



**RÉDUIRE LA VULNÉRABILITÉ AUX INONDATIONS ET À L'ÉROSION
ASSOCIÉES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR DES
COMMUNAUTÉS RIVERAINES DU TRONÇON FLUVIAL DU SAINT-
LAURENT**

**IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES FACTEURS
HYDROCLIMATIQUES INFLUENÇANT LES INONDATIONS ET LES PROCESSUS
D'ÉROSION DES BERGES DU TRONÇON FLUVIAL DU SAINT-LAURENT**

Rapport technique

Février 2020

Impact des changements climatiques sur les facteurs hydroclimatiques influençant les inondations et les processus d'érosion des berges du tronçon fluvial du Saint-Laurent

Rapport technique

Février 2020

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos

RÉVISION :

Hélène Côté, Ouranos

David Huard, Ouranos

Titre du projet Ouranos: Réduire la vulnérabilité aux inondations et à l'érosion associées aux changements climatiques pour des communautés riveraines du tronçon fluvial du Saint-Laurent

Numéro du projet Ouranos: 510031

Ce projet est financé par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020 (PACC 2013-2020) du gouvernement du Québec.



Citation suggérée : Rondeau-Genesse, Gabriel. (2020). *Impact des changements climatiques sur les facteurs hydroclimatiques influençant les inondations et les processus d'érosion des berges du tronçon fluvial du Saint-Laurent*. Rapport présenté par Ouranos. Montréal. 47 p. + annexes.

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

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
1.1	CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	1
1.2	NOTIONS DE BASE EN SCIENCE DU CLIMAT.....	1
2	MÉTHODOLOGIE	4
2.1	FACTEURS HYDROCLIMATIQUES INFLUENÇANT LES INONDATIONS ET LES PROCESSUS D'ÉROSION DES BERGES.....	4
2.2	OBSERVATIONS DE DÉBIT ET DE NIVEAUX D'EAU	5
2.3	RÉANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE	6
2.4	MODÈLES CLIMATIQUES.....	6
2.5	CORRECTION DE BIAIS	9
3	ANALYSE DE LA VARIABILITÉ PASSÉE	10
3.1	CRUES PRINTANIÈRES.....	10
3.1.1	<i>Impact de la crue printanière le long de l'estuaire fluvial.....</i>	<i>10</i>
3.1.2	<i>Conditions propices aux hauts niveaux d'eau</i>	<i>11</i>
3.2	REHAUSSEMENT MARIN ET TENDANCES DANS LES NIVEAUX D'EAU.....	19
3.3	SUBMERSION	22
3.4	AUTRES FACTEURS HYDROCLIMATIQUES	23
3.4.1	<i>Formation d'embâcles</i>	<i>23</i>
3.4.2	<i>Formation de frasil.....</i>	<i>24</i>
3.4.3	<i>Érosion par les vagues et les marées</i>	<i>25</i>
3.4.4	<i>Érosion par gel-dégel.....</i>	<i>25</i>
3.4.5	<i>Érosion par dessiccation de l'argile</i>	<i>26</i>
3.4.6	<i>Érosion par ruissellement de surface</i>	<i>26</i>
4	IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	27
4.1	CRUES PRINTANIÈRES.....	27
4.1.1	<i>Quantités d'eau</i>	<i>27</i>
4.1.2	<i>Apports en provenance des Grands Lacs.....</i>	<i>30</i>
4.1.3	<i>Nombre de redoux.....</i>	<i>30</i>

4.1.4	<i>Vagues de froid intenses après le 1^{er} mars.....</i>	30
4.1.5	<i>Impact sur les crues printanières.....</i>	32
4.2	REHAUSSEMENT MARIN.....	33
4.3	SUBMERSION	35
4.3.1	<i>Facteurs aggravants.....</i>	36
4.4	FORMATION D'EMBÂCLES.....	36
4.4.1	<i>Fleuve Saint-Laurent.....</i>	36
4.4.2	<i>Rivières.....</i>	37
4.5	FORMATION DE FRASIL	38
4.6	AUTRES FACTEURS HYDROCLIMATIQUES INFLUENÇANT LES PROCESSUS D'ÉROSION	39
4.6.1	<i>Érosion par les vagues formées par le vent.....</i>	39
4.6.2	<i>Érosion par gel-dégel.....</i>	39
4.6.3	<i>Érosion par ruissellement de surface</i>	40
5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	41
6	RÉFÉRENCES.....	46
ANNEXE I.	IDENTIFICATION DES FACTEURS HYDROCLIMATIQUES.....	49
ANNEXE II.	RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios d'émissions de GES, par rapport à la fin du 20e siècle (1986-2005)	2
Figure 2. Localisation des stations de Pêches et Océans Canada utilisées pour le projet	5
Figure 3. Niveau d'eau maximal journalier du fleuve Saint-Laurent en 2017	11
Figure 4. Températures et cycles de gel-dégel à Massena (État de New-York) entre décembre 2016 et mars 2017	14
Figure 5. Précipitations totales (mm) entre les mois d'octobre et de mai sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2.....	15
Figure 6. Équivalent en eau de la neige (mm) maximal entre les mois de mars et de juin sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2.....	16
Figure 7. Quantité de pluie (mm) entre les mois d'avril et de juin sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2.....	17
Figure 8. Quantités de pluie-sur-neige (mm) entre les mois de mars et de juin sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2.....	18
Figure 9. Tendances de niveau statistiquement significatives (p value < 0.05) calculées aux bouées et aux marégraphes de Pêches et Océans Canada entre les années 1990 et 2017.....	19
Figure 10. Mouvements verticaux actuels, tel que calculés à partir de données GPS	20
Figure 11. Débits du fleuve mesurés à la station de La Salle entre 1961 et 2017.....	21
Figure 12. Comparaison des débits et des niveaux d'eau mesurés à la station de La Salle entre 1961 et 2017.	21
Figure 13. Niveau d'eau maximal atteint chaque année au marégraphe de Saint-François-de-l'Île-d'Orléans, entre 1970 et 2019.	23
Figure 14. Rehaussement prévu du niveau de la mer en 2100, par rapport à la période 1986-2005, pour le RCP8.5.....	34
Figure 15. Rehaussement prévu du niveau de la mer à Québec en 2100, par rapport à la période 1986-2005, pour différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.....	34
Figure 16. Coefficients associés à 16 variables itératives pour 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits moyens sur 14 jours à la station « 15540 – Montréal, rue Frontenac »	61

Figure 17. Résultats de 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits moyens sur 14 jours à la station « 15540 – Montréal, rue Frontenac ».....	61
Figure 18. Coefficients moyens identifiés par les 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits maximums sur 1 jour.	62
Figure 19. Comparaison entre les débits observés (noir) et simulés (rouge) pour les débits maximums sur 1 jour le long du fleuve Saint-Laurent.....	63
Figure 20. Coefficients moyens identifiés par les 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits maximums sur 14 jours.....	64
Figure 21. Comparaison entre les débits observés (noir) et simulés (rouge) pour les débits maximums sur 14 jours le long du fleuve Saint-Laurent	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des modèles régionaux de climat utilisés pour l'étude.....	7
Tableau 2. Liste des modèles climatiques globaux utilisés pour l'étude	8
Tableau 3. Tendances médianes pour les quantités d'eau de la crue printanière	28
Tableau 4. Tendances médianes pour les quantités d'eau de la crue printanière pour les années extrêmes	29
Tableau 5. Indicateurs de vague de froid dans la région de Cornwall	32

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la mesure 2.6 du PACC 2013-2020 « *Soutien aux municipalités situées le long du Saint-Laurent confrontées aux aléas d'inondation et d'érosion* » et, plus spécifiquement, dans le cadre du projet d'Ouranos « *Réduire la vulnérabilité aux inondations et à l'érosion associées aux changements climatiques pour des communautés riveraines du tronçon fluvial du Saint-Laurent* ». En 2017, suite à une revue de littérature et à une consultation avec les membres des autres équipes associées à la mesure 2.6 du PACC, plusieurs facteurs hydroclimatiques pouvant influencer les processus d'érosion et d'inondation le long du tronçon fluvial du Saint-Laurent ont été identifiés. Ces facteurs vont de phénomènes à grande échelle, tel que la crue printanière du fleuve Saint-Laurent, jusqu'à des phénomènes locaux tels que les processus de gel-dégel des falaises et des microfalaises en argile.

Les objectifs de ce rapport sont de dresser un portrait de ces aléas, en couvrant à la fois le passé récent et les projections futures, et d'identifier les besoins de recherche. Les analyses réalisées dans le cadre de ce projet visent à supporter les efforts de caractérisation des risques d'inondations et d'érosion menés par les partenaires de la mesure 2.6 du PACC 2013-2020, soient la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique (DEHA) du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) ainsi que l'équipe de Patrick Lajeunesse de l'Université Laval. L'objectif est également d'informer les communautés riveraines de l'importance relative des différents processus.

1.2 NOTIONS DE BASE EN SCIENCE DU CLIMAT

Le rapport contient une variété de termes et de concepts propres à la science du climat et à la production de scénarios climatiques. Un excellent document de vulgarisation sur ces sujets est le Guide sur les scénarios climatiques (2017)¹. La section actuelle introduit certains concept-clés, mais il est fortement recommandé que les lecteurs moins familiers avec la science du climat consultent ce guide pour toute clarification.

¹ Disponible à l'adresse suivante : https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/GuideScenarios2017_FR.pdf

Trois types d'incertitude doivent être pris en compte pour estimer l'impact des changements climatiques, soient l'évolution dans le temps des émissions de gaz à effet de serre (GES), la variabilité naturelle due à la nature chaotique des phénomènes atmosphériques et les erreurs structurales des modèles, dues à la représentation simplifiée ou possiblement erronée des processus et interactions dans l'atmosphère, l'eau (océans et eau douce), la cryosphère (neige et glace), les sols et la biosphère. Ces erreurs structurales se traduisent entre autre par une sensibilité différente des modèles climatiques face à une même concentration de gaz à effet de serre (GES).

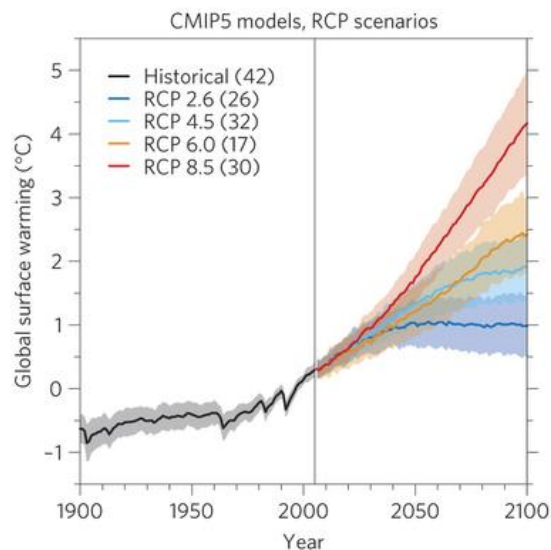


Figure 1. Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios d'émissions de GES, par rapport à la fin du 20^e siècle (1986-2005). Le nombre entre parenthèses indique le nombre de simulations climatiques utilisées (Knutti and Sedláček 2012).

Afin d'explorer l'impact du premier type d'incertitude, des scénarios standards d'émissions futures de GES ont été développés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Dans le 5^e Rapport d'évaluation du GIEC (AR5), ces scénarios sont appelés « Profils représentatifs d'évolution de concentration », ou *Representative Concentration Pathways* (RCP) en anglais, et représentent le forçage radiatif futur découlant de diverses hypothèses socio-économiques et politiques plausibles. L'impact de ces scénarios, en terme de réchauffement planétaire, est illustré à la Figure 1 par les lignes de différentes couleurs. Ces scénarios vont d'une réduction drastique et rapide des émissions de GES (RCP2.6) à une progression constante des émissions tout au long du siècle (RCP8.5).

Afin de prendre en compte l'impact potentiel des émissions de GES sur le climat futur, il est recommandé d'utiliser plusieurs RCPs. Les plus communément utilisés sont les RCP4.5 et 8.5, qui correspondent respectivement à une baisse des émissions mondiales de GES à partir de 2040 et

à une progression constante des émissions tout au long du siècle. Beaucoup moins de simulations sont disponibles pour les autres RCPs.

Les autres types d'incertitude, soient la variabilité naturelle du climat et les erreurs structurales des modèles, sont traités en analysant systématiquement un large ensemble de modèles climatiques. Cela permet non seulement de moyennner les erreurs et imperfections des modèles, mais aussi de mieux prendre en compte la variabilité naturelle du climat qui s'exprime dans chaque simulation. Le réchauffement illustré à la Figure 1, par exemple, est le résultat d'une trentaine de simulations (zones ombragées). Finalement, toujours dans le but de limiter l'influence de la variabilité naturelle du climat sur les résultats, il est recommandé de calculer les statistiques et les probabilités sur des périodes de 20 à 30 ans.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 FACTEURS HYDROCLIMATIQUES INFLUENÇANT LES INONDATIONS ET LES PROCESSUS D'ÉROSION DES BERGES

Plusieurs facteurs hydroclimatiques influençant les processus d'érosion des berges et d'inondation le long du tronçon fluvial du Saint-Laurent ont été identifiés à partir d'une revue de la littérature scientifique, de l'expertise des équipes de travail associées à la mesure 2.6 du PACC et de l'information donnée par les participants des ateliers de consultation qui ont eu lieu au printemps 2018 dans le cadre de ce projet. Les références utilisées spécifiquement pour construire cette liste se trouvent à l'Annexe I.

Les aléas ayant historiquement causé des inondations sont :

- Les crues hivernales et printanières;
- La submersion;
- Les embâcles de glace et de frasil;

alors que ceux causant de l'érosion sont :

- Les crues hivernales et printanières;
- La submersion;
- Les embâcles de glace et de frasil;
- Les fluctuations des niveaux d'eau favorisant les cycles d'humectation et de dessiccation de l'argile;
- Les processus de gel-dégel, qui ont principalement un impact sur les falaises et microfalaises en argile ou en roc;
- Les vagues;
- Les vitesses d'écoulement;
- Le ruissellement de surface causé par la pluie.

L'importance de chaque facteur varie d'une région à l'autre. Les crues printanières, par exemple, ont une influence minimale dans la région de Québec, alors qu'elles jouent un rôle prépondérant dans la région de Montréal.

Les sections qui suivent décrivent les données et les méthodes utilisées afin de caractériser la variabilité naturelle de ces facteurs dans les dernières décennies, ainsi que les tendances anticipées par les projections futures des modèles climatiques.

2.2 OBSERVATIONS DE DÉBIT ET DE NIVEAUX D'EAU

Les données de débits et de niveaux d'eau disponibles le long du fleuve Saint-Laurent ont été acquises de Pêches et Océans Canada pour la période 1968-2019. La base de données des Archives nationales des données hydrologiques (HYDAT) a également été consultée et possède des données de concentration en sédiments. Toutefois, ces données sont sporadiques et n'ont pas permis d'effectuer des analyses concluantes quant aux cycles d'érosion dans le fleuve Saint-Laurent. Il s'agit là d'une lacune importante et la compréhension des phénomènes causant de l'érosion profiterait de la mise en place d'un réseau d'observation dédié.

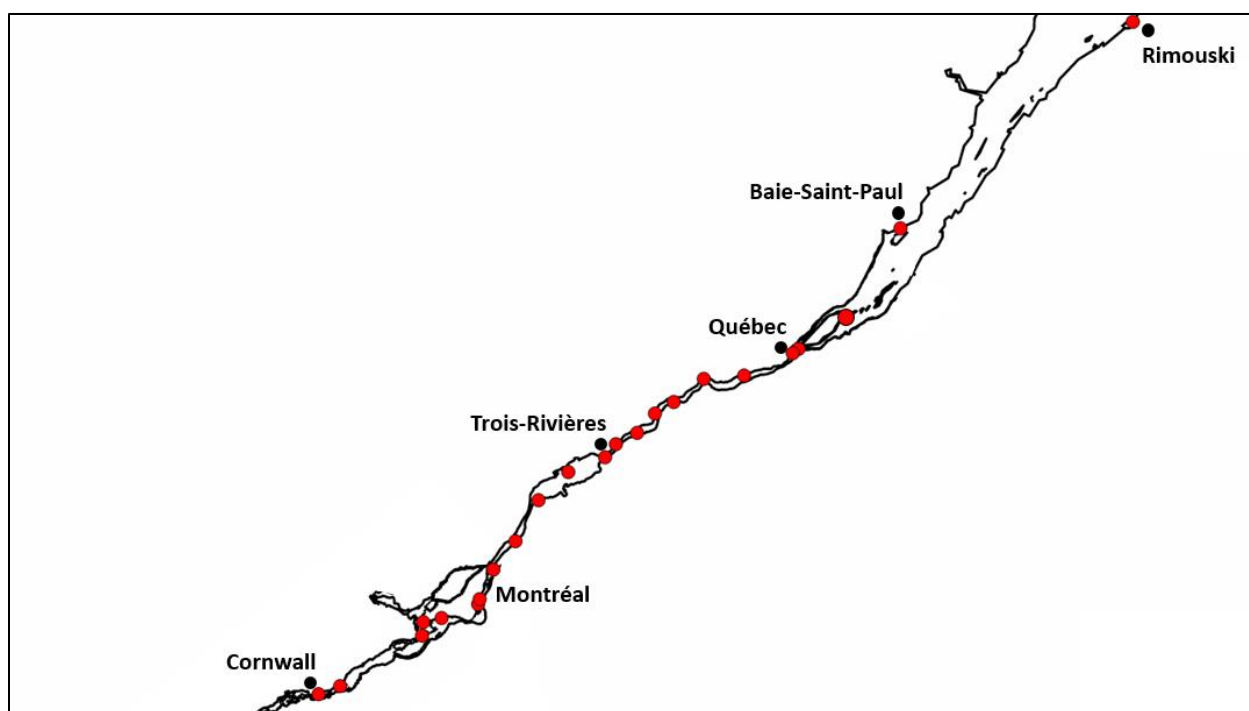


Figure 2. Localisation des stations de Pêches et Océans Canada utilisées pour le projet (cercles rouges).

2.3 RÉANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE

Le fleuve Saint-Laurent est un système complexe. Les niveaux d'eau observés à Montréal, par exemple, sont le résultat d'une combinaison de plusieurs phénomènes météorologiques ayant lieu dans le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais. Or, des sections importantes de ce territoire n'ont qu'une faible densité de stations d'observation. De plus, plusieurs des analyses souhaitées pour ce projet font appel à des données pour lesquelles il est difficile d'obtenir des observations couvrant de larges territoires, tel que l'équivalent en eau de la neige ou les vents.

Par conséquent, il a été décidé d'avoir recours à une réanalyse météorologique plutôt qu'à des données de station. Ce type de produit consiste en un modèle de prévision météorologique atmosphérique alimenté par un système d'assimilation de données observées. Ces simulations décrivent donc des événements réels du passé et permettent de reconstituer une base de données de variables climatiques historiques sur un large territoire. Toutefois, comme les réanalyses se basent en grande partie sur des observations satellitaires, les données commencent typiquement autour de 1980. L'analyse des crues de 1974 et 1976 n'a donc pas pu être réalisée d'une manière aussi détaillée que la crue de 2017.

Suite à une revue de la littérature, il a été décidé d'avoir recours à la réanalyse MERRA-2 (Gelaro et al. 2017). Cette réanalyse, contrairement à plusieurs autres produits de ce genre, effectue une correction des biais pour ses précipitations et est l'une des seules réanalyses dont le bilan hydrologique est maintenu cohérent. De plus, la base de données de MERRA-2 est régulièrement mise à jour, ce qui signifie que des données existent pour les crues de 2017 et 2019.

2.4 MODÈLES CLIMATIQUES

Les projections futures discutées dans ce rapport proviennent de l'analyse des données de modèles climatiques à faible et à haute résolution spatiale, qui proviennent respectivement du *Fifth Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5; Taylor et al., 2011) et du domaine nord-américain du *COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment* (NA-CORDEX; Mearns et al. 2017). Des simulations de la cinquième génération du *Canadian Regional Climate Model* (CRCM5), réalisées à Ouranos, ont été utilisées pour compléter l'ensemble NA-CORDEX.

L'ensemble CMIP5 possède une grande variété de modèles globaux qui permettent de bien couvrir l'incertitude reliée aux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre futurs, à la variabilité naturelle du climat et aux incertitudes liées aux modèles climatiques eux-mêmes. En contrepartie, l'ensemble de simulations régionales NA-CORDEX est mieux adapté pour analyser les

phénomènes locaux, tel que les quantités de neige dans un bassin versant de taille moyenne ou les vents dans la vallée du Saint-Laurent. Bien que cet ensemble comprenne moins de modèles, il couvre généralement de manière adéquate l'incertitude liée à l'évolution future du climat (Karmalkar 2018).

Les Tableaux 1 et 2 indiquent les modèles choisis et les variables extraites. Ce qui n'a pas été extrait n'était tout simplement pas disponible. Deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ont été sélectionnés, soient le RCP4.5 (émissions modérées) et le RCP8.5 (émissions fortes). D'autres scénarios existent (RCP2.6 et RCP6.0), mais n'ont pas été utilisés en raison du nombre beaucoup plus restreint de simulations disponibles.

