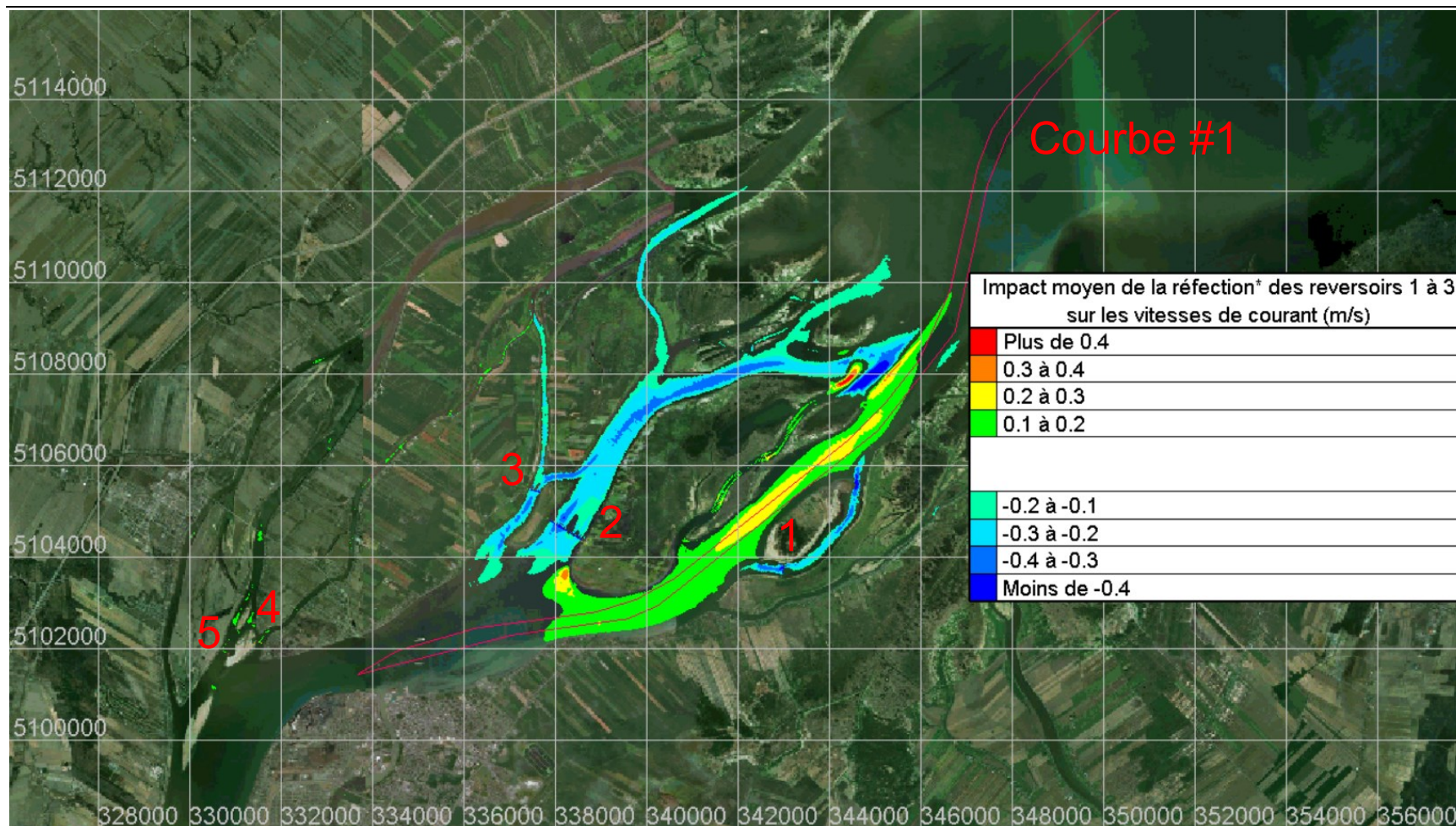


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 62 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les vitesses de courant pour l'événement de juin 2015