Tableau 1. Liste des modèles régionaux de climat utilisés pour l'étude

Centre de modélisation	Modèle de circulation générale	Modèle régional	RCP4.5	RCP8.5	T°	Pr	Neige	Vents
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanESM2	CanRCM4	X	X	X	X	X	X
Université du Québec à Montréal (UQÀM)	CanESM2	CRCM5 (UQÀM)	X	X	X	X	X	X
	MPI-ESM-LR		X	X	X	X	X	X
	MPI-ESM-MR			X	X	X		X
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	CanESM2	RCA4	X	X	X	X		X
	EC-EARTH		X	X	X	X		X
Danish Meteorological Institute (DMI)	EC-EARTH	HIRHAM5	X	X	X	X	X	X
Iowa State University / National Center for Atmospheric Research (NCAR)	GFDL-ESM2M	RegCM4		X	X	X		
	HadGEM2-ES			X	X	X		
	MPI-ESM-LR			X	X	X		
University of Arizona / National Center for Atmospheric Research (NCAR)	GFDL-ESM2M	WRF		X	X	X		
	HadGEM2-ES			X	X	X		
	MPI-ESM-LR			X	X	X		
Ouranos	CanESM2	CRCM5 (Ouranos)	X	X	X	X	X	X
	GFDL-ESM2M		X	X	X	X	X	X
	MPI-ESM-LR			X	X	X	X	X
	CNRM-CM5		X	X	X	X	X	X

Tableau 2. Liste des modèles climatiques globaux utilisés pour l'étude

Centre de modélisation	Modèle	RCP4.5	RCP8.5	T°	Pr	Neige	Vents
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation / Bureau of Meteorology (CSIRO-BOM)	ACCESS1.0	X	X	X	X		
	ACCESS1.3	X	X	X	X		
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1.1	X	X	X	X		
	BCC-CSM1.1(m)	X	X	X	X		
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM	X	X	X	X		
National Center for Atmospheric Research (NCAR)	CCSM4		X	X	X		
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanESM2	X	X	X	X	X	X
Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CESM		X	X	X		X
	CMCC-CM	X	X	X	X		
	CMCC-CMS	X	X	X	X		
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5	X	X	X	X		
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3.6.0	X	X	X	X	X	
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences / Tsinghua University (LASG-CES)	FGOALS-g2	X	X	X	X		
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	GFDL-CM3	X	X	X	X		
	GFDL-ESM2G	X	X	X	X	X	X
	GFDL-ESM2M	X	X	X	X	X	X
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA GISS)	GISS-E2-R	X		X	X		
Met Office Hadley Centre (MOHC)	HadGEM2-CC	X	X	X	X	X	X
	HadGEM2-ES	X	X	X	X	X	X
Institute for Numerical Mathematics (INM)	INM-CM4	X	X	X	X		
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-LR	X	X	X	X		X
	IPSL-CM5A-MR	X	X	X	X		X
	IPSL-CM5B-LR	X	X	X	X		X
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) / National Institute for Environmental Studies / Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC-ESM	X	X	X	X	X	X
	MIROC-ESM-CHEM	X	X	X	X		X
	MIROC5	X	X	X	X	X	X
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR	X	X	X	X	X	X
	MPI-ESM-MR	X	X	X	X	X	X
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-CGCM3	X	X	X	X		
	MRI-ESM1		X	X	X		
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	X	X	X	X	X	X

2.5 CORRECTION DE BIAIS

Tel que décrit brièvement à la Section 1.2, les limitations d'échelle et les imperfections dans les algorithmes représentant les interactions entre l'atmosphère, l'eau (océans et eau douce), la cryosphère (neige et glace), les sols et la biosphère signifient que les modèles climatiques possèdent des biais qui peuvent causer des erreurs d'interprétation lorsque les données sont comparées aux données observées à un site précis. Les méthodes de transformation de grille et de correction de biais permettent, à partir d'observations à des sites, d'ajuster les sorties des modèles afin qu'elles soient plus représentatives des conditions observées.

Dans le cadre de la présente étude, une mise à l'échelle statistique a été effectuée à l'aide d'une correction par quantiles (Mpelasoka and Chiew 2009; Gennaretti et al. 2015). Cette technique cherche à corriger les différences entre une simulation climatique et les observations pendant une période dite de « référence ». Pour l'étude actuelle, les données utilisées en référence proviennent de la réanalyse MERRA-2 et la période de référence correspond aux années 1981 à 2010.

La correction des biais a été réalisée pour les températures et pour les précipitations seulement. Les autres variables analysées, soient les vents et l'équivalent en eau de la neige, sont laissées brutes, mais seront analysées en conséquent.

Voici quelques particularités spécifiques au projet :

- La correction des biais est appliquée indépendamment pour chaque jour de l'année. Afin d'utiliser un nombre suffisant de données pour établir une fonction de transfert robuste, une fenêtre mobile de 31 jours juliens est utilisée pour les observations et pour la simulation en période de référence. Cela signifie que pour chaque journée, la fonction de transfert est construite à partir de 930 données (31 jours juliens x 30 ans).
- La tendance présente dans la simulation climatique est retirée temporairement à l'aide d'un polynôme de 4e degré. Le post-traitement est effectué sur les résidus statistiques, puis la tendance est réappliquée au jeu de données corrigées. Cela est fait afin que le post-traitement lui-même n'influence pas les tendances des simulations (Gennaretti et al. 2015).

3 ANALYSE DE LA VARIABILITÉ PASSÉE

3.1 CRUES PRINTANIÈRES

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

Le débit sortant du lac Ontario est régularisé depuis 1960 et le débit sortant de la rivière des Outaouais fait l'objet d'une gestion intégrée depuis 1983. Ces actions visent à minimiser les inondations et à accroître le débit lors d'étiages, dans le but de favoriser la navigation commerciale et la production d'hydroélectricité des centrales situées sur le Saint-Laurent et dans le bassin versant de la rivière des Outaouais. Jusqu'à tout récemment, cette gestion avait permis d'éviter les inondations le long du fleuve Saint-Laurent (Morneau et al. 2014). Or, pendant les printemps 2017 et 2019, les conditions météorologiques ont été particulièrement extrêmes et ont dépassé la capacité de gestion des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais (ILOSLRB 2017; GLAM 2018). Même si cette gestion complexifie l'analyse des niveaux d'eau et leur lien avec les conditions météorologiques observés, cette section du rapport présente les différents phénomènes météorologiques en jeu pendant les crues printanières.

L'analyse présentée dans cette section s'inspire fortement des conclusions de ILOSLRB (2017) et GLAM (2018)¹.

3.1.1 IMPACT DE LA CRUE PRINTANIÈRE LE LONG DE L'ESTUAIRE FLUVIAL

La crue printanière joue un rôle majeur pour les phénomènes d'inondation dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent. Toutefois, l'importance de cet aléa diminue progressivement le long de l'estuaire fluvial, où les marées et les ondes de tempête jouent un rôle dominant sur les niveaux d'eau. En 2017, par exemple, le niveau d'eau maximal de Neuville à l'Île d'Orléans a été causé par une tempête les 14 et 15 mars, plutôt que par la crue printanière. Les débits du fleuve en 2017 sont illustrés à la Figure 3.

¹ Disponibles aux adresses suivantes :

- https://legacyfiles.ijc.org/tinymce/uploaded/ISLRBC/ILOSLRB_FR_SummaryReport.pdf
- <https://ijc.org/en/glam/summary-2017-great-lakes-basin-conditions-and-water-level-impacts-support-ongoing-regulation> (anglais)

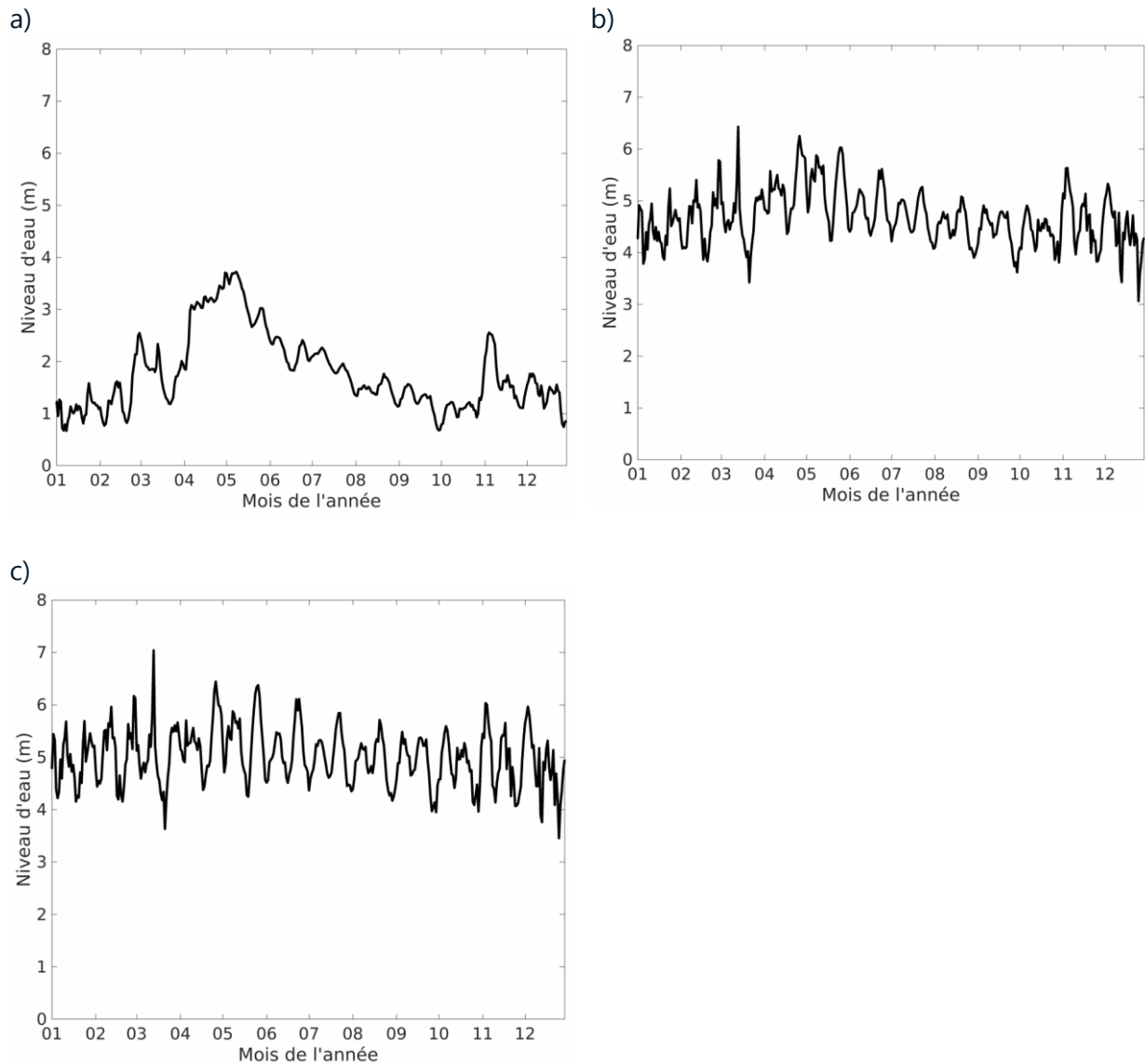


Figure 3. Niveau d'eau maximal journalier du fleuve Saint-Laurent en 2017 pour (a) Trois-Rivières (b) Neuville (c) Vieux-Québec. Les différences de niveau d'eau entre Trois-Rivières et Neuville s'expliquent principalement par l'effet de la marée.

3.1.2 CONDITIONS PROPICES AUX HAUTS NIVEAUX D'EAU

À partir d'une revue de la littérature et des rapports produits suite aux inondations de 2017 (ILOSRLB 2017; GLAM 2018), une liste d'indicateurs climatiques pouvant causer des inondations ou exacerber la crue printanière du fleuve Saint-Laurent a été établie :

- Précipitations totales
- Quantité de pluie printanière, notamment sur le lac Ontario
- Quantité de pluie-sur-neige
- Apports de fonte (neige au sol au début du printemps + précipitations)
- Températures froides en mars
- Températures chaudes en avril et en mai
- Nombre de redoux pendant l'hiver
- Nombre de vagues de froid après le 1^{er} mars

La réanalyse MERRA-2 a été utilisée pour calculer et analyser ces indicateurs, ainsi que quelques autres, sur la période 1980-2019. Une régression linéaire multiple a par la suite été utilisée afin d'évaluer la capacité de ces indicateurs, ou d'une combinaison de ces indicateurs, à prévoir le niveau d'eau maximal du fleuve Saint-Laurent au printemps à chaque station d'observation entre Cornwall et Rimouski. Les détails méthodologiques se trouvent à l'Annexe II.

Les résultats indiquent qu'historiquement, les crues printanières majeures ont eu lieu dans l'une ou l'autre des situations suivantes :

- 1) Précipitations totales, quantités de pluie-sur-neige et quantités de pluie printanière (mars à mai) au-dessus des moyennes.** Plus l'anomalie de pluie-sur-neige est élevée et plus l'année risque de se retrouver dans les records de débit ou de niveau. Pour ce cas-type, les quantités de neige ne semblent pas être un facteur déterminant, tant qu'elles avoisinent les moyennes. Il s'agit ici du contexte vécu en 2017.
- 2) Quantités de neige bien au-dessus des moyennes.** Certaines années ont eu des quantités de pluie-sur-neige et de pluie près ou sous les moyennes, mais ont tout de même atteint des niveaux d'eau élevés. Ces années affichaient toutes des quantités de neige élevées. Bien qu'il n'existe pas encore de rapport officiel à ce sujet, les données de la réanalyse MERRA-2 semblent indiquer qu'il s'agit du contexte vécu en 2019. Il est probable que les températures jouent un rôle prépondérant dans ce type de crue printanière, notamment au niveau du synchronisme de la fonte du couvert de neige dans le bassin versant de la rivière des Outaouais.

Plusieurs facteurs supplémentaires peuvent venir influencer le fleuve Saint-Laurent et compliquer la gestion de la crue printanière :

- **Nombreux redoux suivis de vagues de froid entre Cornwall et Montréal;**
- **Vague de froid intense au mois de mars.**

Ces résultats concordent avec le bilan de l'année 2017 produit par le Conseil international du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (ILOSLRB 2017). L'hiver 2017 a été un hiver marqué par cinq redoux, ce qui constitue un record. Outre la difficulté à former un couvert de glace stable près du barrage Moses-Saunders, ces redoux signifient davantage de pluie et de fonte de la neige sur tout le territoire. Les apports en eau des Grands Lacs vers le lac Ontario en janvier et en février ont d'ailleurs été les 7^e en importance depuis le début de la prise de mesures dans les années 1900.

En date du 1^{er} mars, le fleuve n'avait aucun couvert de glace. Lorsqu'une vague de froid intense a eu lieu à la mi-mars, les débits sortants du lac Ontario ont dû être réduits afin d'empêcher la formation d'un embâcle sur le fleuve, malgré les apports importants en provenance des Grands Lacs. Pendant cette vague de froid, une importante tempête de neige a contribué à un couvert de neige bien au-dessus des moyennes dans la moitié nord du bassin versant de la rivière des Outaouais. Le mois d'avril a laissé des quantités record de pluie, notamment au-dessus du lac Ontario, ainsi que des records de pluie-sur-neige sur presque l'ensemble du territoire. La crue de la rivière des Outaouais a été particulièrement forte en 2017 et est survenue à un moment où le lac Ontario avait déjà un niveau élevé en raison des apports des autres Grands Lacs, de la vague de froid du mois de mars et de la pluie d'avril. Tous ces facteurs combinés ont mené aux inondations de 2017.

Bien qu'aucun rapport officiel n'ait encore été produit pour les inondations de 2019, le contexte semble avoir été bien différent : les quantités de pluie et de pluie-sur-neige sont sous les moyennes, selon la réanalyse MERRA-2. Les anomalies de températures en 2017 et 2019 sont également dans des directions opposées : les mois de mars, d'avril et de mai ont été généralement froids en 2019, tandis qu'ils ont été chauds en 2017 (outre la vague de froid du mois de mars). L'hypothèse, pour l'instant, est que si la crue de 2017 a été le résultat de quantités de pluie et de pluie-sur-neige bien au-dessus des moyennes, les inondations de 2019 ont plutôt été le résultat de quantités de neige élevées combinées à du temps froid qui a retardé la fonte de la neige et provoqué une fonte plus synchronisée.

La Figure 4 illustre les températures de l'hiver 2017 à Massena (près de Cornwall), ainsi que les cinq cycles de gel-dégel survenus pendant cet hiver. Les Figures 5 à 8 illustrent quant à elles les anomalies de précipitations, d'équivalent en eau de la neige, de pluie et de pluie-sur-neige en 2017 et 2019.

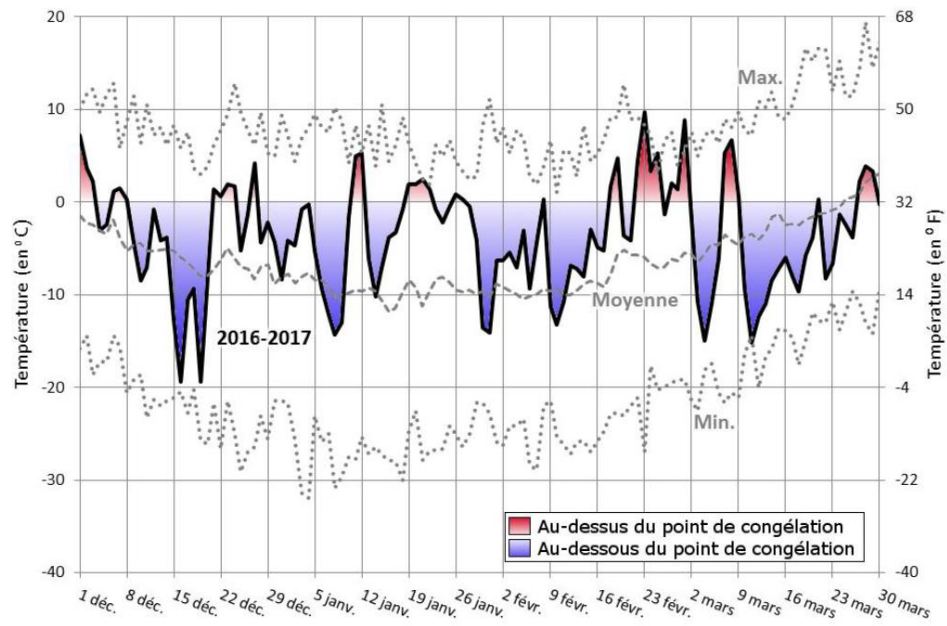


Figure 4. Températures et cycles de gel-dégel à Massena (État de New-York) entre décembre 2016 et mars 2017 (ILOSRLB 2017).

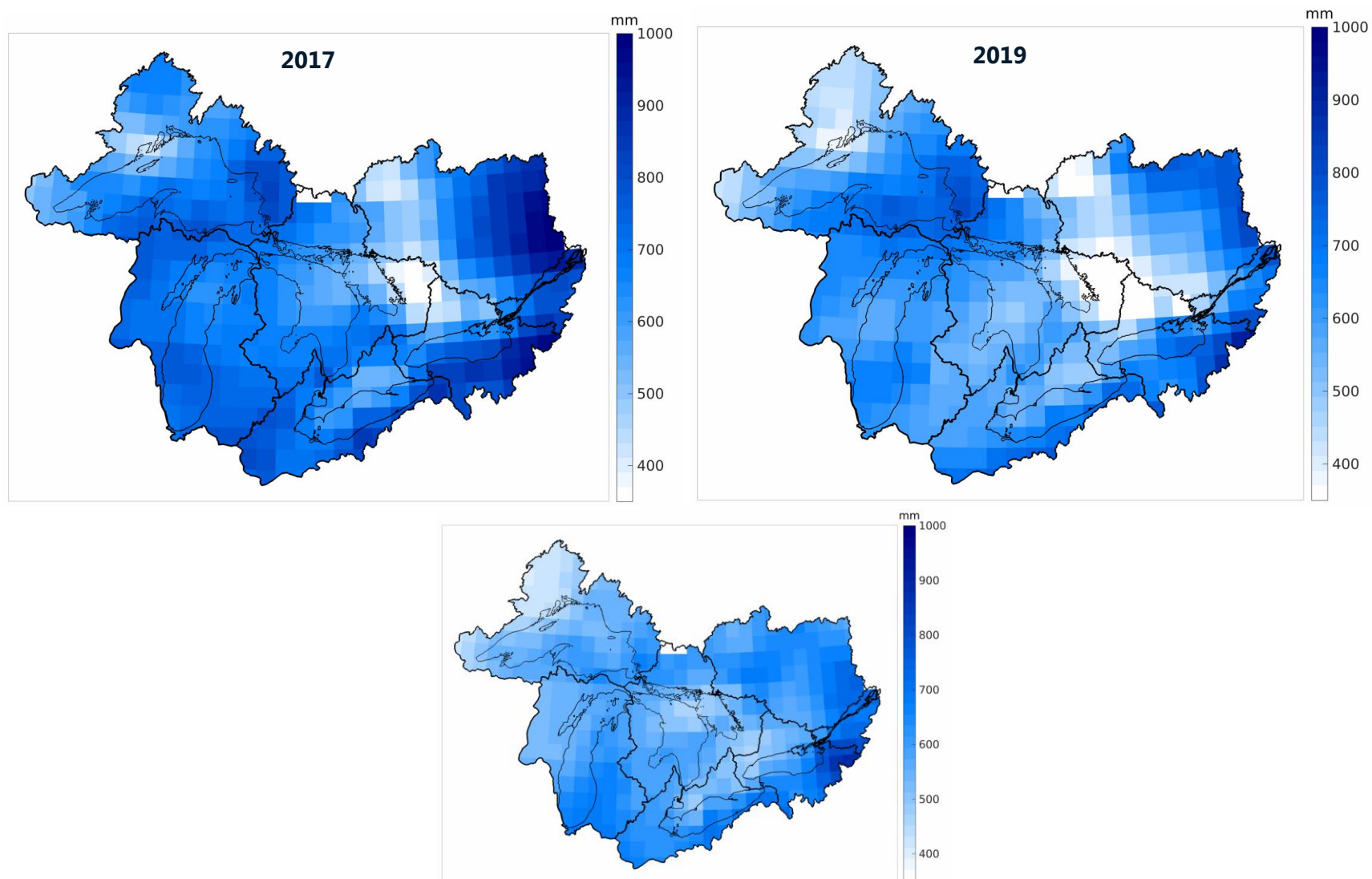


Figure 5. Précipitations totales (mm) entre les mois d'octobre et de mai sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2. Les figures représentent (gauche) l'année 2017, (droite) l'année 2019 et (bas) la moyenne 1980-2010.

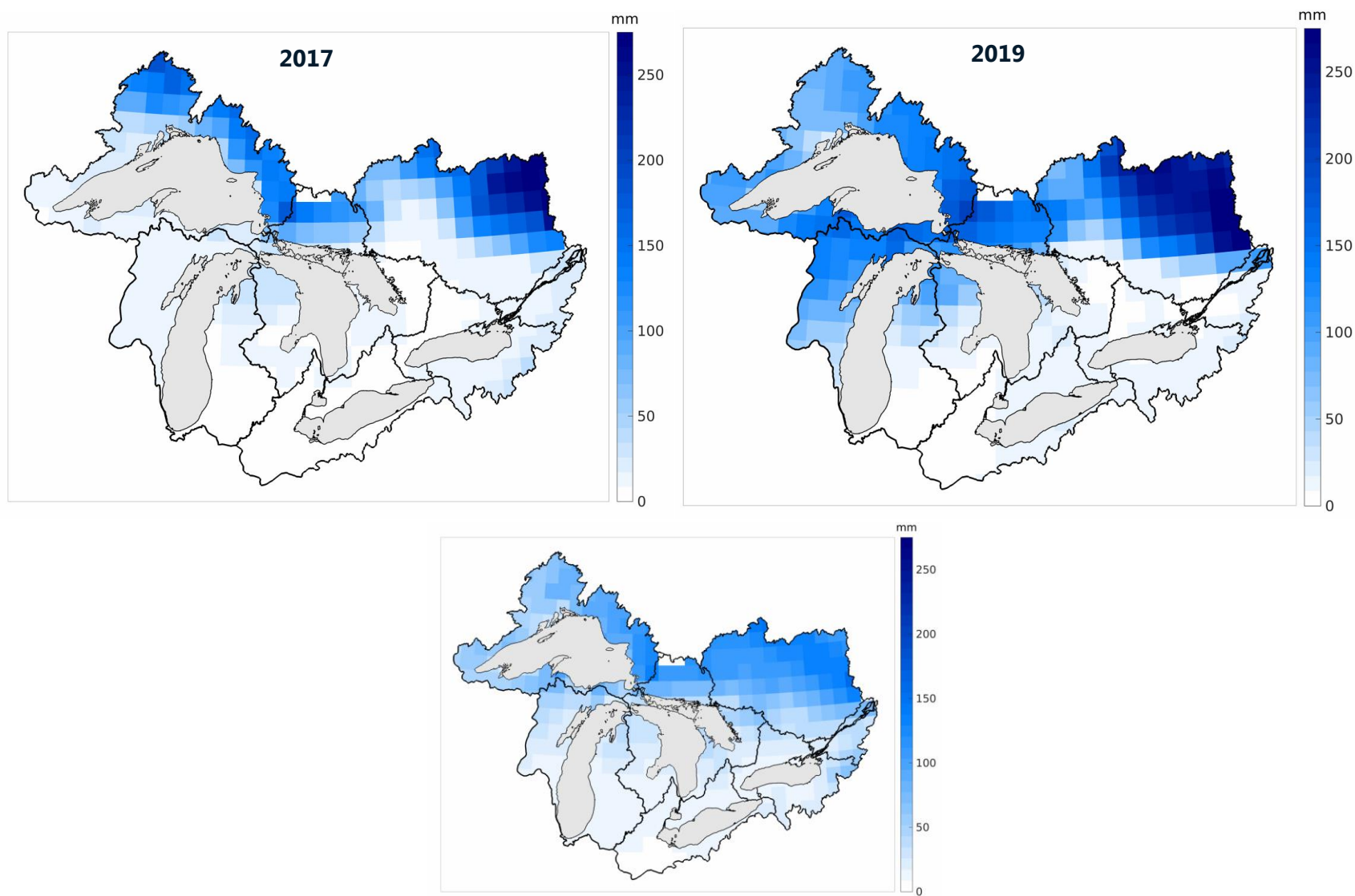


Figure 6. Équivalent en eau de la neige (mm) maximal entre les mois de mars et de juin sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2. Les figures représentent (gauche) l'année 2017, (droite) l'année 2019 et (bas) la moyenne 1980-2010.

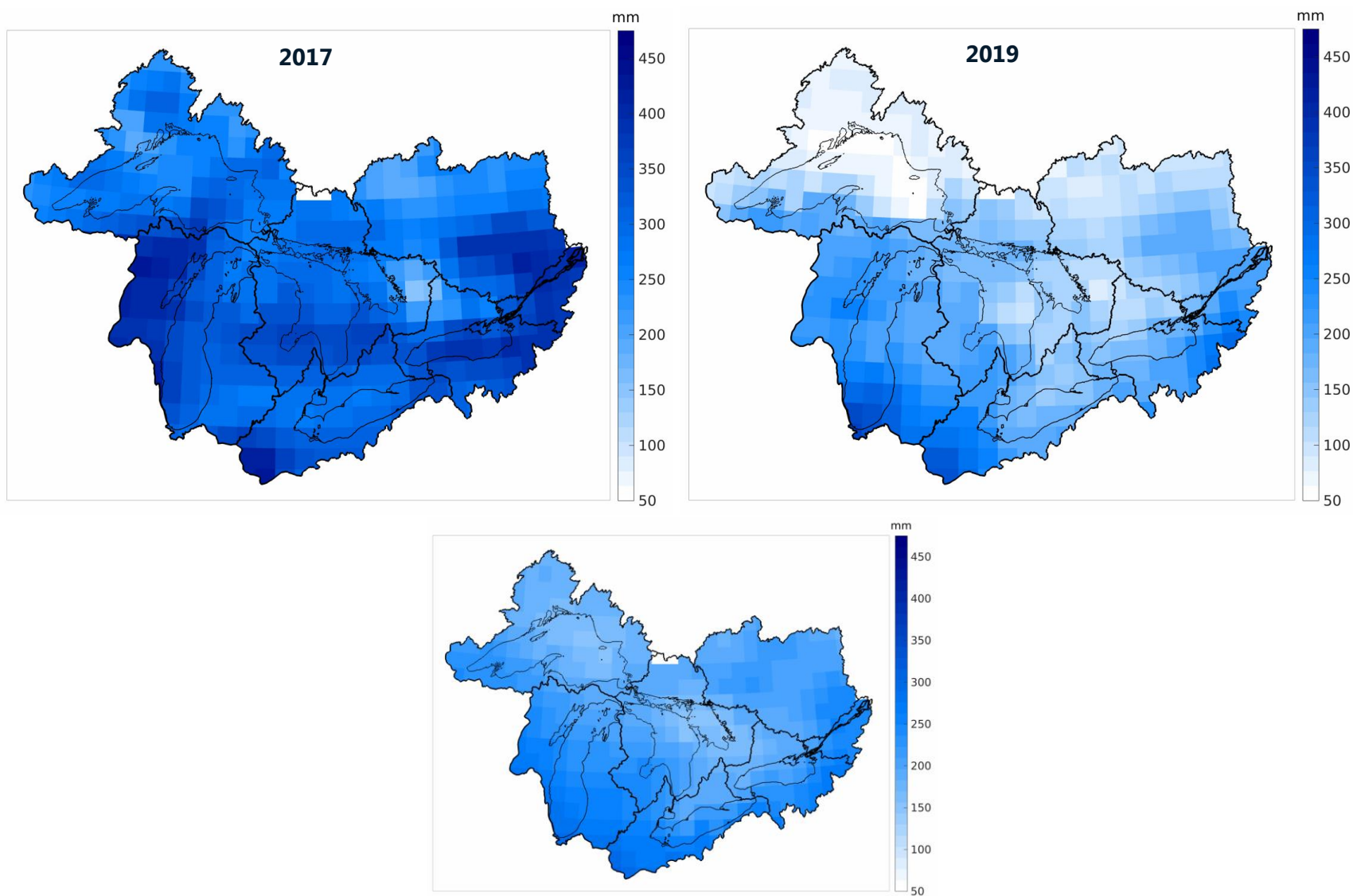


Figure 7. Quantité de pluie (mm) entre les mois d'avril et de juin sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2. Les figures représentent (gauche) l'année 2017, (droite) l'année 2019 et (bas) la moyenne 1980-2010.

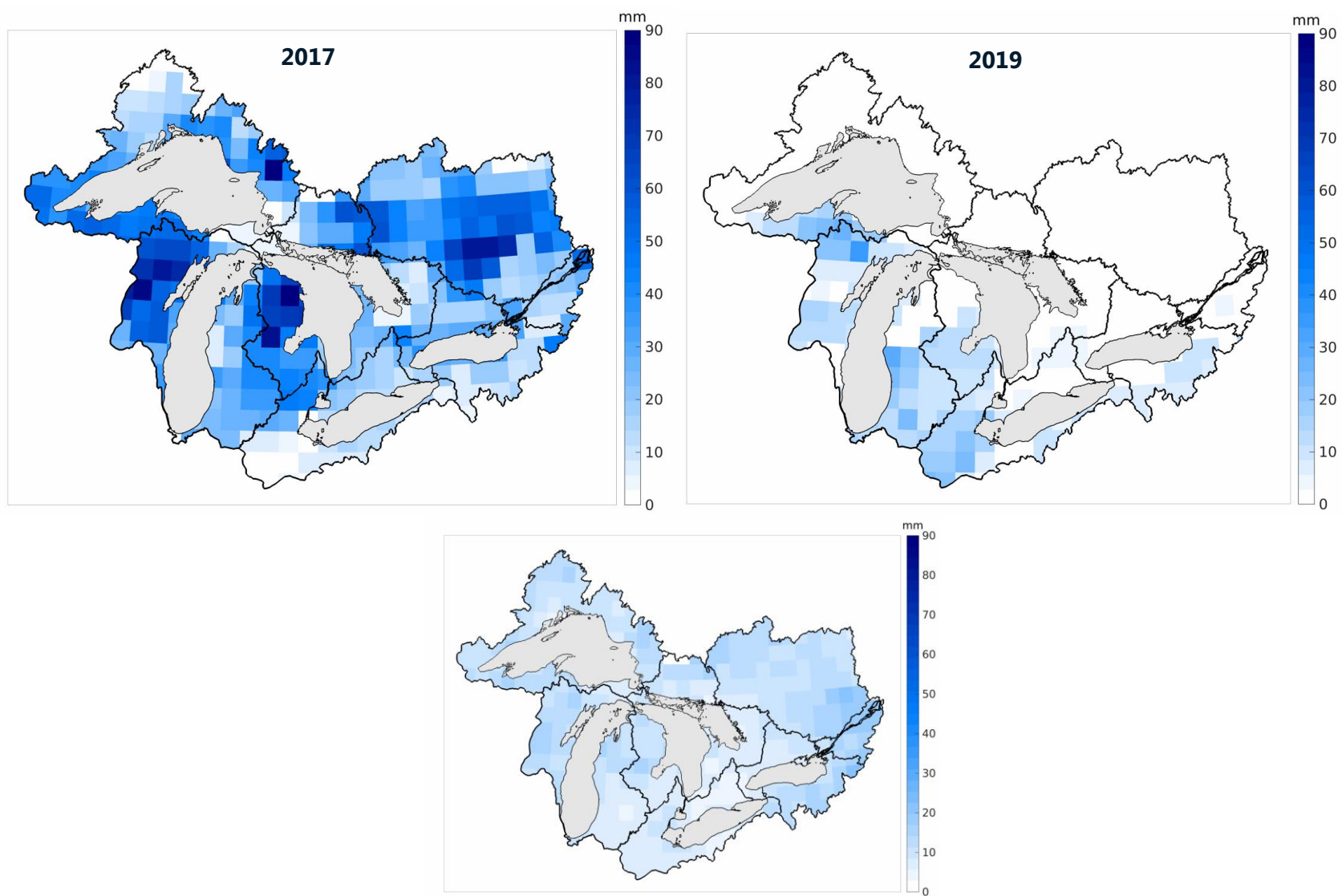


Figure 8. Quantités de pluie-sur-neige (mm) entre les mois de mars et de juin sur le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais, selon la réanalyse MERRA-2. Les figures représentent (gauche) l'année 2017, (droite) l'année 2019 et (bas) la moyenne 1980-2010.

3.2 REHAUSSEMENT MARIN ET TENDANCES DANS LES NIVEAUX D'EAU

Secteurs concernés : TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

L'analyse de la variabilité passée des phénomènes de submersion et de rehaussement marin a été réalisée en analysant les quelques marégraphes situés dans la région de l'estuaire fluvial et de la Ville de Québec. L'objectif principal était d'identifier d'éventuelles tendances dans les données et, si elles existent, de les interpréter et de les documenter.

La Figure 9 présente les tendances de niveaux d'eau calculées pour les marégraphes situés entre Cornwall et l'Île d'Orléans pour la période 1990-2017. Toutes les tendances illustrées sur cette figure sont statistiquement significatives (p -value < 0.05). Les résultats indiquent une baisse des niveaux en amont du lac Saint-Pierre, une faible baisse entre le lac Saint-Pierre et Gentilly, ainsi qu'une hausse à partir de Portneuf.

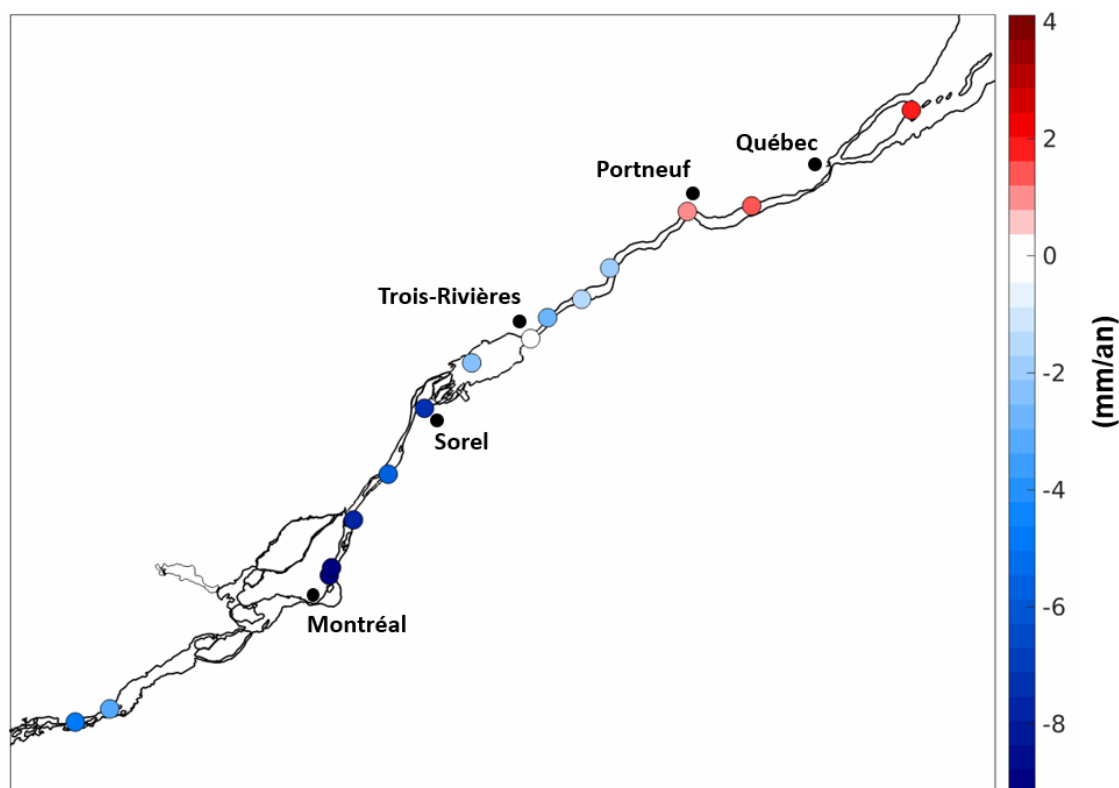


Figure 9. Tendances de niveau statistiquement significatives (p value < 0.05) calculées aux bouées et aux marégraphes de Pêches et Océans Canada entre les années 1990 et 2017.

Dans l'estuaire fluvial et dans la région de Québec, les tendances de niveau calculées aux marégraphes situés dans le fleuve sont causées par trois phénomènes distincts :

- 1) Le rehaussement du niveau de la mer;
- 2) L'ajustement isostatique (mouvement vertical de la croûte terrestre en réponse au retrait des glaciers à la fin de la dernière glaciation);
- 3) Les changements au débit du fleuve Saint-Laurent.

Le rehaussement marin depuis 1993 est estimé être entre 2.8 et 3.2 mm/an (Savard et al. 2016). Cela concorde bien avec les tendances calculées à l'Île d'Orléans, qui sont légèrement plus faibles que 2 mm/an, mais qui sont influencées entre autre par le rehaussement isostatique et les changements de débit du fleuve, discutés ci-dessous. À Neuville et à Portneuf, le rehaussement marin est graduellement compensé par ces autres influences. Tel qu'illustré à la Figure 10, l'ajustement isostatique résulte en un relèvement de la croûte terrestre de l'ordre de +2 mm/année dans la région de l'estuaire fluvial.

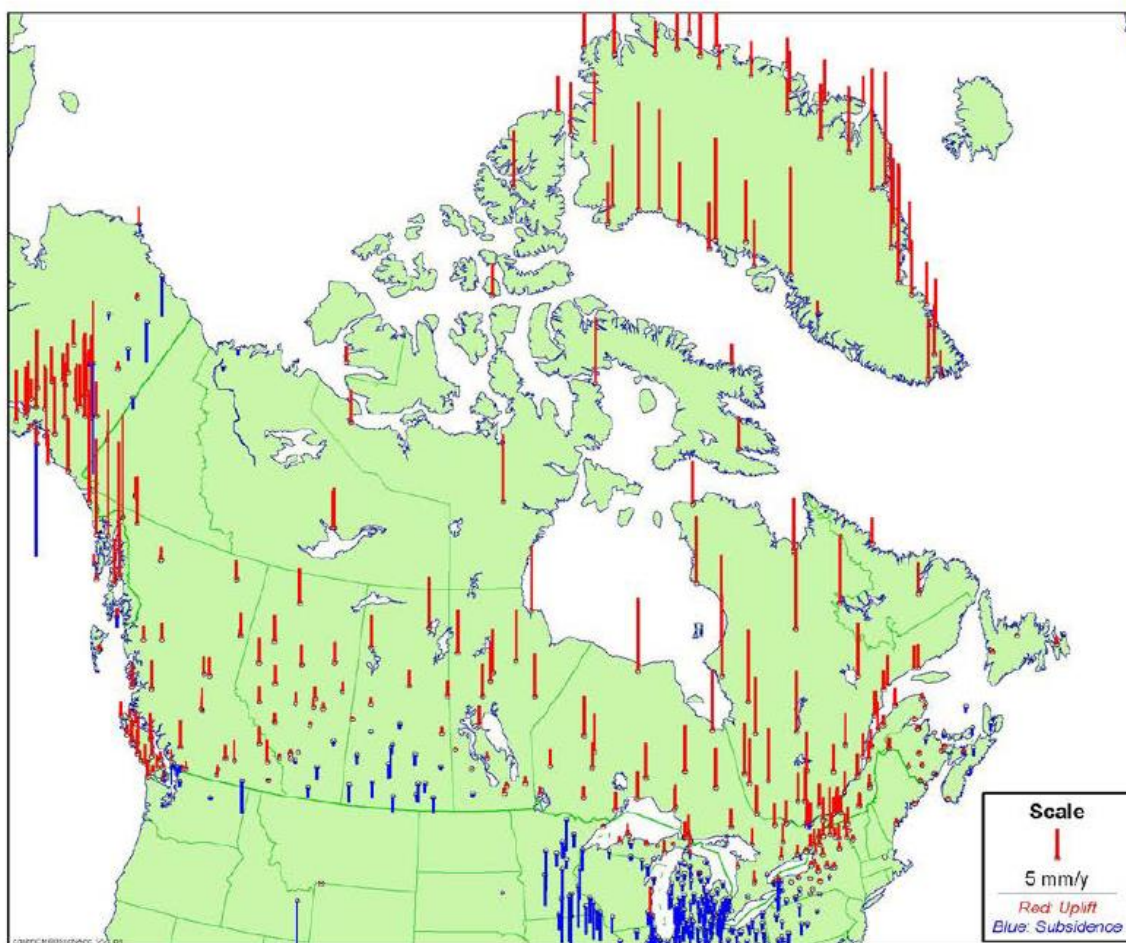


Figure 10. Mouvements verticaux actuels, tel que calculés à partir de données GPS (James et al. 2014)

L'ajustement isostatique à lui seul n'explique toutefois pas les fortes tendances négatives observées en amont du lac Saint-Pierre. Celles-ci pourraient plutôt causées par la diminution des débits du fleuve Saint-Laurent. Tel qu'illustré à la Figure 11, le débit moyen du fleuve à la station La Salle (Montréal) a baissé d'environ 500 m³/s depuis les années 1990. Or, en établissant une relation entre le niveau et le débit à cette station (Figure 12), une diminution de 500 m³/s correspond environ à une baisse du niveau moyen de 15 à 20 cm, ce qui est d'un ordre de grandeur similaire aux tendances illustrées à la Figure 9.

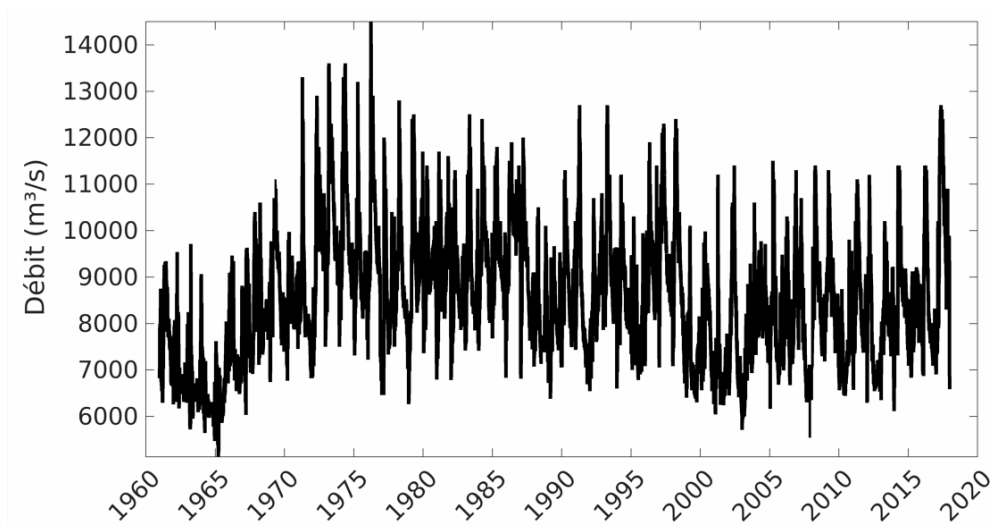


Figure 11. Débits du fleuve Saint-Laurent mesurés à la station de La Salle entre 1961 et 2017.