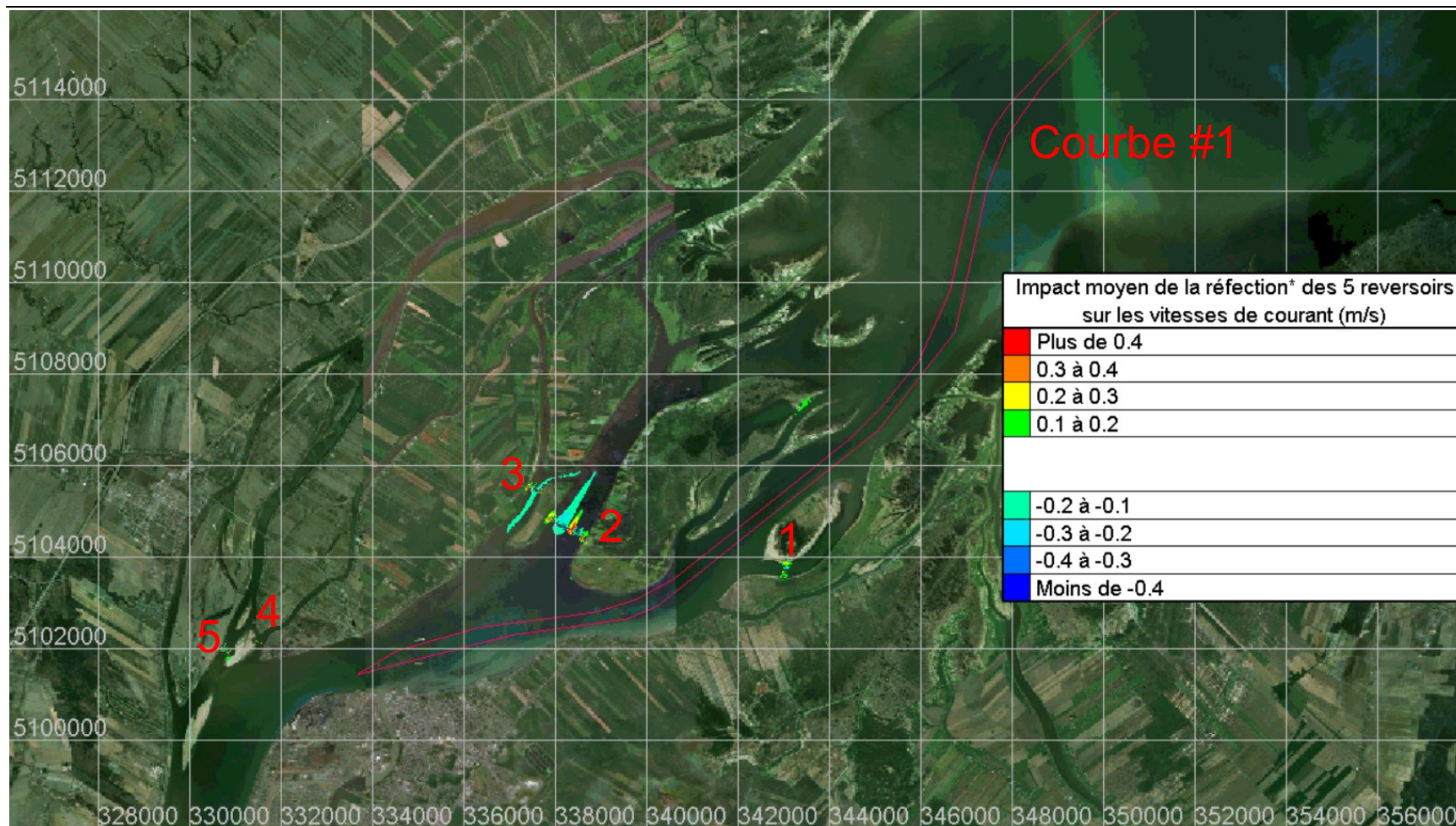


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 63 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les vitesses de courant pour l'événement de juin 2015