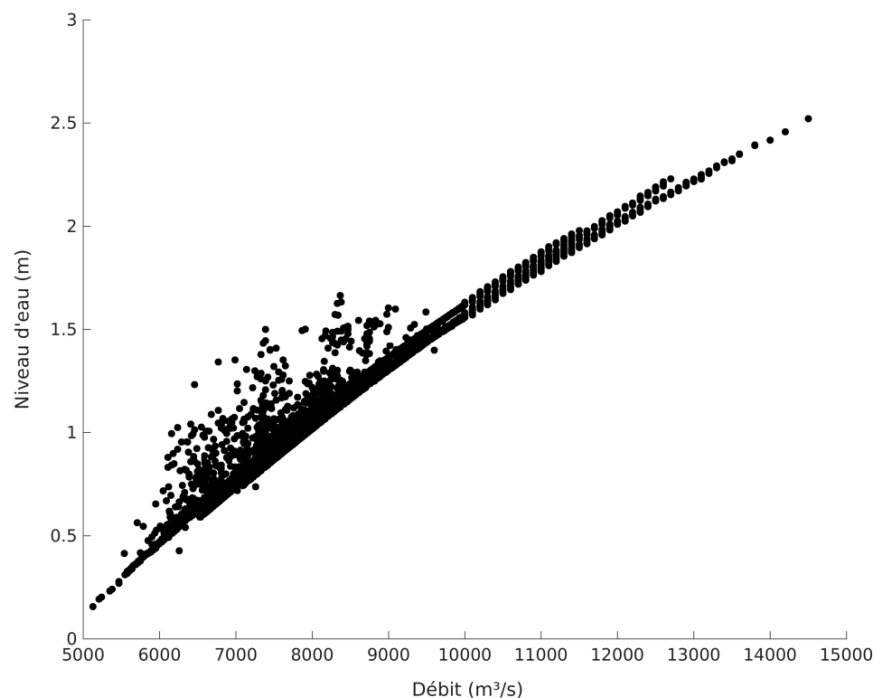


Figure 12. Comparaison des débits et des niveaux d'eau mesurés à la station de La Salle entre 1961 et 2017.

3.3 SUBMERSION

Secteurs concernés : TCRQC

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

Les inondations par submersion sont principalement observées à l'Île d'Orléans et dans la région de Québec (Morneau et al. 2014; Lemmen et al. 2016; Bourduas-Crouhen et al. 2017). Les secteurs de la Place Royale et de la rue Dalhousie, à Québec, sont inondés presque à chaque année. Plusieurs secteurs du bas de Lévis, qui sont endigués, présentent eux aussi des risques importants d'inondation. Finalement, plusieurs municipalités de l'Île d'Orléans subissent des épisodes de submersion sévères lors de certaines tempêtes automnales.

Ces inondations surviennent lorsque d'importantes dépressions atmosphériques passent par le Québec. Deux phénomènes distincts ont lieu. Premièrement, les dépressions ont pour effet de développer des vents soutenus, souvent pendant de longues périodes, qui ont pour effet de « pousser » les masses d'eau vers les berges. Deuxièmement, la pression atmosphérique au centre de la dépression est plus faible qu'en périphérie, ce qui provoque une hausse localisée du niveau d'eau. Les pires inondations se produisent généralement lorsque ces effets sont combinés avec une marée haute.

Bien que les changements climatiques puissent affecter l'intensité et les trajectoires des dépressions, tel qu'il l'est discuté à la Section 4.3, un impact bien plus direct concerne la diminution du couvert de glace sur les berges. En effet, depuis 1998, l'étendue de glace de berge sur la Côte Est canadienne (provinces maritimes et golfe du Saint-Laurent à partir de Québec) a décru de 1.53 % par année. Or, en autant que le couvert de glace soit d'une épaisseur et d'une étendue adéquate, la glace de berge joue un rôle de protection contre les grandes tempêtes en atténuant l'onde de marée et les vagues avant qu'elles ne frappent les berges (Morneau et al. 2014; Savard et al. 2016). Si ces conditions ne sont pas remplies, la glace de berge peut au contraire exacerber la force des vagues et l'érosion des berges en agissant comme une structure rigide qui réfléchit les vagues (Bernatchez and Dubois 2004).

Les tempêtes actuelles et futures peuvent donc avoir un impact plus grand sur la berge, pour une même force. Le rehaussement marin déjà observé peut également constituer un autre facteur aggravant, puisque le niveau moyen des océans est plus élevé. Les mesures de protection mises en place par le passé (murets, enrochement), par exemple, risquent d'être moins efficaces dans le futur si elles ne sont pas réévaluées pour prendre en compte le rehaussement marin.

La Figure 13 illustre le niveau maximal atteint chaque année à Saint-François-de-l'Île-d'Orléans. Depuis 1990, cette tendance est de 1.15 cm/année (p -value = 0.04), mais la variabilité

interannuelle est élevée. La pointe illustrée en 2017 correspond à une tempête survenue à la mi-mars, où des vents de 126 km/h ont été enregistrés à Saint-François-de-l'Île-d'Orléans (MELCC 2017).

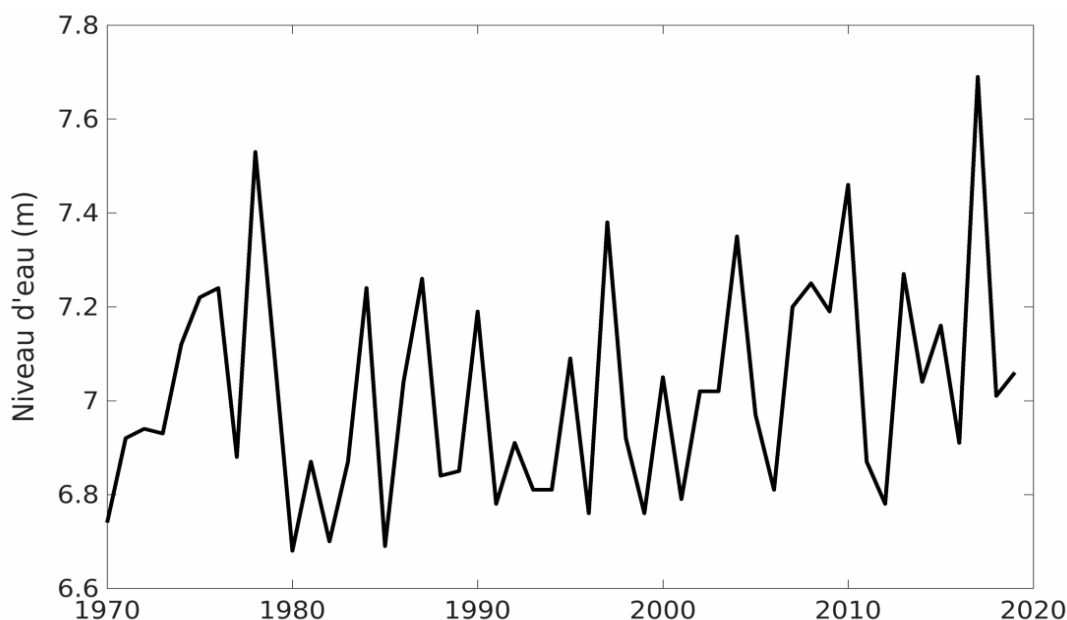


Figure 13. Niveau d'eau maximal atteint chaque année au marégraphe de Saint-François-de-l'Île-d'Orléans, entre 1970 et 2019.

3.4 AUTRES FACTEURS HYDROCLIMATIQUES

Certains phénomènes identifiés comme des facteurs hydroclimatiques pouvant influencer les processus d'inondation ou d'érosion sont trop complexes ou trop peu documentés pour pouvoir faire l'objet d'une analyse détaillée de leur variabilité passée. Ils sont présentés brièvement ci-dessous afin de décrire les obstacles à leur inclusion dans ce rapport. Dans certains cas, des pistes de projets de recherche sont énumérées dans la conclusion de ce rapport.

3.4.1 FORMATION D'EMBÂCLES

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

Il existe deux moments dans l'année propices aux phénomènes d'embâcles de glace, soient au début de la période de gel, avant que la nappe de glace ne soit fermement consolidée, et lors des crues, en raison de la hausse du niveau d'eau.

À la hauteur de Montréal, le couvert de glace est une combinaison de grandes quantités de frasil produites dans les rapides Lachine et de minces couches de glace formées sur les berges et détachées par les vagues. Ces morceaux de glace sont emportés vers le lac Saint-Pierre et s'accumulent à la sortie du lac en raison de courants plus faibles. Des inondations mineures peuvent être causées par ces premières accumulations de glace.

En hiver, le chenal maritime constitue une faiblesse dans le couvert de glace, qui peut favoriser la création d'embâcles. Notamment, il a été observé que sous l'action de vents soutenus soufflant du sud, du sud-ouest ou du sud-est, des blocs de glace peuvent se détacher et former des embâcles majeurs à la sortie du lac Saint-Pierre (Bastien 1976). Ce phénomène est pire lorsqu'il est accompagné de températures très froides qui favorisent la formation de nouvelle glace dans les sections à l'eau libre. Des vents soufflant vers l'est rendent également plus difficile le travail de déglacage, puisqu'ils poussent les masses de glace vers l'aval.

Lors de redoux et au printemps, le couvert de glace se rompt sous l'effet des températures plus douces, des précipitations liquides et de la hausse des niveaux d'eau. Une quantité importante de blocs de glace se déplacent alors dans le fleuve. Le principal goulot d'étranglement identifié comme étant propice à la formation d'embâcles est la sortie du lac Saint-Pierre, tel que décrit précédemment. D'autres sections du fleuve ont été identifiées comme posant parfois problème, soit les rivières des Mille Îles et des Prairies. La région de Cap-Rouge, en amont de Québec, est également sujette à la formation d'embâcles lorsque la marée haute refoule les glaces. Dans tous les cas, ces zones d'embâcle peuvent provoquer des inondations importantes.

Toutefois, la Garde côtière brise les embâcles avant qu'ils n'obstruent la voie maritime (Garde côtière du Canada 2013). Pour ces raisons, et en raison du peu de documentation historique de ce phénomène, aucune analyse poussée de la variabilité passée n'a été effectuée sur ce sujet.

3.4.2 FORMATION DE FRASIL

Secteurs concernés : TCRHSL

Phénomènes concernés : Inondations

La présence ou non de frasil dépend non seulement de la température de l'air, mais également de la température de l'eau, de la couverture nuageuse, de l'hydrogéomorphologie de la rivière et de la présence ou non d'un couvert de glace (Daly 1991; Morse and Quach 2002). Une étude spécifique aux sites propices à la production de frasil serait nécessaire pour bien analyser ce phénomène et sa variabilité passée, ce qui dépasse le mandat de l'étude.

3.4.3 ÉROSION PAR LES VAGUES ET LES MARÉES

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP

Phénomènes concernés : Érosion

Par endroits, le fleuve Saint-Laurent peut atteindre plus de 10 km de largeur. Sur ces tronçons, les vents peuvent soulever des vagues dont le sapement est susceptible d'altérer les berges. Ces vagues, qu'elles soient naturelles ou causées par le batillage des navires, peuvent provoquer une érosion par la force mécanique qu'elles appliquent sur les berges. Toutefois, l'action érosive des vagues dépend fortement du niveau d'eau et de la pente du terrain. En effet, la force érosive est à un maximum lorsque la vague frappe la section la plus escarpée de la berge (Dauphin and Lehoux 2004). Le moment de l'année et les conditions météorologiques sont également importantes, puisque la présence de végétation sur une berge peut aider à la stabiliser (Bernatchez and Dubois 2004).

Malheureusement, cela complique l'analyse de cet aléa. Les seuils de hauteur d'eau où une vague aura sa force érosive maximale ne sont pas encore bien connus le long du fleuve Saint-Laurent. La seule documentation trouvée sur ce sujet a maintenant près de 15 ans et ne couvre pas l'ensemble du fleuve (Dauphin and Lehoux 2004). On y note, par exemple, que l'érosion est maximale dans l'archipel de Berthier-Sorel lorsque les niveaux d'eau se situent entre 5 et 6.5 mètres.

Sans ces seuils, et considérant l'absence d'observations détaillées de l'érosion des berges, une analyse des vents passés ne serait pas d'une grande utilité pour comprendre la dynamique d'érosion des berges. Pour ces raisons, aucune analyse détaillée n'a été effectuée sur le passé récent.

3.4.4 ÉROSION PAR GEL-DÉGEL

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Érosion

La formation de lentilles de glace dans le sol sous l'effet du gel réduit la cohésion interne des sols lors du dégel et contribue à l'affaissement des falaises, aux risques de liquéfaction et de coulées boueuses et, généralement, à la mobilisation de sédiments pouvant être transportés par le courant (Bernatchez and Dubois 2004; Plan Saint-Laurent 2010; Morneau et al. 2014). Certains seuils de température ont pu être identifiés dans la littérature. Par exemple, en hiver, l'argile sur les falaises orientées vers le sud peut dégeler lors des journées ensoleillées où la température dépasse -23°C

(Bernatchez and Dubois 2004). Toutefois, il n'existe pas de jeux de données d'observation de l'érosion par gel-dégel qui permettraient d'effectuer une analyse détaillée de la variabilité passée.

Pour ces raisons, l'impact des changements climatiques sur certains seuils de température sera analysé, mais aucune analyse n'a pu être réalisée sur la variabilité passée.

3.4.5 ÉROSION PAR DESSICCATION DE L'ARGILE

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Érosion

Lors des longs épisodes de faibles débits, l'argile marine exposée à l'air s'assèche à la surface (phénomène de dessiccation de l'argile), ce qui crée à la fois des fentes de retrait majeures et une microfissuration à la surface. Lorsque les niveaux d'eau remontent, ces fissures favorisent la défloculation de l'argile et provoquent une érosion disproportionnée par rapport aux débits (Bernatchez and Dubois 2004; Plan Saint-Laurent 2010; Morneau et al. 2014).

Il a été observé que la période à laquelle les épisodes de faibles débits surviennent peut avoir un impact significatif sur la vulnérabilité aux phénomènes d'érosion. En effet, la vulnérabilité à l'érosion par dessiccation de l'argile dépend en grande partie de la capacité de la berge nouvellement exposée à se végétaliser, ainsi qu'à la densité et à la profondeur du système racinaire (Plan Saint-Laurent 2010).

Une analyse des niveaux d'eau du fleuve entre 1990 et 2017 a permis de confirmer que certaines années ont des niveaux d'eau qui fluctuent plus souvent que d'autres. Toutefois, pour l'instant, aucune corrélation forte n'a pu être déterminée entre les conditions météorologiques et ces fluctuations. Une hypothèse est que ces fortes variations de niveau d'eau sont causées par la gestion des réservoirs des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais et que, par conséquent, il est difficile d'établir un lien direct entre le climat et cet aléa.

3.4.6 ÉROSION PAR RUISSELLEMENT DE SURFACE

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Érosion

Les pluies intenses peuvent causer de l'érosion par ruissellement de surface. Il n'existe toutefois pas de base de données ou de seuil permettant de faire un lien direct entre l'intensité d'un épisode de pluie, l'intensité et la vitesse du ruissellement de surface et son potentiel érosif.

4 IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

4.1 CRUES PRINTANIÈRES

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

4.1.1 QUANTITÉS D'EAU

Les inondations du fleuve Saint-Laurent surviennent principalement en raison de quantités d'eau extrêmes (pluie, neige, pluie-sur-neige et apports des Grands Lacs), combinées à d'autres situations météorologiques défavorables (ILOSLRB 2017; GLAM 2018).

L'impact des changements climatiques sur les précipitations, sur l'équivalent en eau maximal de la neige (ÉEN), sur la pluie hivernale et printanière et sur la pluie-sur-neige (pluie lorsque l'ÉEN est au-dessus de 2 cm) ont été calculées pour les bassins versants de la rivière des Outaouais et du lac Ontario. Les résultats sont présentés sous la forme de deux tableaux : le Tableau 3 présente les tendances moyennes, tandis que le Tableau 4 présente les tendances spécifiques aux valeurs extrêmes (95^e centile de la distribution). En raison de la résolution spatiale grossière des modèles CMIP5, seules les simulations NA-CORDEX sont utilisées pour l'indicateur de pluie-sur-neige. Par rapport aux chiffres présentés dans le tableau pour cet indicateur, les changements dans CMIP5 sont similaires, mais avec un changement maximal de l'ordre de +30 à +35 %, voire +40 à +50 % pour les années extrêmes, pour toutes les périodes.

Tableau 3. Tendances médianes (et incertitude) pour les quantités d'eau de la crue printanière

Moyenne 1981-2010	2041-2070		2071-2100	
MERRA-2	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Précipitations entre octobre et mai				
635.1 mm	+9.1 % (+6.1 à +17.2 %)	+15.9 % (+10.4 à +22.5 %)	+12.6 % (+8.3 à +20.1 %)	+24.4 % (+16.8 à 32.1 %)
Équivalent en eau de la neige maximal				
75.2 mm	-19.4 % (-38.9 à -5.2 %)	-24.2 % (-44.1 à -13.1 %)	-23.9 % (-43.7 à -5.6 %)	-44.7 % (-68.5 à -36.3 %)
Pluie entre janvier et mai				
143.6 mm	+16.9 % (+9.5 à +36.4 %)	+35.3 % (+21.9 à +51.9 %)	+28.8 % (+16.1 à +43.5 %)	+59.5 % (+42.3 à +89.6 %)
Pluie-sur-neige				
12.0 mm	-11.2 % (-16.9 à +9.7 %)	-2.3 % (-6.4 à +8.4 %)	-10.0 % (-22.2 à -1.5 %)	-9.5 % (-34.0 à +11.0 %)

Tableau 4. Tendances médianes (et incertitude) pour les quantités d'eau de la crue printanière pour les années extrêmes

Moyenne 1981-2010	2041-2070		2071-2100	
MERRA-2	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Précipitations entre octobre et mai				
822.6 mm	+10.4 % (+3.5 à +18.1 %)	+15.3 % (+6.8 à +25.3 %)	+13.1 % (+6.9 à +20.5 %)	+22.9 % (+12.2 à +33.3 %)
Équivalent en eau de la neige maximal				
152.8 mm	-13.6 % (-34.8 à +6.9 %)	-21.5 % (-39 à +7.5 %)	-18.8 % (-37.8 à +15.7 %)	-40.1 % (-60.8 à -23.1 %)
Pluie entre janvier et mai				
226.2 mm	+22.5 % (+9.2 à +36.2 %)	+34.7 % (+19 à +50.1 %)	+27.8 % (+10.3 à +42.1 %)	+56.0 % (+37.0 à +74.7 %)
Pluie-sur-neige				
39.8 mm	-7.3 % (-11.7 à +13.6 %)	+3.9 % (+0.6 à +16.2 %)	-15.5 % (-19.1 à +2.0 %)	-2.3 % (-28.1 à +15.3 %)

Dans les tableaux, le chiffre en gras indique le changement médian, tandis que les chiffres entre parenthèses indiquent le minimum et le maximum de la distribution des simulations climatiques. Les projections climatiques indiquent une augmentation significative des quantités de précipitation totales (solides et liquides) entre octobre et mai, avec une augmentation plus marquée pour le RCP8.5 par rapport au RCP4.5. Or, ces précipitations risquent de tomber davantage sous la forme de pluie. Dans le cas le plus extrême, soit le RCP8.5 pour la période 2071-2100, les simulations climatiques pointent vers une diminution de près de 45 % de l'équivalent en eau maximal, contrebalancée par une hausse de 60 % des quantités de pluie. Pour le RCP4.5, certaines années pourraient toutefois voir des quantités de neige similaires à nos extrêmes actuels, voire supérieures (Tableau 4). Combiné à une augmentation des précipitations et à une augmentation des quantités de pluie hivernale et printanière, ces années extrêmes pourraient représenter un défi de gestion du lac Ontario et de la rivière des Outaouais. Pour le RCP8.5, toutefois, la forte hausse des températures signifie qu'à la fin du 21^e siècle, même lors des années les plus extrêmes, les quantités de neige au sol seront plus faibles qu'aujourd'hui.

Même si un faible nombre de simulations affichent des tendances à la hausse, les quantités de pluie-sur-neige présentent une faible diminution. Cette incertitude reflète la sensibilité de cette variable face à deux facteurs évoluant dans des directions opposées, soient la diminution de la période pendant laquelle il y a de la neige au sol et l'augmentation des quantités de pluie.

4.1.2 APPORTS EN PROVENANCE DES GRANDS LACS

Des études récentes prévoient que les apports annuels des Grands Lacs changeront peu, mais que le cycle saisonnier pourrait être accentué. Cela signifierait plus d'eau en hiver et au printemps, et moins en été et en automne (Music et al. 2015; Music et al. 2018). Toutefois, les apports maximaux futurs des Grands Lacs seraient plutôt à la baisse (Music et al. 2015). Selon une des simulations testées dans cette étude, les apports ayant une période de retour actuelle de 10 ans auraient plutôt une période de retour de 50 ans pour la période 2041-2070, par exemple.

4.1.3 NOMBRE DE REDOUX

Les cinq redoux subis pendant l'hiver 2017 dans la section du fleuve Saint-Laurent près de Cornwall ont compliqué la gestion du lac Ontario entre janvier et mars et, ultimement, ont contribué aux inondations de 2017 (ILOSLRB 2017). Il est probable que ce temps doux ait également contribué aux apports élevés des Grands Lacs, en raison de la fonte hâtive de la neige lors des redoux et d'une proportion plus importante de pluie parmi les précipitations hivernales.

En utilisant les informations contenues dans le rapport de l'ILOSLRB (2017) et les données MERRA-2, une relation entre les températures à Cornwall et le nombre de cycles de gel-dégel de la glace du fleuve Saint-Laurent dans cette région a été construite, puis évaluée en situation de changements climatiques avec les simulations de CMIP5 et NA-CORDEX.

Pour la période 2041-2070, malgré les températures plus élevées en hiver, le nombre de redoux change peu, avec en moyenne 3 à 4 redoux par hiver. Certaines années pourraient voir de 5 à 7 redoux, ce qui dépasse légèrement les records actuels. Pour la période 2071-2100, les projections sont les mêmes dans le cas du RCP4.5. Pour le RCP8.5, toutefois, on observe plutôt une diminution de la limite inférieure du nombre de redoux, avec 2 à 4 redoux par hiver en moyenne et 4 à 7 redoux pour les années les plus extrêmes. Cette diminution s'explique principalement par la durée plus courte de la saison froide dans le futur.

4.1.4 VAGUES DE FROID INTENSES APRÈS LE 1^{ER} MARS

En 2017, ainsi que plusieurs autres années où les niveaux d'eau du fleuve ont été élevés, une vague de froid intense a touché la région de Cornwall après le 1^{er} mars. Ceci a eu deux impacts sur la crue printanière. Premièrement, en vertu du Plan 2014, le débit maximal dans le fleuve Saint-

Laurent pendant ces périodes froides ne peut pas être supérieur à 6230 m³/s s'il n'y a aucun couvert de glace sur le fleuve, afin de réduire le potentiel de formation d'embâcles de glace. Accompagnée d'apports en eau au-dessus des normales, comme ce fut le cas en 2017, cette vague de froid implique que le barrage Moses-Saunders ne peut potentiellement pas évacuer autant d'eau qu'il le serait nécessaire (ILOSLRB 2017). Pour fins de comparaison, des débits situés entre 8000 et 9000 m³/s avaient été atteints en mars 1973 et 1993, deux autres années de fortes crues printanières. Le deuxième impact se situe plutôt au niveau du régime de fonte du bassin versant de la rivière des Outaouais. Une vague de froid intense, comme en 2017, peut retarder la fonte de la moitié sud du bassin versant et provoquer une fonte simultanée de l'ensemble du bassin versant en avril, ce qui a pour effet d'augmenter le pic et le volume de crue.

Trois indicateurs ont été calculés afin d'évaluer les vagues de froid futures, soient : le nombre de jours (en moyenne) en mars où une moyenne mobile sur 3 jours atteint -10°C, le nombre de jours (95^e centile) en mars où une moyenne mobile sur 3 jours atteint -10°C et la récurrence d'une vague de froid en mars qui cumulerait au moins 20°C-jours de gel. Ce dernier indicateur est représentatif de la vague de froid de mars 2017, qui était particulièrement intense. Les résultats sont indiqués au Tableau 5.

Tableau 5. Indicateurs de vague de froid dans la région de Cornwall

Moyenne 1981-2010	2041-2070		2071-2100	
MERRA-2	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Nombre de jours en moyenne en mars où une moyenne mobile sur 3 jours atteint -10°C				
3	-57.0 % (-85.7 à -14.5 %)	-73.4 % (-90.2 à -50.2 %)	-68.3 % (-87.9 à -45.5 %)	-93.8 % (-99.7 à -84.2 %)
Nombre de jours en mars où une moyenne mobile sur 3 jours atteint -10°C : 95^e centile de la distribution				
10	-46.8 % (-68.2 à -8.9 %)	-55.4 % (-81.4 à +6.8 %)	-54.9 % (-85.7 à -10.9 %)	-86.0 % (-100 à -45.2 %)
Probabilités qu'une vague de froid en mars cumule -20°C-jours de gel				
0.08 (1 aux 12.5 ans)	-80.6 % (-100 à -17.8 %)	-96.0 % (-100 à -43.0 %)	-90.3 % (-100 à -51.2 %)	-100 % (-100 à -84.3 %)

Dans le tableau, le chiffre en gras indique le changement médian, tandis que les chiffres entre parenthèses indiquent le minimum et le maximum de la distribution des simulations climatiques. Pour tous les indicateurs, les tendances sont claires : ces vagues de froid, déjà rares en climat actuel, deviendront de plus en plus des événements exceptionnels. Pour l'indicateur le plus difficile à atteindre, soit une vague de froid qui cumule 20°C-jours de gel, la probabilité devient pratiquement nulle dès le milieu du siècle et ce, peu importe le scénario d'émissions de gaz à effet de serre.

4.1.5 IMPACT SUR LES CRUES PRINTANIÈRES

En 2017 et en 2019, l'enjeu principal n'a pas été la quantité extrême d'apports, l'absence de glace sur le fleuve Saint-Laurent ou la vague de froid intense du mois de mars, mais plutôt une séquence d'événements exceptionnels qui ont compliqué la gestion des débits et des niveaux d'eau dans le lac Ontario et dans le fleuve Saint-Laurent. Cette combinaison d'éléments météorologiques et anthropiques complexifie l'analyse de l'impact des changements climatiques sur les crues futures et signifie qu'en absence d'une modélisation explicite du fleuve Saint-Laurent, seules quelques hypothèses peuvent être formulées.

Les quantités d'eau en hiver et au printemps devraient augmenter sur tout le territoire des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais. Toutefois, en raison de la hausse des températures, ces

précipitations tomberont davantage sous la forme de pluie plutôt que de neige. Bien qu'il soit difficile d'émettre une hypothèse quant à l'impact concret de ce changement, la transition d'un système dominé par la neige vers un système où la neige, la pluie et la pluie-sur-neige se combinent risque de modifier le régime de crue dans le bassin versant des Grands Lacs et de la rivière des Outaouais. Pour les rivières du Québec, par exemple, cette transition vers un hiver plus chaud et pluvieux signifie des pointes et des volumes de crue plus faibles au sud du Québec, mais plus élevées au nord (DEH 2018). Comme le fleuve Saint-Laurent est un système vaste et complexe, une étude hydrologique, voire hydrodynamique, serait nécessaire pour connaître l'impact exact de ces divers effets antagoniques sur les niveaux d'eau dans le fleuve.

4.2 REHAUSSEMENT MARIN

Secteurs concernés : TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

Peu d'études ont exploré l'effet du rehaussement marin sur les niveaux d'eau dans l'estuaire fluvial du Saint-Laurent. Une des seules études, produite par la commission géologique du Canada (Ressources naturelles Canada), indique une hausse probable à Québec, en 2100, de l'ordre de 0 à 50 cm pour le RCP4.5 et de 20 à 60 cm pour le RCP8.5. Les résultats de cette étude sont illustrés aux Figures 14 et 15 (James et al. 2014). Ces chiffres résultent de la combinaison de la fonte des glaciers continentaux, de l'expansion thermique des océans causée par la hausse des températures et de l'ajustement isostatique de la croûte terrestre. Ils ne prennent donc pas en compte les changements éventuels sur les débits du fleuve Saint-Laurent, qui pourraient avoir une influence saisonnière sur les niveaux d'eau. Pour fins de comparaison, le GIEC prévoit une hausse mondiale maximale de l'ordre de 1 m d'ici la fin du siècle pour le RCP8.5 (Cazenave et al. 2013).

Ces projections comportent toutefois une grande part d'incertitude liée au rythme de fonte des glaciers de l'Antarctique. Sur la base de plusieurs autres études, James et al. (2014) estime par exemple qu'un effondrement partiel de la calotte polaire Ouest-Antarctique représenterait à lui seul une hausse d'environ 65 cm du niveau des océans. Toutefois, avec le niveau de connaissances actuelles, il n'est pas possible d'estimer à quel moment cette calotte glaciaire risque de s'effondrer.

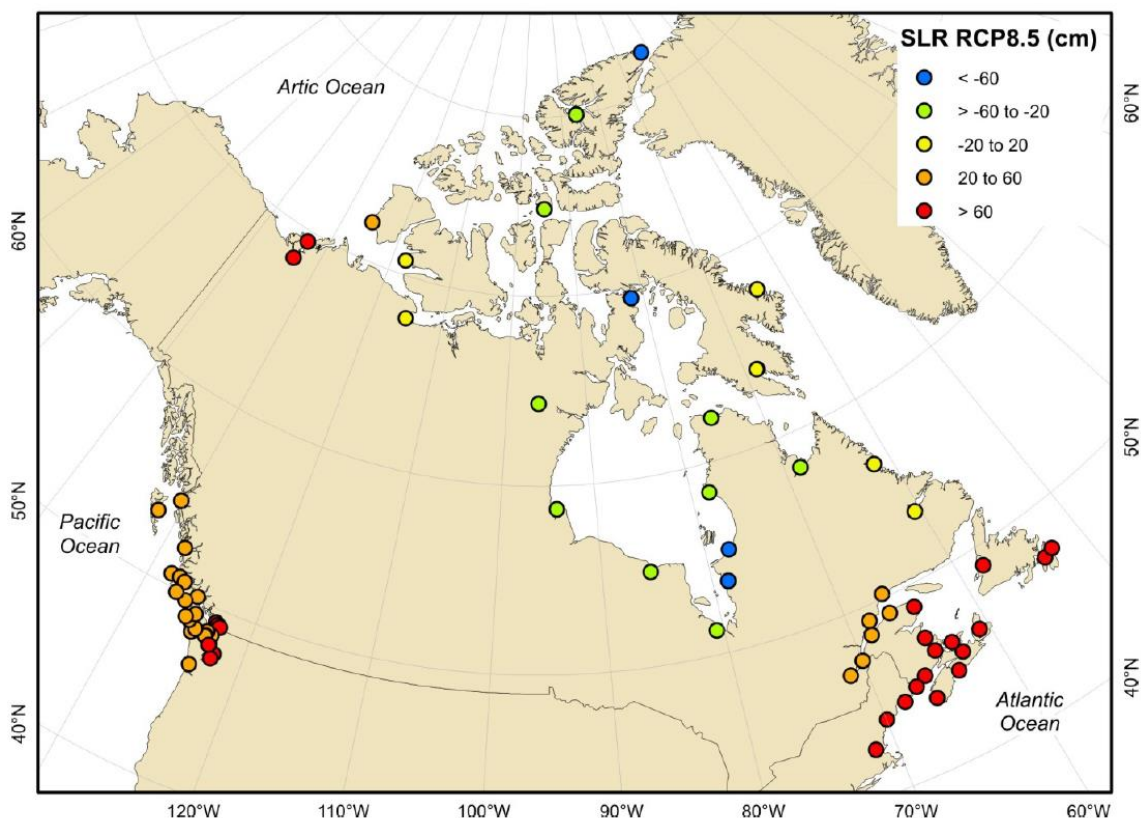


Figure 14. Rehaussement prévu du niveau de la mer en 2100, par rapport à la période 1986-2005, pour le RCP8.5 (James et al., 2014)

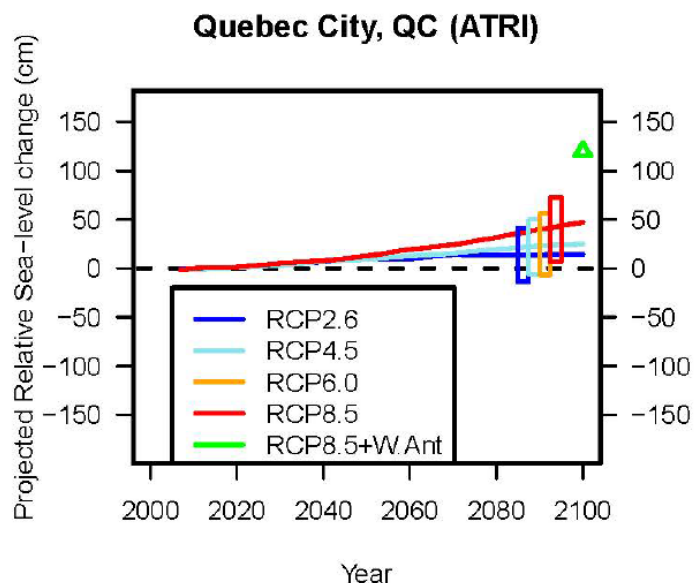


Figure 15. Rehaussement prévu du niveau de la mer à Québec en 2100, par rapport à la période 1986-2005, pour différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. La mention « W.Ant » représente le rehaussement de 65 cm qui serait associé à l'effondrement partiel de la calotte polaire Ouest-Antarctique (James et al., 2014).

Aucune étude n'a tenté d'extrapoler la hausse des niveaux d'eau à Québec dans l'estuaire fluvial. Pour le moment, en absence d'analyses hydrodynamiques prenant en compte les divers phénomènes en jeu dans cette région, il est donc difficile de dire quel sera l'effet exact du rehaussement marin dans les municipalités et les villes situées le long du tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent.

4.3 SUBMERSION

Secteurs concernés : TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

Les événements de submersion sont principalement causés par de fortes dépressions atmosphériques. Dans la littérature scientifique, ces systèmes typiques de nos latitudes moyennes s'appellent aussi cyclones extratropicaux. Or, même si la performance des modèles climatiques s'est améliorée dans la dernière décennie, il s'agit d'un phénomène d'une grande complexité qui demeure difficile à correctement représenter aux résolutions spatiales des modèles climatiques actuels (Zappa et al. 2013a; Booth et al. 2017). D'autres épisodes de submersion surviennent plutôt lorsque des ouragans, en se déplaçant vers le nord, se transforment en cyclones post-tropicaux suite à un amalgame avec une dépression extratropicale ou une perturbation atmosphérique. Ces derniers sont souvent accompagnés de pluies diluviennes, mais leurs mécanismes ne sont pas suffisamment compris pour réaliser des études permettant d'avoir une idée de leur évolution future.

Plusieurs études ont utilisé des modèles de l'ensemble CMIP5 afin d'analyser l'impact potentiel des changements climatiques sur les cyclones extratropicaux et leurs trajectoires en Amérique du Nord (Chang 2013; Zappa et al. 2013b; James et al. 2014; Colle et al. 2015). Ces études s'entendent sur le fait que les tendances demeurent faibles par rapport à la forte variabilité interannuelle de ce genre de phénomène atmosphérique, mais une faible tendance à la baisse est notée pour le nombre et l'intensité des cyclones extratropicaux. Le consensus entre les modèles CMIP5 est un peu plus élevé en hiver qu'en été. Une étude par Colle et al. (2013), toutefois, stipule que même si les tendances moyennes sont effectivement à la baisse, il pourrait y avoir une hausse du nombre de cyclones intenses (<980 hPa). Vu la forte variabilité interannuelle qui caractérise tant le nombre, l'intensité que les trajectoires des cyclones extratropicaux qui passent par le Québec, les faibles changements attendus ne sont pas pour l'instant significatifs et le niveau de confiance en ces résultats demeure limité.

4.3.1 FACTEURS AGGRAVANTS

Plusieurs grandes tempêtes ont lieu en hiver. Historiquement, la glace de berge permettait de briser l'onde de tempête avant qu'elle ne frappe la berge, ce qui réduisait l'impact de ces tempêtes sur les phénomènes d'érosion côtière et de submersion (Savard et al. 2016). Or, déjà, certaines tempêtes d'hiver ont eu lieu alors que la glace de berge était absente ou trop mince pour jouer son rôle de protection. Ce fut le cas en décembre 2010 à Gaspé ou en mars 2017 à l'Île d'Orléans, par exemple.

La hausse des températures dans le futur signifie que la glace de berge diminuera en termes de surface, d'épaisseur, de concentration et de durée (Savard et al. 2016). À la fin du siècle, les volumes de glace de berge dans la mer pourraient être réduits de plus de 95 % par rapport à aujourd'hui. Pour un régime de tempêtes équivalent, une tempête hivernale future aura un potentiel de dommages sur les berges plus grand que par le passé.

Le rehaussement marin aura également pour effet d'exacerber l'impact des ondes de tempêtes. Près de la Ville de Québec, le rehaussement prévu d'ici 2100 est de 0 à 50 cm pour le RCP4.5 et de 20 à 60 cm pour le RCP8.5. En absence de mesures de protection adéquates, les inondations par submersion s'aggraveront donc dans le futur. L'impact sur l'érosion est plus incertain, toutefois, puisqu'il dépend entre autre du type de berge et du type de protection en place.

4.4 FORMATION D'EMBÂCLES

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

4.4.1 FLEUVE SAINT-LAURENT

La complexité du phénomène, l'absence de base de données sur les embâcles et les actions de la Garde côtière signifie qu'il n'est pas possible, avec le niveau de connaissances actuelles, de se prononcer sur l'effet exact des changements climatiques sur la formation d'embâcles dans le fleuve Saint-Laurent.

Les moments les plus propices à la formation d'embâcles sont au début de la période de gel, avant que le couvert de glace ne soit fermement consolidée, et lors des crues, en raison de la hausse du niveau d'eau (Bastien 1976). Ces crues peuvent être causées par des redoux ou par l'arrivée du printemps. En comparant les cartes d'étendue de glace produites par la Garde côtière entre le port de Montréal et le port de Québec cartes et les températures enregistrées aux

différences stations météorologiques le long du fleuve, Dong (2011) a réussi à établir différents seuils de degrés-jours qui permettent d'estimer le moment de l'année où la glace de berge couvre 20, 80 et 100 % de la largeur du fleuve. À l'aide de ces seuils, il a été possible d'inférer le couvert de glace potentiel sur le fleuve à partir des températures simulées par les modèles CMIP5 et NA-CORDEX. Les redoux n'ont pas été pris en compte dans cette analyse, et ils auraient pour effet de retarder la formation du couvert de glace, voire de réinitialiser le processus.

Pour la période 2041-2070, l'apparition d'une glace de berge sera plus tardive de 4 à 13 jours (médiane : 8 jours) pour le RCP4.5 et de 6 à 21 jours (médiane : 11 jours) pour le RCP8.5, par rapport à la période 1981-2010. Les tendances sont similaires pour les seuils de recouvrement à 80 % du fleuve, quoiqu'avec quelques jours de retard supplémentaires. Pour le recouvrement total du fleuve par la glace, les tendances indiquent une date plus tardive de 2 et de 3 semaines, pour le RCP4.5 et 8.5 respectivement. Pour la fin du siècle, on parle plutôt d'une glace de berge qui sera plus tardive de 5 à 16 jours (médiane : 11 jours) pour le RCP4.5 et de 12 à 42 jours (médiane : 22 jours) pour le RCP8.5. Encore une fois, les tendances sont similaires pour le recouvrement à 80 % du fleuve, mais avec quelques jours de retard supplémentaires. Pour le recouvrement total du fleuve par la glace, les tendances indiquent une date plus tardive de 3 semaines à un mois, pour le RCP4.5 et 8.5 respectivement. Dans certaines simulations, il n'est même pas possible de former un couvert de glace sur toute la largeur du fleuve pour le RCP8.5 à la fin du siècle, même en ignorant l'effet des redoux.

Il est difficile de prévoir l'effet exact qu'aura l'arrivée plus tardive de la glace sur les risques d'embâcle. Notamment, les températures plus élevées dans le futur signifient une hausse du nombre de redoux potentiels en hiver, mais, en contrepartie, il est probable que l'épaisseur de glace moyenne soit moindre. Une étude spécifique à la problématique serait nécessaire pour tirer des conclusions robustes de ces résultats.

4.4.2 RIVIÈRES

Une étude par Morse et Turcotte (2018) a analysé l'impact potentiel des changements climatiques sur les risques d'embâcles et de débâcles pour 9 rivières du Québec méridional. Cette étude conclue que pour certaines rivières du sud du Québec, le risque d'inondation par embâcle diminue avec la hausse des températures hivernales, puisqu'il n'y a plus assez de glace pour causer des dommages. D'autres rivières comme la Chaudière et la Saint-François voient une hausse du nombre d'embâcles par hiver, mais une diminution de leur sévérité. Le risque total demeure donc relativement constant pour ces rivières. Finalement, pour les rivières étudiées qui se situaient dans Lanaudière, dans la Gaspésie et au Lac-Saint-Jean, les changements climatiques provoquent une forte hausse des risques d'embâcles. Sur les 9 rivières étudiées, les dommages liés aux embâcles augmenteront dans la période 2041-2070 pour 7 d'entre elles.

Cette étude confirme le caractère local du risque d'embâcle, et indique une forte variabilité spatiale de l'impact des changements climatiques sur ce phénomène. Cela confirme le besoin d'effectuer davantage de recherche sur ce sujet avant de pouvoir extrapoler ces résultats sur l'ensemble des rivières dont l'embouchure est dans le fleuve Saint-Laurent.

4.5 FORMATION DE FRASIL

Secteurs concernés : TCRHSL

Phénomènes concernés : Inondations, érosion

Le frasil est un phénomène complexe qui demeure malheureusement peu étudié et peu documenté au Québec. Cela complique toute analyse qui pourrait être réalisée à partir des données des simulations climatiques.

Au minimum, les conditions suivantes doivent être remplies afin qu'il y ait une formation de frasil (Daly 1991; Morse and Quach 2002) :

- Contact direct entre l'air et l'eau
- Températures froides
- Conditions hydrogéomorphologiques propices (par exemple : présence de rapides)

Certaines conditions météorologiques ont également pour effet d'accentuer les échanges d'énergie entre l'air et l'eau. Les nuits froides, venteuses et sans nuages, par exemple, sont identifiées comme particulièrement propices à la formation de frasil (Morse and Quach 2002).

Outre les conditions hydrogéomorphologiques, les changements climatiques risquent d'avoir un impact sur toutes les conditions énumérées ci-dessus. À priori, il serait raisonnable de croire que les températures hivernales plus clémentes auront pour effet de réduire la formation de frasil dans les rivières. Or, la formation de frasil est un phénomène thermodynamique complexe qui dépend non seulement de la température de l'air, mais également de la vitesse des vents, de l'humidité relative, du nombre d'heures d'ensoleillement, de la vitesse de l'écoulement et d'autres facteurs tel que la couverture nuageuse (Morse and Quach 2002). Il n'est pas suffisant d'analyser une seule de ces variables en isolation. La hausse des températures hivernales, accompagnée de redoux plus fréquents, pourrait d'ailleurs avoir pour effet d'augmenter le nombre de sections de rivière ou du fleuve où l'eau est exposée à l'air froid des mois d'hiver. Les sections nouvellement exposées ne posséderont toutefois pas nécessairement les caractéristiques hydro-géomorphologiques adéquates pour générer du frasil, ce qui complexifie à nouveau l'analyse de l'impact réel. Une étude spécifique sur ce sujet serait donc nécessaire pour tirer des conclusions rigoureuses.

4.6 AUTRES FACTEURS HYDROCLIMATIQUES INFLUENÇANT LES PROCESSUS D'ÉROSION

Secteurs concernés : TCRHSL, TCRLSP, TCREF, TCRQC

Phénomènes concernés : Érosion

Une limitation importante, mentionnée à plusieurs reprises dans ce rapport, est le manque de données observées sur l'érosion. À cela s'ajoute la nature artificielle des berges pour une grande partie du tronçon fluvial, qui complexifie davantage le lien entre le climat, les processus érosifs et l'érosion réelle sur le terrain. En absence d'indicateurs clairs sur lesquels faire une analyse de l'impact des changements climatiques, cette section discute plutôt des tendances générales provenant des simulations climatiques et de l'impact que pourraient représenter ces tendances sur l'érosion des berges.