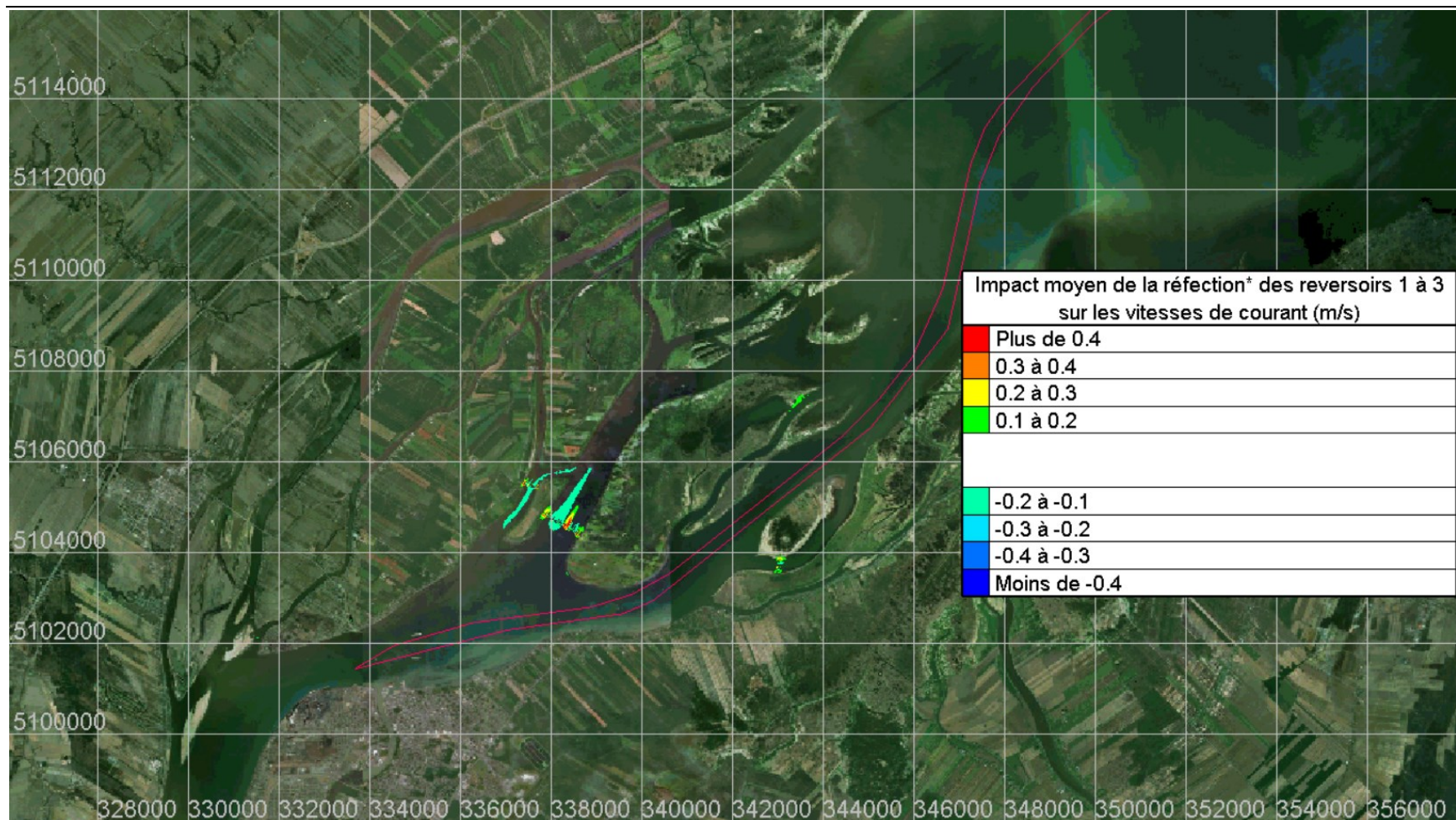


* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 64 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des 5 revoirs sur les vitesses de courant pour l'événement d'avril-mai 1996



* Effet de la réfection** = (Niveaux d'eau en conditions futures*** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

** P/r au *statu quo*, et non à l'absence des revoirs

*** Les revoirs remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

Figure 65 - Ordre de grandeur de l'impact moyen de la réfection* des revoirs 1 à 3 uniquement sur les vitesses de courant pour l'événement d'avril-mai 1996

En résumé, le modèle hydrodynamique prédit que la réfection des revoirs aura généralement les impacts potentiels¹³ suivants sur les vitesses de courant :

- Une diminution des vitesses de courant dans les chenaux à l'amont des revoirs pour lesquels il y a une réfection, une diminution qui s'amenuise vers leur embouchure respective avec le fleuve Saint-Laurent;
- Une diminution des vitesses de courant dans les chenaux à l'aval des revoirs pour lesquels il y a une réfection, une diminution qui s'amenuise vers leur exutoire respectif donnant sur le lac Saint-Pierre;
- Une augmentation des vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation entre l'île Lapierre et l'île des Barques (augmentation qui peut s'étendre de l'île de Grace aux îlets Percés et qui s'amenuise à l'aval de l'île Plate), variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Une augmentation des vitesses de courant dans le chenal aux Corbeaux, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Une augmentation des vitesses de courant dans le chenal de Berthier, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Une légère augmentation des vitesses de courant dans le chenal du Moine, variable par endroit et fonction de l'hydraulicité;
- Un déplacement des corridors de courant à l'amont et à l'aval de l'île de Grace.

5.4 Glaces

Tel que décrit à la section 3.4, plusieurs facteurs d'origine météorologique, hydraulique ou anthropique influencent le régime des glaces dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Il n'est pas anticipé que la réfection des revoirs ait un impact sur la poursuite des activités d'origine anthropique (Tableau 14). Cependant, elle pourrait modifier l'intensité de certaines d'entre elles, notamment le suivi des glaces. De plus, la réfection des revoirs pourrait avoir un effet sur les conditions de glace existantes au voisinage des ouvrages pour lesquels une réfection est réalisée. L'augmentation anticipée des niveaux d'eau entre Montréal et Sorel est variable selon l'hydraulicité et elle dépend des conditions de glace. L'augmentation anticipée des vitesses de courant entre l'île Lapierre et l'île des Barques est variable selon l'hydraulicité et elle dépend également des conditions de glace. Il convient de rappeler que pour les niveaux d'eau et les vitesses de courant, ces effets ne sont valides que pour les géométries étudiées, dans les conditions données. En résumé, parmi 10 facteurs qui ont été identifiés en lien avec le régime des glaces, deux seraient significativement influencés par le projet de réfection, soit les niveaux d'eau et les vitesses de courant.

Selon Simard (1983), la réfection des revoirs aurait comme principal avantage un chenal plus profond entre Montréal et Sorel, non propice aux embâcles. Selon Dumont (1996), la réfection des revoirs est bénéfique à l'évacuation des glaces tout en réduisant les risques d'embâcles sur le lac Saint-Pierre. En effet, l'augmentation des vitesses de courant pourrait favoriser le transit de la glace entre l'île Lapierre et l'île des Barques. En ce qui a trait aux risques d'embâcles dans le lac Saint-Pierre, il est difficile de se prononcer sur la base de la modélisation qui a été effectuée. De plus, il convient de rappeler que ces augmentations de vitesses de courant sont anticipées en ne considérant aucune modification de la section d'écoulement entre l'île des Barques et l'île Lapierre.

¹³ Impacts perceptibles variables en fonction des niveaux d'eau et des débits à Sorel.

Afin de mieux évaluer l'impact de la réfection des reversoires sur la dynamique des glaces, une étude de modélisation de la dynamique des glaces est recommandée.

Tableau 14 - Effets anticipés de la réfection¹ sur les facteurs d'influence du régime des glaces dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre

Facteur d'influence	Origine du facteur d'influence	Effet de la réfection des reversoires sur les facteurs d'influence
1. Activités de déglçage du chenal de navigation	Anthropique	Pas d'effet sur la poursuite des activités, possible modification des activités, mais difficile à anticiper
2. Estacades de retenue des glaces sur le fleuve Saint-Laurent	Anthropique	Pas d'effet sur la poursuite des activités, effet négligeable, <i>a priori</i>
3. Îlots artificiels dans le lac Saint-Pierre	Anthropique	Semble avoir un effet négligeable sur les ouvrages, <i>a priori</i> , mais mérite d'être analysé
4. Suivi des conditions de glace	Anthropique	Pas d'effet sur la poursuite des activités, mais une légère augmentation des activités est anticipée pendant et suivant les travaux de réfection
5. Variations importantes de température	Météorologique	N/A
6. Vents du nord-est	Météorologique	N/A
7. Précipitations	Météorologique	N/A
8. Conditions de glace existantes	Hydraulique et Météorologique	Possibles modifications des conditions de glace au voisinage des reversoires pour lesquels une réfection est effectuée; modification du transit de la glace dérivante au niveau du chenal de navigation entre l'île Lapierre et l'île des Barques
9. Vitesses de courant	Hydraulique	Augmentation des vitesses entre l'île Lapierre et l'île des Barques ² : +10 à 20 cm/s en conditions d'étiage et en conditions d'eaux libres de glace ^{3, 6} +20 à 30 cm/s en conditions d'hydraulicité moyenne et en conditions d'eaux libres de glace ^{4, 6}
10. Hauts niveaux d'eau	Hydraulique	Effet de l'ordre de 2 cm à Sorel en période de crue et en conditions d'eaux libres de glace ^{5, 6}

¹ Effet de la réfection* = (Niveaux d'eau en conditions futures** – Niveaux d'eau en conditions telles que relevées en 2017)

* P/r au *statu quo*, et non à l'absence des reversoires

** Les reversoires remis en état avec des géométries ajustées à une crête à 4,385 m (IGLD85)

² Cette augmentation des vitesses de courant peut s'étendre de l'île de Grace jusqu'aux îlets Percés. L'augmentation est variable par endroit et fonction de l'hydraulicité

³ Conditions d'étiage évaluées : Niveau d'eau à Sorel : 4,02 m (IGLD85), débit à Tracy + Richelieu : 7 980 m³/s

⁴ Conditions d'hydraulicité moyenne évaluées : Niveau d'eau à Sorel : 4,39 m (IGLD85), débit à Tracy + Richelieu : 10 000 m³/s

⁵ Conditions de crue évaluées : Niveau d'eau à Sorel : 6,40 m (IGLD85), débit à Tracy + Richelieu : 15 500 m³/s

⁶ Étude indépendante à réaliser

6 Constats et enjeux liés à l'évaluation des impacts du projet ayant une influence sur le volet hydraulique

Les relevés des revoirs effectués en 2017 ont mis en évidence des écarts entre les crêtes des revoirs et leurs géométries extérieures originales. Ces écarts témoignent des dommages et des changements de géométrie qu'ont subi les revoirs entre le moment de leur dernière réfection et celui où ils ont été relevés. La dégradation des revoirs pourrait être attribuable à l'action, parfois combinée, des courants, des niveaux d'eau, des glaces et, par « effet domino », de la bathymétrie changeante.