4.6.1 ÉROSION PAR LES VAGUES FORMÉES PAR LE VENT

L'analyse dans cette section concerne plutôt les vagues formées par le vent au-dessus de grandes étendues d'eau, tel qu'au lac Saint-Pierre. Les vagues formées par les ondes de tempête sont explorées à la Section 4.3.

Les changements climatiques devraient avoir peu d'impact sur la force des vents le long du fleuve Saint-Laurent, avec des changements projetés de l'ordre de 0 à -5 % en été et de 0 à +4 % en hiver, selon l'ensemble NA-CORDEX. Les modèles CMIP5 affichent plutôt des médianes d'environ -5 %, avec une variabilité allant de -15 à +5 % autant en hiver qu'en été, mais ces modèles ont une résolution spatiale trop grossière pour représenter adéquatement la vallée du Saint-Laurent. Leurs résultats doivent être interprétés avec précaution.

Dans tous les cas, les changements prévus à la force des vents ne devraient pas avoir un grand impact sur la force érosive des vagues, surtout en comparaison à d'autres phénomènes tels que la diminution (voire la disparition) de la glace de berge, le rehaussement marin et les fluctuations futures des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent.

4.6.2 ÉROSION PAR GEL-DÉGEL

Aucun seuil spécifique de température n'a pu être répertorié dans la littérature afin de pouvoir comparer directement les variations de température futures et l'érosion des berges par les phénomènes de gel-dégel.

Les simulations climatiques indiquent une faible diminution du nombre de jours où la température maximale est au-dessus de 0°C et où la température minimale est sous 0°C, de l'ordre de -10 à +5 %, voire -15 à +5 % à la fin du siècle pour le RCP8.5. Cette tendance est le résultat d'une saison de gel plus courte avec des températures moins rigoureuses dans le futur, ce qui signifie que la période propice aux variations de températures autour de 0°C sera moins longue et aura plus souvent lieu au cœur de l'hiver, plutôt qu'à la fin de l'automne et au printemps comme c'est le cas actuellement.

Une étude de Bernatchez et Dubois (2004) indique que les falaises orientées au sud, les journées ensoleillées, peuvent dégeler jusqu'à des températures ambiantes de -23°C. Les tendances pour ce seuil sont plus fortes. Le nombre de jours où la température maximale dépasse -23°C, mais où la température minimale est sous 0°C diminue de 10 à 35 % (médiane : -18 %) pour la période 2041-2070. Pour la période 2071-2100, la tendance est identique pour le RC4.5, mais de -65 à -30 % (médiane : -39 %) pour le RCP8.5. Cette diminution est principalement causée par le raccourcissement de la saison froide. L'impact réel sur l'érosion des berges demeure toutefois incertain, en raison d'un manque de données d'observation.

4.6.3 ÉROSION PAR RUISSELLEMENT DE SURFACE

Il n'existe pas, à notre connaissance, de seuil connu où des précipitations intenses provoquent systématiquement de l'érosion, puisque cela dépend fortement du type de sol, de la pente du terrain ou des falaises, de la présence ou non de végétation et d'autres facteurs. Ainsi, même s'il est projeté que l'intensité des précipitations en été risque d'augmenter dans le futur, l'impact sur les processus d'érosion demeure incertain.

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Une analyse des facteurs hydroclimatiques causant de l'érosion et des inondations sur le tronçon fluvial du Saint-Laurent a été effectuée, autant en climat passé qu'en climat futur. Dans plusieurs cas, ce survol des différentes problématiques a illustré le besoin pour davantage de recherche dans le domaine, en particulier en ce qui a trait à l'attribution des causes des inondations et de l'érosion aux processus physiques ou anthropiques.

Voici les principales conclusions qui peuvent être tirées de l'analyse :

Crue printanière :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Augmentation des précipitations hivernales et printanières;
 - Transition vers un système avec moins de neige, mais plus de pluie;
 - Variabilité élevée pour la pluie-sur-neige;
 - Augmentation des apports en eau des Grands Lacs en moyenne, mais diminution potentielle des extrêmes élevés;
 - Disparition rapide des vagues de froid tardives;
 - Augmentation potentielle du nombre de redoux.
- **Impact sur les risques d'inondation et d'érosion :** La complexité du bassin versant du fleuve Saint-Laurent, la gestion des débits et des niveaux d'eau, ainsi que la transition vers un système avec moins de neige, mais plus de pluie rend difficile l'estimation de l'impact exact des changements climatiques. Des outils supplémentaires sont nécessaires pour correctement modéliser les différentes interactions.

Rehaussement marin et submersion :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Ville de Québec : D'ici 2100, augmentation du niveau de la mer de 0 à 60 cm, selon le scénario d'émissions de gaz à effet de serre;
 - Estuaire fluvial : Augmentation du niveau d'eau, mais amplitude inconnue;
 - Incertitude importante quant à la fonte des calottes polaires. L'effondrement d'une partie de la calotte Ouest-Antarctique représenterait une hausse de 65 cm à lui seul.
 - Faible diminution du nombre de tempêtes et de l'intensité des vents (faible niveau de confiance), mais pas de consensus sur l'amplitude de ce changement. Beaucoup de variabilité d'une année ou d'une décennie à une autre;
 - Confiance limitée dans une augmentation possible du nombre de tempêtes intenses (<980 hPa);
 - Disparition graduelle de la glace de berge (-95 % d'ici 2100).
- **Impact sur les risques d'inondation et d'érosion :** Augmentation des risques d'inondation. Augmentation probable des facteurs propices à l'érosion.

Formation d'embâcles :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Diminution probable de l'épaisseur du couvert de glace;
 - Arrivée plus tardive et départ plus hâtif du couvert de glace;
 - Réchauffement des températures : redoux potentiellement plus nombreux;
 - Débits plus élevés en hiver.
- **Impact sur les risques d'inondation et d'érosion :** Le manque d'observations, de modèles et de littérature scientifique sur ce sujet signifie que le risque, même actuel, est très mal connu. Les changements climatiques amènent une complexité supplémentaire.

Formation de frasil :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Diminution probable du couvert de glace;
 - Arrivée plus tardive du couvert de glace;
 - Hausse des températures hivernales;
 - Débits plus élevés en hiver.
- **Impact sur les risques d'inondation :** Le manque d'observations, de modèles et de littérature scientifique sur ce sujet signifie que le risque, même actuel, est très mal connu. Les changements climatiques amènent une complexité supplémentaire.

Érosion par les vagues et marées :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Faibles changements à la force des vents;
 - Diminution, voire disparition de la glace de berge;
 - Modifications potentielles au régime hydrique du fleuve Saint-Laurent.
- **Impact sur les risques d'érosion :** Augmentation probable en hiver dû à la diminution de la glace de berge. Impact incertain en été.

Érosion par gel-dégel :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Faible diminution du nombre de journées qui ont un potentiel érosif.
- **Impact sur les risques d'érosion :** Faible diminution probable des risques.

Érosion par dessiccation de l'argile :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Aucune corrélation significative n'a pu être établie entre le climat et les variations de niveau causant de la dessiccation de l'argile.
- **Impact sur les risques d'érosion :** Aucun impact n'a pu être déterminé.

Érosion par ruissellement de surface :

- **Impact des changements climatiques :**
 - Augmentation de l'intensité des précipitations estivales.
- **Impact sur les risques d'érosion :** Augmentation possible du risque, mais les seuils critiques ne sont pas connus.

Plusieurs besoins, en terme de nouvelles connaissances, ont pu être déterminés lors de l'élaboration de ce rapport et lors des analyses réalisées dans ce projet. Les points énumérés ci-dessous identifient quelques besoins jugés prioritaires.

- **Observations :**

- Il n'existe pratiquement aucune donnée quantitative sur l'érosion le long du fleuve, que ce soit sous la forme de concentration en sédiments ou turbidité de l'eau, ou en terme de taux de recul des berges. Cela a fortement limité les analyses possibles.
- De manière similaire, les observations sur la glace (couvert de glace, mais également frasil et embâcles) sont très rares et constituent un obstacle important à la recherche dans ce domaine. À notre connaissance, les seules observations publiques disponibles sont l'historique d'embâcles maintenu par le MSP, ainsi que les cartes produites quotidiennement par la GCC. La base de données du MSP, bien qu'utile pour répertorier les embâcles passés, ne permet pas d'aller dans un niveau de détail suffisant pour une étude d'impact des changements climatiques. Les cartes produites par la GCC, quant à elles, sont fournies dans un format PDF ou GIF qui est utile pour la navigation, mais qui limite fortement leur utilisation par la communauté scientifique. Les principales lacunes sont l'absence de géolocalisation et de couches spécifiques pour chaque type de glace, ce qui signifie que les cartes peuvent difficilement être importées dans des outils capables d'effectuer des analyses détaillées, tel que ArcGIS. Outre les formats PDF et GIF, ces cartes devraient être disponibles sous la forme de GeoTIFF, shapefile et/ou tout autre format équivalent.

- **Besoins de recherche :**

- En absence d'un modèle robuste permettant d'intégrer les conditions au sol, les conditions météorologiques et la gestion humaine des Grands Lacs et des réservoirs du bassin versant de la rivière des Outaouais, il est très extrêmement difficile d'indiquer quel pourrait être l'impact des changements climatiques sur ce système très complexe.
- De manière générale, il existe peu de recherche au Québec sur l'érosion des berges, sur les embâcles et sur le frasil, et la recherche existante se limite typiquement aux rivières ou au milieu marin dans le cas de l'érosion. Davantage de travail serait nécessaire sur ces sujets.
- Le rehaussement marin au Québec demeure peu exploré malgré l'impact potentiel important de ce phénomène. La plupart des études et des rapports qui ont été répertoriés ne couvrent pas l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Il est commun de

voir que tout ce qui se trouve à l'ouest de Gaspé, voire que tout le golfe, se trouve dans une zone grise « Non disponible ». L'étude de James et al. (2014) est l'une des seules à se prononcer quant aux changements prévus pour la Ville de Québec, et absolument aucune information n'a pu être trouvée pour l'estuaire fluvial lui-même. Ce dernier point constitue une lacune importante pour les communautés installées entre le lac Saint-Pierre et Québec et s'explique probablement par la complexité du territoire et par la nécessité de développer un modèle hydrodynamique de l'embouchure du fleuve.

- Une étude de Dauphin et Lehoux, en 2004, a relevé les niveaux d'eau du fleuve pour lesquels le potentiel érosif des vagues était maximal. Cette donnée est essentielle pour bien analyser le risque d'érosion des berges, mais est pratiquement inexistante. Une mise à jour aux informations contenues dans le rapport de Dauphin et Lehoux (2004) serait très utile pour appuyer des travaux de recherche futurs.

6 RÉFÉRENCES

- Bastien R (1976) Le détachement de la couverture de glace du Lac St-Pierre côté sud. Transport Canada - Garde côtière canadienne, District de Montréal
- Bernatchez P, Dubois J-MM (2004) Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire* 58:45–71.
- Booth JF, Kwon Y-O, Ko S, et al (2017) Spatial patterns and intensity of the surface storm tracks in CMIP5 models. *Journal of Climate* 30:4965–4981.
- Bourduas-Crouhen V, Siron R, Blondlot A (2017) État des lieux des pêches et de l'aquaculture au Québec en lien avec les changements climatiques.
- Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, et al (2013) *Sea Level Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Chang EKM (2013) CMIP5 projection of significant reduction in extratropical cyclone activity over North America. *Journal of Climate* 26:9903–9922.
- Colle B, Booth JF, Chang EKM (2015) A Review of Historical and Future Changes of Extratropical Cyclones and Associated Impacts Along the US East Coast. *Current Climate Change Reports* 1:125–143.
- Colle BA, Zhang Z, Lombardo KA, et al (2013) Historical evaluation and future prediction of eastern North American and Western Atlantic extratropical cyclones in the CMIP5 models during the cool season. *Journal of Climate* 26:6882–6903.
- Daly SF (1991) Frazil Ice Blockage of Intake Trash Racks. *Cold Regions Technical Digest* 1–12.
- Dauphin D, Lehoux D (2004) Bilan de la sévérité de l'érosion dans le Saint-Laurent dulcicole et stratégies de protection recommandées pour les rives à plus grande valeur biologique. Gouvernement du Canada
- DEH (2018) Atlas hydroclimatique du Québec méridional, Édition 2018. In: Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/CrucesPrintanieres/Q1max2P.htm>.
- Dong N (2011) *Border Ice Processes on the St Lawrence River*. Université Laval
- Garde côtière du Canada (2013) *Déglaçage*. http://www.ccg-gcc.gc.ca/fra/Gcc/gvn_nds_page6. Accessed 15 Sep 2017

- Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, et al (2017) The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* 30:5419–5454.
- Gennaretti F, Sangelantoni L, Grenier P (2015) Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature-precipitation interdependence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120:11862–11877.
- GLAM (2018) Summary of 2017 Great Lakes Basin Conditions and Water Level Impacts to Support Ongoing Regulation Plan Evaluation. Great Lakes - St. Lawrence River Adaptive Management (GLAM) Committee
- ILOSLRB (2017) Conditions observées et régularisation du débit en 2017. Rapport présenté à la Commission mixte internationale
- James TS, Henton JA, Leonard LJ, et al (2014) Relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States.
- Karmalkar AV (2018) Interpreting results from the NARCCAP and NA-CORDEX ensembles in the context of uncertainty in regional climate change. 2093–2106. doi: 10.1175/BAMS-D-17-0127.1
- Knutti R, Sedláček J (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change* 1–5.
- Lemmen DS, Warren FJ, James TS, Mercer Clarke CSL (2016) Canada's Marine Coasts in a Changing Climate. Ottawa
- Mearns L, McGinnis S, Korytina D, et al (2017) The NA-CORDEX dataset, version 1.0. In: NCAR Climate Data Gateway, Boulder CO.
- MELCC (2017) Faits saillants: Tempête du 14 et 15 mars 2017. In: Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/2017/2017-03-14.htm>.
Accessed 30 Nov 2019
- Morneau F, Bourque A, Larrivée C, Audet N (2014) L'exposition des rives et des zones côtières du Saint-Laurent aux aléas hydroclimatiques. Rapport soumis à la Communauté métropolitaine de Québec
- Morse B, Quach T-T (2002) Preventing Frazil Ice Accumulations At Hydroelectric Facilities. In: *Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice* Dunedin. International Association of Hydraulic Engineering and Research, Dunedin, New-Zealand,
- Morse B, Turcotte B (2018) Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (Volet A). Rapport présenté

à Ouranos

- Mpelasoka FS, Chiew FHS (2009) Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. *Journal of Hydrometeorology* 10:1168–1183.
- Music B, Frigon A, Biner S (2018) Present climate and climate change over the Great Lakes regions as simulated by the CRCM5. Report presented to Environment and CLimate Change Canada
- Music B, Frigon A, Lofgren B, et al (2015) Present and future Laurentian Great Lakes hydroclimatic conditions as simulated by regional climate models with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Climatic Change* 603–618. doi: 10.1007/s10584-015-1348-8
- Plan Saint-Laurent (2010) Suivi de l'état du Saint-Laurent: L'érosion des berges en eau douce.
- Savard J-P, Van Proosdij D, O'Carroll S (2016) Perspectives on Canada's East Coast Region. Ottawa
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2011) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93:485–498.
- Zappa G, Shaffrey LC, Hodges KI (2013a) The ability of CMIP5 models to simulate North Atlantic extratropical cyclones. *Journal of Climate* 26:5379–5396.
- Zappa G, Shaffrey LC, Hodges KI, et al (2013b) A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models. *Journal of Climate* 26:5846–5862.

ANNEXE I. IDENTIFICATION DES FACTEURS HYDROCLIMATIQUES

Cette annexe est un document produit en septembre 2017 par Ouranos et joint au rapport d'étape du projet, en février 2018.

INONDATIONS

Note générale : Le débit sortant du lac Ontario est régularisé depuis 1960. Cette gestion vise à minimiser les inondations et à accroître le débit lors d'étiages, afin d'assurer la navigation commerciale et la production d'hydroélectricité des centrales sur le Saint-Laurent. Le débit sortant du lac est géré en fonction des débits de la rivière Outaouais ce qui permet, dans la plupart des situations, d'éviter des inondations au niveau du fleuve Saint-Laurent. Toutefois, depuis les années 70, quatre inondations importantes n'ont pu être évitées, en 1974, 1976, 1998 et 2017.

Des travaux de déglacage sont entrepris, au besoin, afin d'éviter les inondations dues aux embâcles de glace. Ce fut entre autre le cas en 2005 lors d'un redoux hivernal, où une vaste opération de déglacage sur la rivière des Prairies a permis d'éviter l'évacuation des résidents situés en zone inondable à Laval.

En raison de la taille du bassin versant du fleuve Saint-Laurent et des volumes d'eau requis pour provoquer une crue, les inondations du fleuve ont historiquement été causées par des phénomènes printaniers. Cette hypothèse semble être validée par la base de données AQUARISC v7.2, qui couvre principalement les années 1850 à 2000 (outil en développement : Historique des sinistres d'inondations et d'étiages). Au besoin, des vérifications supplémentaires pourront être effectuées au lancement officiel de l'outil.

Référence : Morneau *et al.* (2014), Mayer-Jouanjan (2015)

Embâcles de glace et de frasil

Description : Il existe deux moments dans l'année propices aux phénomènes d'embâcles de glace, soient au début de la période de gel, avant que la nappe de glace ne soit fermement consolidée, et lors des crues, en raison de la hausse du niveau d'eau.

À la hauteur de Montréal, le couvert de glace est une combinaison de grandes quantités de frasil produites dans les rapides Lachine et de minces couches de glace formées sur les berges et détachées par les vagues. Ces morceaux de glace sont emportés vers le lac Saint-Pierre et s'accumulent à la sortie du lac en raison de courants plus faibles. Des inondations mineures peuvent être causées par ces premières accumulations de glace.

En hiver, le chenal maritime constitue une faiblesse dans le couvert de glace, qui peut favoriser la création d'embâcles. Notamment, il a été observé que sous l'action de vents soutenus soufflant du sud, du sud-ouest ou du sud-est, des blocs de glace peuvent se détacher et former des embâcles majeurs à la sortie du lac Saint-Pierre. Ce phénomène est pire lorsqu'il est accompagné de températures très froides qui favorisent la formation de nouvelle glace dans les sections à l'eau libre. Des vents soufflant vers l'est rendent également plus difficile le travail de déglacage, puisqu'ils poussent les masses de glace vers l'aval.

Lors de redoux et au printemps, le couvert de glace se rompt sous l'effet des températures plus douces, des précipitations liquides et de la hausse des niveaux d'eau. Une quantité importante de blocs de glace se déplacent alors dans le fleuve. Le principal goulot d'étranglement identifié comme étant propice à la formation d'embâcles est la sortie du lac Saint-Pierre, tel que décrit précédemment. D'autres sections du fleuve ont été identifiées comme posant parfois problème, soit les rivières des Mille Îles et des Prairies, ainsi que la région de Cap-Rouge, en amont de Québec, lorsque la marée haute refoule les glaces. Dans tous les cas, ces zones d'embâcle peuvent provoquer des inondations importantes.

Influence anthropique : Les embâcles demeurent un risque en hiver en raison du chenal maritime, malgré la présence de brise-glaces. Les courants sont souvent plus forts dans le chenal, puisque sa profondeur plus importante en fait un chemin d'écoulement principal pour les eaux du fleuve. Or, cela signifie que les blocs de glace ont également tendance à s'y concentrer. Il s'agit d'une problématique majeure au lac Saint-Pierre.

Le batillage causé par les navires dans le chenal maritime, en hiver, est une des causes principales de détachement de masses de glace et de rupture du couvert de glace. Des ouvrages (îlots artificiels, estacades flottantes, digues) ont été construits le long du fleuve, dont au lac Saint-Pierre, pour retenir les glaces et diminuer les risques d'embâcles.

Influence des CC :

- Influence incertaine sur la production de frazil
- Crues printanières plus hâtives
- Augmentation possible des épisodes de redoux
- Volume de glace maximal possiblement réduit
- Résistance mécanique de la glace réduite
- Augmentation possible des vents moyens en hiver
- Augmentation possible de l'occurrence de bourrasques

Régions d'intérêt : Lac Saint-Pierre, quelques autres secteurs du fleuve

Références : Bastien (1976), ECCC (2010), GCC (2013), Morneau *et al.* (2014), CEHQ (2015), Ouranos (2015)

Crues hivernales et printanières

Description : Les crues hivernales et printanières s’amorcent lorsque les températures dépassent le point de congélation et provoquent la fonte du manteau neigeux. Nonobstant la présence d’embâcles, les crues printanières elles-mêmes peuvent provoquer des inondations lorsque les quantités d’eau de ruissellement sont très importantes, soit en raison d’un manteau neigeux particulièrement volumineux, soit en raison de pluies importantes sur un sol gelé, ou une combinaison de ces facteurs.

Influence anthropique : Le débit sortant du lac Ontario est géré en fonction des débits de la rivière Outaouais ce qui permet, dans la plupart des situations, d’éviter des inondations au niveau du fleuve Saint-Laurent. Toutefois, la gestion est limitée lorsque le lac atteint ses cotes d’inondation au moment de la crue de la rivière Outaouais. C’est justement ce qui s’est passé en 2017.

Influence des CC :

- Réduction possible de l’accumulation de neige au sol
- Augmentation incertaine du nombre d’événements pluie sur neige
- Augmentation possible des précipitations maximales sur le bassin
- Augmentation probable du nombre de redoux

Régions d’intérêt : Bassins versants des Grands-Lacs et du fleuve Saint-Laurent.

Références : CEHQ (2015), Ouranos (2015), GLERL (2017)

Submersion

Description : Dans les tronçons fluviaux du Saint-Laurent, les événements de submersion sont principalement observés à l’Île d’Orléans et dans la région de Québec. Ils sont causés par des grandes marées, souvent dues à des ondes de crue de tempêtes. Les secteurs de la Place Royale et de la rue Dalhousie, à Québec, sont inondés à chaque année. Plusieurs secteurs du bas de Lévis, qui sont endigués, présentent eux aussi des risques importants d’inondation. Finalement, plusieurs municipalités de l’Île d’Orléans subissent des problématiques de submersions sévères lors de certaines tempêtes automnales.

Influence anthropique : La submersion dépend également des débits du fleuve, qui sont régulés depuis 1960.

Influence des CC :

- Rehaussement du niveau de la mer
- Modifications possibles des trajectoires de tempêtes et des dépressions majeures

Le déplacement vertical de la croûte terrestre est à prendre en compte, mais, en raison de la dernière glaciation, le territoire localisé entre la baie d’Hudson et le golfe du Saint-Laurent est

l'une des régions du monde où ce déplacement est le plus difficile à déterminer. Près de la Ville de Québec, ce déplacement est un rehaussement de 0 à 3 mm/année.

Région d'intérêt : Estuaire fluvial du fleuve Saint-Laurent

Références : Morneau *et al.* (2014), Kopp *et al.* (2014), Bernatchez *et al.* (2015), Ouranos (2015), Strauss *et al.* (2015), Lemmen *et al.* (2016), Bourduas-Crouhen *et al.* (2017)

ÉROSION

Note générale : Sur le tronçon fluvial, entre Cornwall et Trois-Rivières, les facteurs purement anthropiques sont une cause majeure d'érosion des berges. Parmi les facteurs dominants, on note le batillage causé par la navigation commerciale, surtout lorsque les bateaux passent à moins de 800 m des rives, et l'artificialisation des berges. Dans ce dernier cas, on peut noter deux problèmes distincts :

- 1) Dans les dernières années, plusieurs études ont conclu que les mesures de protection « classiques », telles que les digues et les enrochements, peuvent obstruer les fonctions des hydrosystèmes et accentuer la vulnérabilité. Parmi les problèmes potentiels, on note une érosion plus marquée dans les tronçons non-protégés, une modification potentielle de la pente du lit de la rivière, une diminution de la recharge des nappes phréatiques, l'apparition de problèmes de drainage et une modification des écosystèmes aquatiques.
- 2) Plusieurs ouvrages de protection des rives ont été construits par Travaux publics Canada dans les années 60, puis ont été cédés aux riverains et aux municipalités. Ces ouvrages arrivent aujourd'hui en fin de vie utile et, faute de financement pour leur entretien, beaucoup sont fortement détériorés ou détruits.

Référence : Dauphin et Lehoux (2004), Castle *et al.* (2013), MDDELCC (2015), Morneau *et al.* (2014)

Fluctuation des niveaux d'eau (étiages)

Description : Lors des longs épisodes de faibles débits, l'argile marine exposée à l'air s'assèche à la surface (phénomène de dessiccation de l'argile), ce qui crée à la fois des fentes de retrait majeures et une microfissuration à la surface. Lorsque les niveaux d'eau remontent, ces fissures favorisent la défloculation de l'argile et provoquent une érosion disproportionnée par rapport aux débits.

Il a été observé que la période à laquelle les épisodes de faibles débits surviennent peut avoir un impact significatif sur la vulnérabilité aux phénomènes d'érosion. Lorsqu'un épisode relativement long de faibles débits survient tôt dans la saison de croissance, les berges nouvellement exposées à l'air peuvent avoir le temps de se végétaliser. Dans ces cas, la vulnérabilité à l'érosion dépendra en grande partie de la densité et de la profondeur du

système racinaire. En contrepartie, les berges risquent de demeurer exposées lorsqu'un épisode de faibles débits survient en automne ou est de trop courte durée.

Influence anthropique : Le débit sortant du lac Ontario est régularisé depuis 1960. Cette gestion vise à minimiser les inondations et à accroître le débit lors d'étiages, afin d'assurer la navigation commerciale et la production d'hydroélectricité des centrales sur le Saint-Laurent.

Influence des CC :

- Réduction possible des débits d'étiages
- Modification de la saison de croissance

Régions d'intérêt : Bassins versants du fleuve Saint-Laurent.

Références : Gaskin *et al.* (2003), Plan St-Laurent (2010), CEHQ (2015), Ouranos (2015)

Gel-dégel

Description : La formation de lentilles de glace dans le sol sous l'effet du gel réduit la cohésion interne des sols lors du dégel et contribue à l'affaissement des falaises, aux risques de liquéfaction et de coulées boueuses et, généralement, à la mobilisation de sédiments pouvant être transportés par le courant. Des études ont noté que dans la vallée du Saint-Laurent, les falaises exposées au sud dégèlent presque tous les jours ensoleillés, jusqu'à des températures ambiantes de -23°C, pour ensuite re-geler pendant la nuit.

Influence anthropique : N/A.

Influence des CC :

- Augmentation possible du nombre de cycles gel-dégel

Régions d'intérêt : Berges du fleuve Saint-Laurent.

Références : Bernatchez et Dubois (2004), Plan St-Laurent (2010), Kong et Yu (2013), Morneau *et al.* (2014), Ouranos (2015)

Glaces

Description : Les détails sur la formation des embâcles de glace sur le Saint-Laurent sont fournis dans la section « Embâcles de glace et de frasil ». L'érosion peut survenir lors de la débâcle, lorsque les blocs de glace en eau libre entrent en contact avec les berges, mais également lors de la formation d'un embâcle, lorsque les blocs de glace s'entassent les uns sur les autres et exercent une immense force sur les berges et sur tout obstacle rencontré.

Dans l'estuaire, les glaces littorales peuvent jouer un rôle de protection contre les ondes de tempête hivernales, en autant que l'étendue glacée soit d'une épaisseur adéquate et d'une largeur de plus de 500 m à 1 km. Si ces critères ne sont pas atteints, les glaces littorales peuvent

au contraire endommager les côtes sableuses, puisqu'elles agissent comme une structure rigide qui réfléchit les vagues et favorise une érosion du bas de la plage. L'effet est plus marqué en présence de fortes marées. Cette dynamique pourrait être différente dans l'estuaire fluvial, mais aucune étude à ce sujet n'a pu être trouvée.

Influence anthropique : Les embâcles demeurent un risque en hiver en raison de la présence de brise-glaces dont le rôle est de garder ouvert le chenal maritime. Les courants sont souvent plus forts dans le chenal, puisque sa profondeur plus importante en fait un chemin d'écoulement principal pour les eaux du fleuve. Or, cela signifie que les blocs de glace ont également tendance à s'y accumuler. Il s'agit d'une problématique majeure au lac Saint-Pierre.

Le batillage causé par les navires dans le chenal maritime, en hiver, est l'une des causes majeures de détachement de masses de glace et de rupture du couvert de glace. Des ouvrages (îlots artificiels et estacades flottantes) ont été construits le long du fleuve, dont au lac Saint-Pierre, pour retenir les glaces et diminuer les risques d'embâcles.

Influence des CC :

- Augmentation possible des épisodes de redoux
- Réduction possible du volume de glace
- Réduction possible de la glace de rive

Régions d'intérêt : Lac Saint-Pierre, quelques autres secteurs du fleuve, estuaire fluvial

Références : Bastien (1976), Allard et Champagne (1980), Bernatchez et Dubois (2004), ECCC (2010), GCC (2013), Morneau et al. (2014), CEHQ (2015), Ouranos (2015)

Vagues

Description : Par endroits, le fleuve Saint-Laurent peut atteindre plus de 10 km de largeur. Sur ces tronçons, les vents peuvent soulever des vagues dont le sapement est susceptible d'altérer les berges. C'est entre autre le cas entre Cornwall et Montréal, sur le lac Saint-Pierre et à l'est de l'Île d'Orléans. Dans la partie nord-est de l'Île des Barques, par exemple, une érosion de 15 m/an est expliquée par les vagues causées par les vents soufflant sur le lac Saint-Pierre et par le batillage de la navigation commerciale.

Influence anthropique : N/A pour les vents. Toutefois, les vagues provoquées par le batillage de la navigation ont un impact similaire.

Influence des CC :

- Diminution possible des vents moyens en été

L'impact des CC sur les vents de surface est difficile à évaluer, notamment dans la vallée du Saint-Laurent où la topographie joue un rôle significatif qui n'est pas capté par les modèles globaux de climat. Le consensus entre les modèles demeure généralement faible, d'autant que la plupart des études qui incluent le Québec ont utilisé des modèles globaux. Il existe toutefois

des modèles régionaux de climat (par exemple, l'ensemble CORDEX-NA) possédant une résolution spatiale adéquate pour détecter la vallée du Saint-Laurent.

Régions d'intérêt : Vallée du Saint-Laurent, notamment aux endroits où le fleuve a plus de 10 km de largeur.

Références : Plan St-Laurent (2010), Cheng *et al.* (2014), Morneau *et al.* (2014), Ouranos (2015)

Vitesses d'écoulement

Description : Les vitesses d'écoulement ont une influence directe sur le potentiel érosif d'un cours d'eau. Toutefois, la présence de barrages sur le fleuve et sur la rivière Outaouais, ainsi que la présence de lacs, a pour effet de réduire les vitesses. Seules les berges à la hauteur des rapides Lachine ont été identifiées comme affectées par les vitesses d'écoulement.

Influence anthropique : Les vitesses d'écoulement sont fonction de la géomorphologie du cours d'eau et du débit en rivière. Sur ce deuxième aspect, il faut noter que le débit du fleuve est régularisé depuis 1960.

Des études ont démontré que la vitesse des courants à proximité des rives est multipliée par 5 (20 cm/s à près de 100 cm/s) à la suite du passage de navires.

Influence des CC :

- Influence incertaine sur les débits moyens
- Augmentation possible de la variabilité et de la fréquence d'occurrence de débits élevés

Région d'intérêt : Les rapides Lachine. D'autres régions pourraient également être analysées.

Références : Morneau et al. (2014), CEHQ (2015), Ouranos (2015)

Ondes de marées et de tempêtes

Description : À l'est de Québec, l'onde de marées peut atteindre 6 mètres. L'effet des marées est ressenti jusqu'à Trois-Rivières, où il n'est plus que de quelques centimètres. Les marées, surtout dans la région de Québec et dans l'estuaire, peuvent accentuer les phénomènes d'érosion là où il existe des barrières humaines ou naturelles empêchant une recharge des sédiments.

Toutefois, l'érosion est principalement causée par les ondes de tempêtes. Une onde de tempête est définie comme un écart positif ou négatif entre le niveau de la mer et les valeurs de la table des marées, attribuable principalement à la pression atmosphérique et aux vents dans l'océan. Les vents violents peuvent faire monter le niveau de la mer le long des côtes et causer d'immenses vagues qui peuvent provoquer des dégâts importants sur les berges, notamment en Gaspésie et dans l'estuaire du Saint-Laurent. Sur le tronçon fluvial, les ondes de tempêtes sont principalement ressenties près de l'Île d'Orléans.

Influence anthropique : La fluctuation des niveaux d'eau dépend également des débits du fleuve, qui sont régulés depuis 1960.

Influence des CC :

- Débits moyens plus élevés en hiver et plus faibles en été
- Rehaussement du niveau de la mer
- Modifications possibles des trajectoires de tempêtes et des dépressions majeures

Le déplacement vertical de la croûte terrestre est à prendre en compte, mais, en raison de la dernière glaciation, le territoire localisé entre la baie d'Hudson et le golfe du Saint-Laurent est l'une des régions du monde où ce déplacement est le plus difficile à déterminer. Près de la Ville de Québec, ce déplacement est un rehaussement de 0 à 3 mm/année.

Dans l'estuaire, il a été noté que la perte du couvert de glace sur les côtes en hiver accentuait grandement l'érosion due aux ondes de tempêtes hivernales. Si cela est un enjeu pour l'estuaire fluvial, des scénarios pourraient être utilisés pour recenser les indices de gel, par exemple.

Région d'intérêt : Estuaire fluvial du fleuve Saint-Laurent

Références : Morneau *et al.* (2014), Kopp *et al.* (2014), Bernatchez *et al.* (2015), Ouranos (2015), Strauss *et al.* (2015), Lemmen *et al.* (2016), Bourduas-Crouhen *et al.* (2017)

Ce projet est financé par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020 (PACC 2013-2020) du gouvernement du Québec.



RÉFÉRENCES

Allard, M. et Champagne, P. (1980). Dynamique glacielle à la pointe d'Argentenay, île d'Orléans, Québec. Géographie physique et Quaternaire 342 : 159–174.

Bastien, R. (1976). Le détachement de la couverture de glace du lac Saint-Pierre... Comment et pourquoi. Service d'ingénierie et de contrôle des glaces de la Garde côtière canadienne, Montréal, 110 p.

Bernatchez, P. et Dubois, J.M.J. (2004) Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. Géographie physique et Quaternaire 581: 45–71.

Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., Da Silva, L. (2015). Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à Ouranos, 45 p. et annexes.

Bourduas-Crouhen V., Siron, R. & Blondlot, A. (2017). État des lieux des pêches et de l'aquaculture du Québec en lien avec les changements climatiques. Montréal, Québec. Ouranos, 94 p.

Castle, S.S., Howe, E.A., Bird, E.L., Howland, W.G. (2013). Résilience aux inondations dans le bassin du lac Champlain et la rivière Richelieu. Un examen exhaustif des répercussions des inondations de 2011 dans le bassin versant visant à orienter les politiques et les stratégies de gestion de résilience aux inondations dans le bassin du lac Champlain, Programme de mise en valeur du Lac Champlain et New England Interstate Water Pollution Control Commission, 109p.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 2015, 81 p.

Cheng, C.S., Lopes, E., Fu, C., Huang, Z. (2013). Possible Impacts of Climate Change on Wind Gusts under Downscaled Future Climate Conditions: Updated for Canada. Journal of Climate, vol. 27, issue 3, pp. 1255-1270

Dauphin, D., et D. Lehoux. 2004. Bilan de la sévérité de l'érosion dans le Saint - Laurent dulcicole (Montréal – archipel de Berthier - Sorel, incluant les îles de la Paix) et stratégies de protection recommandées pour les rives à plus grande valeur biologique. Environnement Canada, Service canadien de la faune, 232 p. et 3 annexes.

Environnement et Changements climatiques Canada (ECCC). Les inondations au Canada – Québec. [En ligne]. <https://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=C0122DA3-1#Section3>. Consulté le 2017-09-15, dernière mise à jour le 2010-12-02.

Garde côtière canadienne (GCC). Déglacage. [En ligne]. http://www.ccg-gcc.gc.ca/fra/Gcc/gvn_nds_page6. Consulté le 2017-09-15, dernière mise à jour le 2013-06-24.

Gaskin, S.J. et Pieterse, J. et Al Shafie, A. et Lepage, S. (2003). Erosion of undisturbed clay samples from the banks of the St-Lawrence River. Canadian Journal of Civil Engineering , 30 . p. 585-595.

Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL), 2017. Lake Ontario-St. Lawrence River flooding 2017: Extra water on both sides of the dam. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1 p.

Kong, B. et Yu, H. (2013). Estimation Model of Soil Freeze-Thaw Erosion in Silingco Watershed Wetland of Northern Tibet, The Scientific World Journal, Article ID 636521, 7 pages

Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., Strauss, B. H. and Tebaldi, C. (2014), Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2: 383–406.

Lemmen, D.S., Warren, F.J., James, T.S. and Mercer Clarke, C.S.L. editors (2016): *Canada's Marine Coasts in a Changing Climate*; Government of Canada, Ottawa, ON, 274p.

Mayer-Jouanjan, I. (2015). *Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des solutions mises en place. Fiche de projet en cours – Ouranos.*

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2015). *Guide d'interprétation : Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Direction des politiques de l'eau, 131 p.

Morneau, F., A. Bourque, C. Larrivée, N. Audet, 2014, *L'EXPOSITION DES RIVES ET DES ZONES CÔTIÈRES DU SAINT - LAURENT AUX ALÉAS HYDROCLIMATIQUES*. Consortium Ouranos, Rapport soumis à la Communauté métropolitaine de Québec. 57 pages.

Ouranos (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec*. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.

Plan St-Laurent (2010). *L'érosion des berges en eau douce*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Québec, 8 p.

Strauss, B.H., S. Kulp, and A. Levermann (2015). Carbon choices determine US cities committed to futures below sea level. *PNAS* 112 (44), 13508-13513.

ANNEXE II. RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

Une régression linéaire multiple demande deux matrices de données. La première contient les variables explicatives, soient les indicateurs climatiques calculés à partir de la réanalyse MERRA-2.

- Précipitations totales entre octobre et mai (mm)
- Équivalent en eau maximal de la neige après le 1^{er} mars (mm)
- Pluie totale entre mars et mai (mm)
- Pluie-sur-neige totale (mm)
- Apports de fonte (neige au sol + précipitations) entre mars et mai (mm)
- Températures moyennes en mars (°C)
- Températures moyennes en avril et en mai (°C)
- Nombre de vagues de froid après le 1^{er} mars
- Pression atmosphérique minimale entre mars et mai (Pa)
- Vitesse maximale du vent journalier entre mars et mai (m/s)

Tous ces indicateurs sont normalisés selon un *Z-score* afin d'éviter un biais dans leur représentativité. Afin de mieux discrétiser l'impact des nombreux sous-bassins versants du système Saint-Laurent, ces indicateurs, sauf les trois derniers, ont été séparés en plusieurs sous-régions :

- Bassin versant de la rivière des Outaouais
- Bassin versant du lac Ontario
- Bassin versant des autres Grands Lacs
- Bassin versant du fleuve Saint-Laurent (de Cornwall jusqu'à Montréal / Trois-Rivières / Québec, selon la station)

La deuxième matrice nécessaire à la régression linéaire multiple est le résultat escompté, soit le niveau d'eau à une station donnée. Or, les marégraphes de Pêches et Océans Canada ne couvrent pas tous l'entièreté de la période 1980-2019 et, même lorsque cela est le cas, il existe de nombreuses années manquantes. Dans le but de maximiser le nombre de données sur lesquelles faire la régression, les étapes suivantes ont été effectuées :

1. Les quatre stations les plus près de la station d'intérêt ont été identifiées.
2. Pour la station d'intérêt et pour les stations avoisinantes, le niveau d'eau maximal sur 1 jour ($N_{\max}$) et sur 14 jours ($N_{\max14}$) atteint au printemps entre 1980 et 2019, ainsi que l'anomalie interannuelle, est calculé.

3. Lorsqu'une année est manquante à la station d'intérêt, un niveau d'eau maximal approximatif est estimé à partir de l'anomalie interannuelle moyenne calculée pour les quatre plus proches stations.

La régression linéaire consiste à comparer la matrice d'indicateurs à la matrice de niveaux d'eau et à tenter de trouver le coefficient à donner à chaque indicateur pour reproduire les niveaux d'eau passés. Toutefois, l'utilisation d'un très grand nombre de variables explicatives peut mener à un résultat qui semble bien performer sur la période de calibration, mais qui ne sera pas apte à prévoir des conditions nouvelles. Ce phénomène s'appelle « surapprentissage » (*overfitting*, en anglais). Il s'agirait d'un modèle statistique qui contient plus de paramètres que ne peuvent le justifier les données.

Afin de pallier cette problématique, une sélection par élimination en arrière (*backwards stepwise selection*, en anglais) a été utilisée. Cette technique consiste à effectuer les étapes suivantes :

1. Effectuer une régression linéaire avec toutes les variables explicatives disponibles.
2. Retirer la variable la moins significative (p-value le plus élevé).
3. Répéter les étapes 1 et 2 jusqu'à ce que toutes les variables soient significatives (p-value < 0.05) et qu'il y ait moins de 15 variables.

Par rapport à d'autres méthodes similaires de régression linéaire multiple, tel que la sélection avancée pas à pas (*forward stepwise selection*) ou mixte (*mixed stepwise selection*), la sélection par élimination en arrière est recommandée puisqu'elle minimise les problèmes liés à cette méthodologie, soit le danger d'exacerber la colinéarité et le danger de surapprentissage (Halinski & Feldt, 1970; Cohen & Cohen, 1983; Pedhazur, 1997; Cramer, 1998; Tabachnick & Fidell, 2001; Stevens, 2002; Leech, Barrett & Morgan, 2008). L'utilisation de technique plus complexes et souvent recommandé, lorsque possible.

Afin d'évaluer la robustesse des régressions, une calibration supplémentaire par autoamorçage (*bootstrap*, en anglais) a été effectuée. L'autoamorçage est une méthode consistant à ré-échantillonner à maintes reprises un ensemble de données afin d'évaluer la capacité du modèle à prévoir les données qui ont été retirées de l'ensemble. Concrètement, cela signifie qu'à 10 000 reprise, un tiers des années observées (13 ans) ont été retirées. À chaque boucle, une nouvelle régression linéaire multiple a été calculée sur le sous-ensemble de variables identifiées précédemment, la capacité prédictive du modèle a été évaluée et les coefficients ont été gardés en mémoire. Les résultats sont concluants à plusieurs stations (Figure 16).

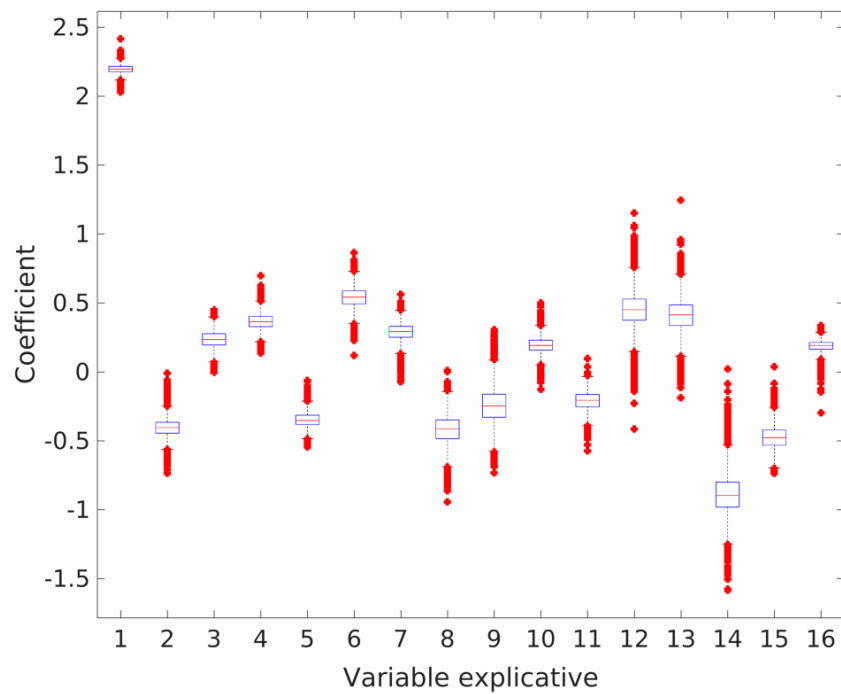


Figure 16. Coefficients associés à 16 variables itératives pour 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits moyens sur 14 jours à la station « 15540 – Montréal, rue Frontenac ». À chaque itération, 13 années au hasard sont retirées.