Cette érosion cause des dommages aux ouvrages, ce qui peut modifier l'hydraulique de l'archipel du Lac Saint-Pierre. La modification de ces conditions hydrauliques peut à son tour modifier la dynamique hydrosédimentaire de l'archipel *via* différents processus tels l'érosion, la sédimentation et le transport de sédiments. La modification de la dynamique sédimentaire de l'archipel peut, en retour, modifier l'hydraulique. L'obtention d'une meilleure compréhension de la composante hydrosédimentaire de l'archipel du Lac Saint-Pierre est un enjeu, car celle-ci peut influencer les impacts hydrauliques découlant de la réfection des revoirs. Il est recommandé de procéder à une étude des enjeux et des impacts hydrosédimentaires potentiels du projet de réfection des revoirs.

Dans un même ordre d'idées, les simulations hydrodynamiques ont été effectuées sur la base d'un MNT qui n'évolue pas dans le temps et non changeant, *i.e.* qu'aucune modification de la bathymétrie et de la topographie en fonction des conditions hydrauliques ne fut considérée. En ce sens, et tel que mentionné précédemment, hormis les changements antérieurs aux relevés de 2017, lesquels sont déjà exprimés dans le MNT utilisé pour cet exercice de modélisation, aucun effet de tassement géotechnique, aucun dommage structural post-réfection ni aucun phénomène d'érosion des revoirs ou des berges de l'archipel ne sont pris en compte par la présente modélisation. Il est recommandé d'étudier ces phénomènes dans le cadre du projet de réfection.

La présente modélisation s'inscrit dans un processus itératif qui, à cette étape, permet d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts hydrauliques découlant de la possible réfection des revoirs. Suite à l'étape de conception, une mise à jour des modélisations sera requise afin d'affiner l'évaluation des impacts hydrauliques.

En guise de conditions « post-réfection », le secteur GH a choisi de recourir à des géométries extérieures ajustées à la cote 4,385 m (IGLD85) comme 1^{ère} itération pour évaluer les impacts hydrauliques découlant de la réfection des revoirs. Toutefois, ces géométries extérieures ne fournissent pas d'information quant à la conception à réaliser pour obtenir ou garantir une durée de vie donnée. Or, suite à la conception des nouveaux ouvrages, les géométries post-réfection des revoirs comporteront vraisemblablement des différences plus ou moins importantes avec celles modélisées. Il est également possible que ces différences géométriques aient des impacts non négligeables sur l'hydraulique locale, au voisinage des ouvrages, et dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Une réévaluation des impacts hydrauliques devra être conduite une fois que l'analyse des contraintes techniques, la comparaison de différentes options de réfection et l'étape de conception des revoirs seront complétées afin de mieux évaluer l'effet de la réfection des ouvrages.

Les relevés bathymétriques utilisés pour caractériser l'état dit « pré-réfection » datent de 2017 et correspondent aux relevés les plus récents au moment d'effectuer les modélisations. Naturellement, il est possible que l'événement de crue extrême de 2019 ait modifié la géométrie des revoirs. Si c'était le cas, ces modifications à la géométrie des ouvrages pourraient avoir des impacts non négligeables sur l'hydraulique du secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. De nouveaux relevés topographiques et bathymétriques des revoirs mettraient en évidence ces changements de géométrie et leur impact sur l'écoulement. Du seul point de vue du présent exercice de modélisation, de nouveaux relevés ne

sont pas indispensables puisque le choix du scénario de comparaison pré-réfection a été arrêté sur les conditions de 2017. Par contre, il faudra garder à l'esprit qu'il existera un décalage entre les conditions retenues pour l'exercice de modélisation et celles qui prévaudront au moment où seront effectués d'autres travaux de caractérisation au voisinage des revoirs.