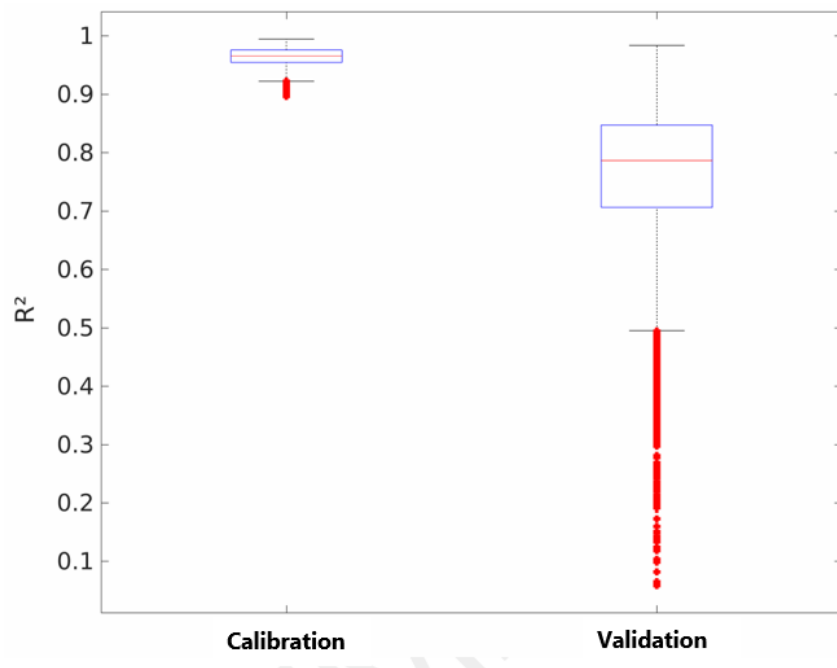


Figure 17. Résultats de 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits moyens sur 14 jours à la station « 15540 – Montréal, rue Frontenac ». À chaque itération, 13 années au hasard sont retirées.

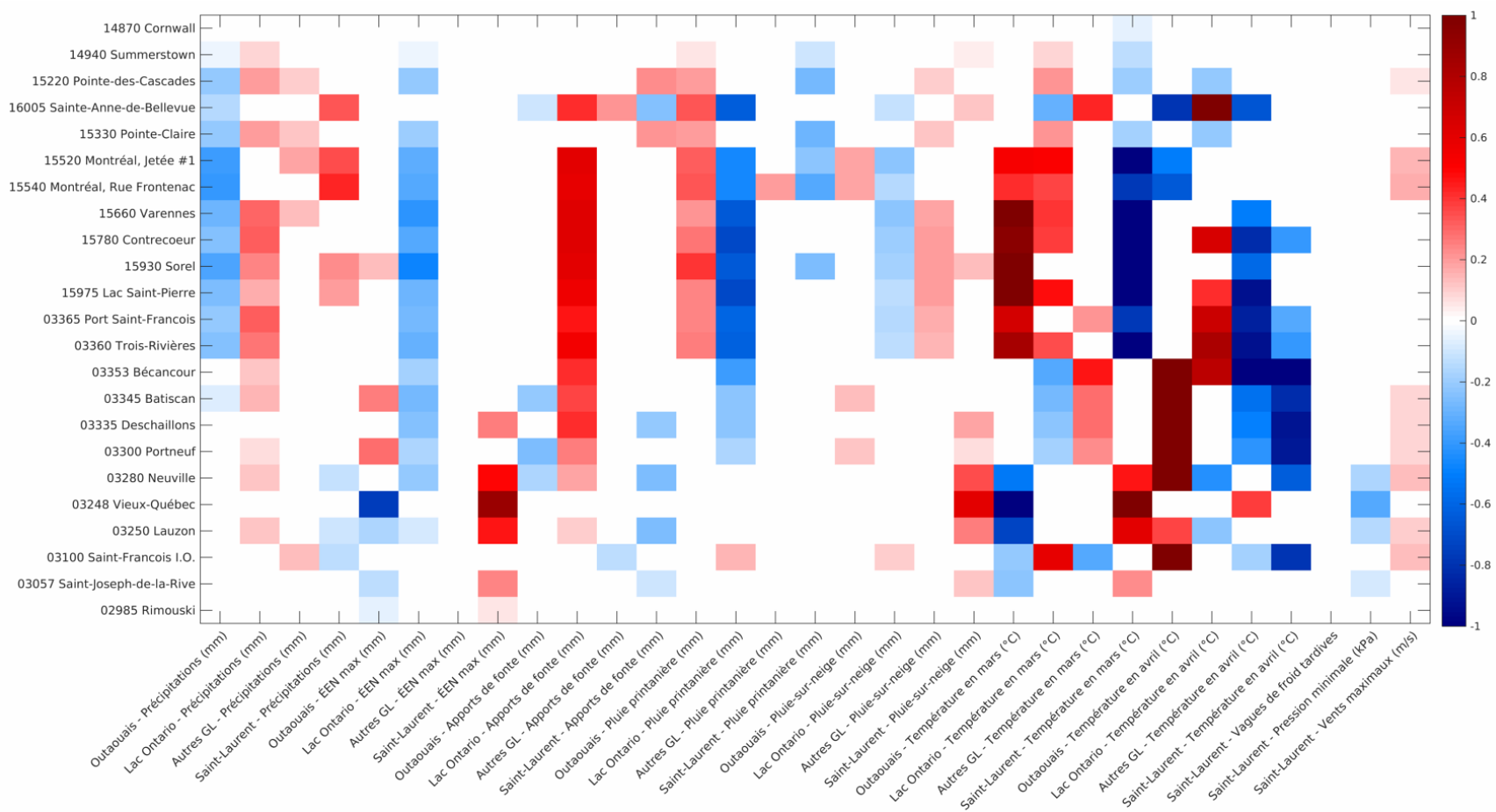


Figure 18. Coefficients moyens identifiés par les 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits maximums sur 1 jour.

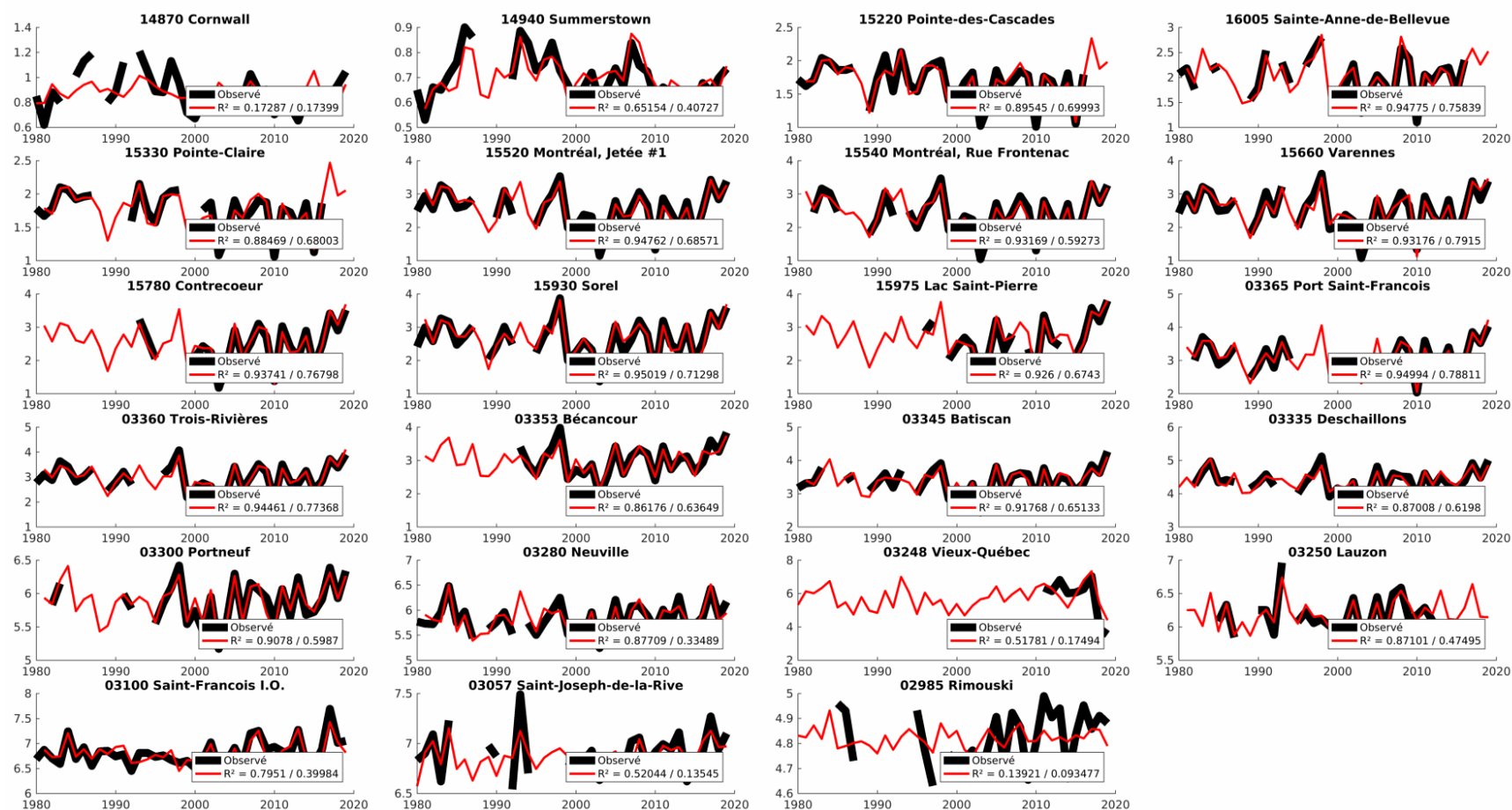


Figure 19. Comparaison entre les débits observés (noir) et simulés (rouge) pour les débits maximums sur 1 jour le long du fleuve Saint-Laurent. Dans la légende, les chiffres indiquent le R^2 médian de calibration et de validation pour les 10 000 itérations.

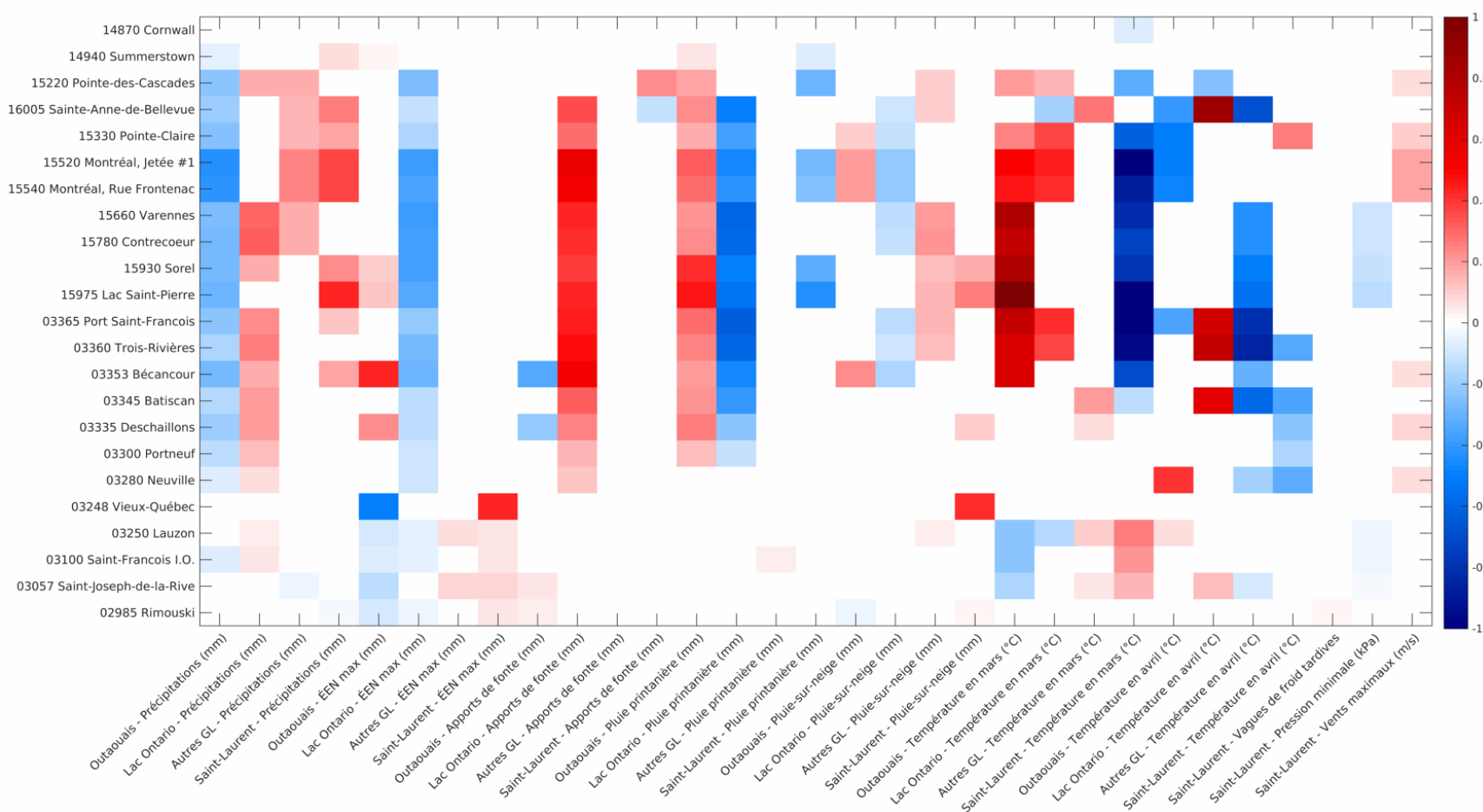


Figure 20. Coefficients moyens identifiés par les 10 000 itérations de la régression linéaire multiple, pour les débits maximums sur 14 jours.

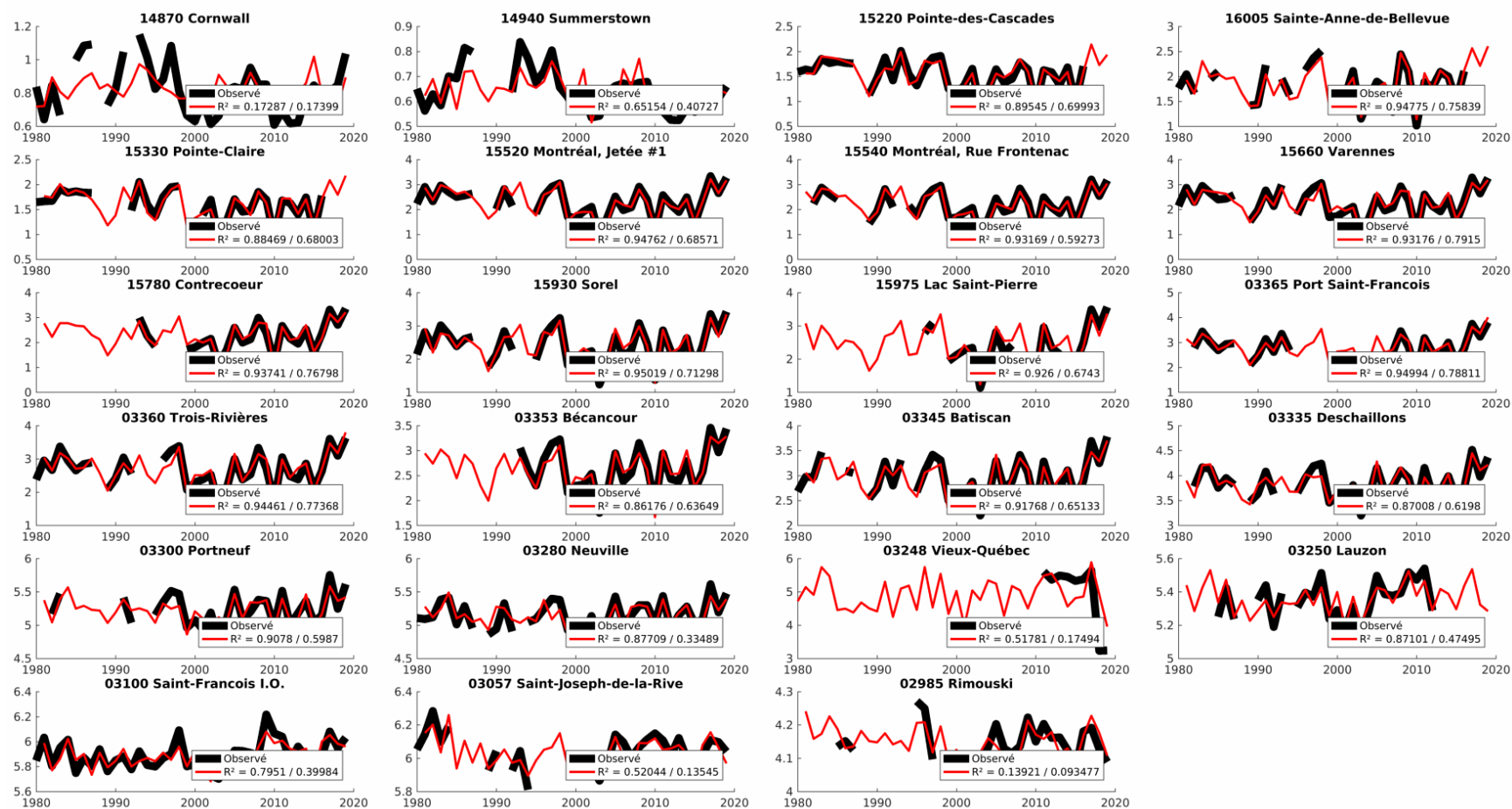


Figure 21. Comparaison entre les débits observés (noir) et simulés (rouge) pour les débits maximums sur 14 jours le long du fleuve Saint-Laurent. Dans la légende, les chiffres indiquent le R^2 médian de calibration et de validation pour les 10 000 itérations.

Quelques conclusions intéressantes peuvent être tirées de ce travail. En raison de la très forte régulation du fleuve Saint-Laurent en amont de Montréal, la performance de la régression linéaire est médiocre et le modèle ne parvient pas à reproduire les niveaux d'eau maximums observés. D'une manière similaire, les variables ayant trait aux quantités d'eau perdent graduellement de l'importance en aval de Trois-Rivières. Après Québec, l'influence de ces variables est à peu près nulle. Les vents et la pression atmosphérique, au contraire, gagnent de l'influence en aval de Québec et dans la région de Montréal, là où le fleuve est plus large.

Dans la section fluviale, malgré les résultats légèrement bruités, les quantités de précipitations, les apports de fonte et la pluie printanière ressortent comme des variables d'intérêt. Les quantités de pluie-sur-neige n'ont qu'un impact mitigé, tandis que les quantités de neige ont plutôt une relation inverse qui pourrait s'expliquer par la forte corrélation positive avec les températures en mars pour le bassin versant de l'Outaouais. Le signal quant aux températures est assez bruité, mais semble confirmer l'importance des vagues de froid en mars dans la région du fleuve Saint-Laurent.

Malgré les étapes suivies pour réduire cet aspect, il reste probablement une trop grande colinéarité entre les variables pour que le modèle soit considéré robuste. La pluie printanière en est un bon exemple, avec une corrélation positive pour la pluie dans le bassin versant de la rivière des Outaouais, mais une corrélation négative tout aussi forte dans le bassin versant du lac Ontario. Or, la performance de la régression linéaire chute lorsque le nombre de variables explicatives est réduit ou que les bassins versants sont combinés en une seule variable. Cela démontre la complexité du système Saint-Laurent et la difficulté à le représenter à l'aide d'un modèle purement statistique.

Un test de validation a été effectué en calibrant le modèle sur la période 1980-2017 pour la station 15540 (Montréal, rue Frontenac), et en analysant sa capacité à prévoir les niveaux d'eau en 2018 et 2019. Les niveaux d'eau pour 2018 ont été parfaitement reproduits, autant pour le maximum 1 jour que 14 jours. Pour 2019, le niveau d'eau maximal sur 1 jour a été fortement sous-estimé, tandis que le maximum sur 14 jours se trouvait à mi-chemin entre la moyenne 1980-2017 et le niveau d'eau de 2017. Cela s'explique entre autre par la nature différente des conditions ayant mené à l'inondation de 2019, puisque selon la réanalyse MERRA-2, les quantités de pluie printanière et de pluie-sur-neige étaient largement sous les moyennes.

Compte tenu de ces résultats, il a été décidé de ne pas utiliser la régression linéaire multiple avec les simulations climatiques pour tenter de produire une estimation des niveaux d'eau futurs, puisque le modèle semble peu robuste face à des conditions climatiques extrêmes pour lesquelles il n'a pas été calibré.

RÉFÉRENCES

Cohen, J. & Cohen, P. (1983). Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Cramer, D. (1998). Fundamental statistics for social research: Step by step calculations and computer techniques using SPSS for Windows. New York, NY: Routledge.

Halinski, R. S. & Feldt, L. S. (1970). The selection of variables in multiple regression analysis. *Journal of Educational Measurement*, 7 (3). 151-157.

Leech, N. L., Barrett, K. C., & Morgan, G.A. (2008). SPSS for intermediate statistics: Use and interpretation (3rd ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.

Pedhazur, E. (1997). Multiple regression in behavioral research: Explanation and prediction (3rd ed.). Orlando, FL: Holt, Rinehart & Winston, Inc.

Stevens, J. P. (2002). Applied multivariate statistics for the social sciences (4th ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Tabachnick, B. G. & Fidell, L. S. (2001). Using multivariate statistics (4th ed.). Boston, MA: Allyn and Bacon.



**550, rue Sherbrooke Ouest, 19^{ième} étage
Montréal, Québec
H3A 1B9, Canada**

Tel : 514-282-6464

Fax : 514-282-7131

www.ouranos.ca

Ouranos est né de la vision commune du Gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et d'Environnement Canada, avec le soutien financier de Valorisation-Recherche-Québec en 2001. Intégrant un réseau de quelque 450 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines, le consortium se concentre sur deux grands thèmes : la science du climat et les vulnérabilités, les impacts et l'adaptation. Sa mission est l'acquisition et le développement de connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts ainsi que sur les vulnérabilités socioéconomiques et environnementales, de façon à informer les décideurs sur l'évolution du climat et à les conseiller pour identifier, évaluer, promouvoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation locales et régionales.