Enfin, la question des impacts des changements climatiques sur l'hydraulique du fleuve Saint-Laurent est une question complexe qui constitue un champ de recherche actif. Dans le cas d'une étendue d'eau aussi vaste et complexe que celle du fleuve Saint-Laurent, le défi réside à évaluer adéquatement la combinaison de conditions aux limites, dont les débits entrants, de façon à élaborer un scénario de modélisation qui pourrait être représentatif des conditions hydrauliques futures. Par ailleurs, on note que les projections hydrologiques, qui sont présentées dans l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, ne peuvent être généralisées au fleuve Saint-Laurent (Direction de l'expertise hydrique, 2018). En effet, selon Environnement et Changement climatique Canada, la tendance de la rivière des Outaouais constitue un chaînon manquant pour savoir quels impacts auront les changements climatiques sur l'hydraulique du lac Saint-Pierre et, plus généralement, sur celle du fleuve Saint-Laurent (Ici Radio-Canada, 2019). Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour connaître les effets des changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent. Néanmoins, il est recommandé pour le présent projet de prendre en compte l'effet des changements climatiques dans le cadre des modélisations hydrauliques à venir.

Le Tableau 15 résume les principaux enjeux liés à l'évaluation des impacts du projet de réfection des revoirs ayant une influence sur le volet hydraulique. De manière générale, la disponibilité de données d'études ou d'informations plus précises permettant de redéfinir la géométrie post-réfection des ouvrages constitue l'enjeu principal de la prochaine étape du projet.

Tableau 15 - Enjeux liés à l'évaluation des impacts ayant une influence sur le volet hydraulique du projet de réfection des reervoirs

Enjeux liés à l'évaluation des impacts ayant une influence sur le volet hydraulique	Intrant du modèle à mettre à jour	Résultats à mettre à jour
Évaluation des contraintes techniques et du type de réfection à réaliser	Modèle numérique de terrain	Hydraulique du secteur : Niveaux d'eau et répartition des débits dans l'archipel du Lac Saint-Pierre
Étude de concept de réfection en incluant une analyse comparative d'options ainsi qu'un concept préliminaire de réfection retenu		Hydraulique du secteur : Niveaux d'eau et répartition des débits dans l'archipel
Élaboration d'un concept de réfection retenu des reervoirs et d'élaboration de son modèle numérique de terrain (conditions post-réfection)		Hydraulique du secteur : Niveaux d'eau et répartition des débits dans l'archipel
Relevés bathymétriques des reervoirs post-crue 2019 (conditions pré-réfection)		Hydraulique du secteur : Répartition des débits dans l'archipel
Étude géotechnique (effets de tassement post-réfection)		Répartition des débits dans l'archipel (le cas échéant)
Étude de l'évolution de la structure post-réfection (dommages anticipés)		Répartition des débits dans l'archipel (le cas échéant)
Étude hydrosédimentaire		Hydraulique du secteur : Niveaux d'eau et répartition des débits dans l'archipel
Impacts des changements climatiques à évaluer	Scénarios de conditions aux limites	Hydraulique du tronçon Montréal-Trois-Rivières
Effet du projet sur la dynamique des glaces	N/A ¹	Hydraulique du secteur : Niveaux d'eau et répartition des débits dans l'archipel

¹ Étude indépendante à réaliser

7 Conclusion et recommandations

La présente modélisation s'inscrit dans un processus itératif qui, à cette étape, permet d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts hydrauliques qui découleraient d'une réfection des revoirs de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Suite à l'étape de conception, une mise à jour des modélisations sera requise afin d'affiner l'évaluation des impacts hydrauliques.

Le présent rapport vise à présenter l'exercice de modélisation permettant d'évaluer l'ordre de grandeur des effets de la réfection des revoirs à leur cote de conception sur l'hydrodynamique du fleuve Saint-Laurent, sur le tronçon Montréal – lac Saint-Pierre. Les options de réfection et les alternatives d'aménagement n'étaient pas disponibles au moment où les modélisations ont été effectuées de sorte que des hypothèses sur la géométrie post-réfection ont été effectuées. Néanmoins, l'exercice a permis de caractériser l'ordre de grandeur de quelques impacts appréhendés sur les conditions hydrauliques et d'identifier quelques enjeux potentiels pour la suite du projet.

Les résultats de la modélisation montrent que la réfection des revoirs avec des géométries extérieures à une crête à 4,385 m (IGLD85) tend à augmenter les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Sorel et Montréal et dans la rivière Richelieu entre Sorel et le barrage de Saint-Ours. Cette augmentation est variable selon le débit du fleuve et le niveau d'eau à Sorel. La réfection tend également à augmenter le débit dans le bras du chenal de navigation mais cette augmentation varie aussi en fonction du débit dans le fleuve. Cette augmentation du débit dans le bras du chenal de navigation est liée à la diminution du débit dans les chenaux des revoirs pour lesquels une réfection est réalisée. De manière générale, le modèle prédit une augmentation des vitesses de courant dans le bras du chenal de navigation, augmentation qui est encore une fois variable selon le débit du fleuve et le niveau d'eau à Sorel. Dans les chenaux des revoirs pour lesquels une réfection est effectuée, une diminution des vitesses de courant est prédite à l'amont et à l'aval de ces revoirs. Ces impacts potentiels ne considèrent aucun phénomène de tassement, aucun dommage, aucun effet de perméabilité ainsi qu'aucun phénomène d'érosion des structures ou des berges de l'archipel du Lac Saint-Pierre.

Parmi 10 facteurs qui ont été identifiés en lien avec le régime des glaces, deux sont significativement influencés par le projet de réfection, soit les niveaux d'eau et les vitesses de courant. En effet, l'augmentation des vitesses de courant pourrait favoriser le transit de la glace entre l'île Lapierre et l'île des Barques. En ce qui a trait aux risques d'embâcles dans le lac Saint-Pierre, il est difficile de se prononcer sur la base de la modélisation qui a été effectuée. Afin de mieux évaluer l'impact de la réfection des revoirs sur les glaces, une étude de modélisation de la dynamique des glaces est recommandée.

Les relevés bathymétriques utilisés pour caractériser l'état dit « pré-réfection » datent de 2017 et correspondent aux relevés les plus récents au moment d'effectuer les modélisations. Naturellement, il est possible que l'événement de crue extrême de 2019 ait modifié la géométrie des revoirs. Si c'était le cas, ces modifications à la géométrie des ouvrages pourraient avoir des impacts non négligeables sur l'hydraulique du secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. De nouveaux relevés topographiques et bathymétriques des revoirs mettraient en évidence ces changements de géométrie et leur impact sur l'écoulement. De tels relevés permettraient aussi d'isoler et d'estimer l'impact hydraulique d'une possible dégradation des ouvrages survenue depuis la crue de 2017.

La géométrie utilisée pour quantifier l'état post-réfection correspond à des géométries extérieures ajustées à la cote 4,385 m (IGLD85), lesquelles ne fournissent pas d'information quant à la conception à réaliser pour obtenir ou garantir une durée de vie donnée. Or, il est probable que, suite à la conception des nouveaux ouvrages, les géométries post-réfection des revoirs comportent des différences appréciables avec celles modélisées. Il est également possible que ces différences géométriques aient des impacts non négligeables sur l'hydraulique locale, au voisinage des ouvrages,

et dans le secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre. Une réévaluation des impacts hydrauliques devra être conduite une fois qu'une nouvelle configuration des revoirs sera disponible afin de mieux évaluer l'effet de la réfection des ouvrages.

Par ailleurs, la dynamique hydrosédimentaire du secteur de l'archipel du Lac Saint-Pierre est sujette aux processus d'érosion, de sédimentation, de transport de sédiments, *etc.* À ce stade du projet, l'évaluation des impacts hydrauliques ne comprend pas d'étude des impacts hydrosédimentaires. Or, la modification des conditions hydrauliques peut modifier la dynamique hydrosédimentaire de l'archipel et les processus identifiés plus haut. À son tour, la modification de la dynamique sédimentaire de l'archipel peut en modifier l'hydraulique. L'obtention d'une meilleure compréhension de la composante hydrosédimentaire de l'archipel du Lac Saint-Pierre s'avère un enjeu, car elle peut influencer les impacts hydrauliques de la réfection des revoirs. Il est recommandé de procéder à une étude des enjeux et des impacts hydrosédimentaires potentiels du projet de réfection des revoirs.

Enfin, aucune modification de la bathymétrie et de la topographie en fonction des conditions hydrauliques ne fut considérée dans le cadre de cette modélisation. En ce sens, aucun effet de tassement géotechnique, aucun dommage structural ni aucun phénomène d'érosion des revoirs ou des berges de l'archipel n'a été pris en compte par la présente modélisation. Il est recommandé d'étudier ces phénomènes dans le cadre du projet de réfection des revoirs.

Plusieurs constats et enjeux liés à l'évaluation des impacts du projet de réfection des revoirs ont une influence sur le volet hydraulique. De manière générale, la disponibilité de données d'études ou d'informations additionnelles permettant une redéfinition des conditions post-réfection constitue l'enjeu principal de la prochaine étape du projet.

En résumé, afin de mieux évaluer les impacts hydrauliques du projet de réfection des revoirs, il est recommandé de :

- procéder à une analyse des contraintes techniques du projet et du type de réfection à réaliser;
- effectuer une étude de concepts de réfection en incluant une analyse comparative d'options ainsi qu'un concept préliminaire de réfection retenu (analyse technico-économique);
- retenir un concept de réfection des revoirs et élaborer son modèle numérique de terrain;
- effectuer des relevés bathymétriques des revoirs pour caractériser les conditions existantes (conditions post-crue 2019);
- étudier les effets de tassement géotechnique et évaluer si ce phénomène a un impact sur l'hydraulique post-réfection (le cas échéant);
- étudier la structure post-réfection (dommages anticipés) et évaluer si ce phénomène a un impact sur l'hydraulique post-réfection (le cas échéant);
- étudier les phénomènes hydrosédimentaires, par exemple les effets de l'érosion des revoirs ou des berges;
- étudier les impacts des changements climatiques et procéder à l'élaboration de scénarios de conditions aux limites spécifiques à ce sujet pour la modélisation de l'hydraulique du fleuve Saint-Laurent;

et de mettre à jour l'exercice de modélisation à la lumière des éléments mentionnés ci-haut.

8 Références

Cantin, J.-F. (1994). Étude de la répartition du débit du fleuve Saint-Laurent dans le delta de Sorel. Garde côtière canadienne, rapport DV-4224.

Commission mixte internationale (2014). Plan 2014: Régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Protection contre les niveaux extrêmes, restauration des milieux humides et préparation aux changements climatiques. ISBN : E95-2/18-2014F-PDF.

Direction de l'expertise hydrique (2018). Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018, 34 pages.

Dumont, S. (1996). Étude de l'impact des réservoirs de Sorel sur l'écoulement et les niveaux d'eau dans le tronçon Montréal-Sorel du fleuve Saint-Laurent. Garde côtière canadienne, Région Laurentienne, 9 pages + 5 annexes.

EDF-R&D (2014). TELEMAC MODELLING SYSTEM – TELEMAC-2D – Release 7.0. User Manual. 134 pages.

Garde côtière canadienne – Région Laurentienne (1993). La circulation maritime en hiver sur le fleuve Saint-Laurent. La situation de février 1993. Rencontre du 21 avril 1993. Montréal, Québec.

Garde côtière canadienne – Région Laurentienne (2000). Voies Navigables du Saint-Laurent. Entre Montréal et Île aux Coudres. Carte VN-200. ITG06147-0b. 00-06-01.

Garde côtière canadienne (2015). Voies Navigables du Saint-Laurent. Entre Montréal et Île aux Coudres. Carte VN-200. ANVN-VN200. 2015-03-06.

Garde côtière canadienne (2017a). Plan directeur. Réservoirs, Îles de Sorel. DMYA-8121-2.

Garde côtière canadienne (2017b). Plan directeur. Îlots artificiels du lac Saint-Pierre. DMYA-8954-2.

Garde côtière canadienne (2019). Plan directeur. Estacades flottantes de retenue des glaces (Lavaltrie, Lanoraie et Yamachiche). DMYA-8954-3.

ICI Radio-Canada (2019). Comment les changements climatiques redéfiniront-ils le lac Saint-Pierre? Publié le 26 mai 2019. En ligne. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1171984/changements-climatiques-lac-saint-pierre-inondation>.

Maranda, B. et B. Doyon (2015). Estimation sommaire de la perte d'efficacité des réservoirs des îles de Sorel. Note technique produite par le Secteur Génie hydraulique de la Garde côtière canadienne – Administration centrale, 10 pages.

Ontario Power Generation (2018). RH Saunders Generating Station. En ligne. <https://www.opg.com/generating-power/hydro/ottawa-st-lawrence/Pages/rh-saunders-station.aspx>.

Pasin, A. (1979). Historique des réservoirs des îles de Sorel. Garde côtière canadienne, rapport V2-213, 23 pages.

Saucet, J.-P., Holder, G.K. et R. Boivin (1989). Évaluation des réservoirs de Sorel – Observations, relevés bathymétriques et modélisation numérique. Laboratoire d'Hydraulique Lasalle, rapport LHL-1018.

SNC-LAVALIN (2003). Étude de l'impact des réservoirs de Sorel et des courbes du chenal de navigation du lac Saint-Pierre sur les embâcles et arrêts de glace dans le lac Saint-Pierre. Rapport no D6-009.

Simard, L. (1983). Étude des revoirs des îles de Sorel sur les niveaux d'eau. Garde côtière canadienne, 32 pages.

Simard, L. (1985). Étude en vue d'augmenter le taux d'évacuation de la glace dans le lac Saint-Pierre. Garde côtière canadienne, rapport J1-117.

Simard, L. (1992). Revoirs des îles de Sorel – rendement et effets secondaires. Garde côtière canadienne, rapport D5-606.