



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS POTENTIELS DES BAS NIVEAUX D'EAU DU FLEUVE SAINT-LAURENT DUS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DES OPTIONS D'ADAPTATION

Synthèse des résultats de six études sectorielles

Avril 2016



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS POTENTIELS DES BAS NIVEAUX D'EAU DU FLEUVE SAINT-LAURENT DUS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DES OPTIONS D'ADAPTATION

Synthèse des résultats de six études sectorielles

Avril 2016

AUTEURS

Caroline Larrivée, Ouranos
Claude Desjarlais, Ouranos
René Roy, Ouranos
Nicolas Audet, Ouranos

COLLABORATEURS

Michel Archambault, ESG UQÀM
Claude-Anne Baillargeon, AECOM
Stéphanie Bleau, Chaire de Tourisme Transat ESG-UQÀM / Ouranos
Lucie Boisjoly, AECOM
Chee F. Chan, AECOM
Manon Circé, Ouranos
Claude Comtois, CIRRELT - Université de Montréal
Cédric Coppens, AECOM
Laurent Da Silva, Ouranos
Jérôme Dupras, Université du Québec en Outaouais

Hermann Jaures Enomana, Université de Sherbrooke
Kate Germain, Chaire de Tourisme Transat ESG-UQÀM
Jie He, Université de Sherbrooke
David Huard, Ouranos
Pierre Lefebvre, Chaire de Tourisme Transat ESG-UQÀM
Franck Ndeffo, Université de Sherbrooke
Ünsal Özdilek, Université du Québec à Montréal
Thomas Poder, CRC-CHUS et Université de Sherbrooke
Jean-Pierre Revéret, Université du Québec à Montréal
Brian Slack, CIRRELT - Université de Montréal

MISE EN PAGE

Beatriz Osorio, Ouranos

RÉVISION LINGUISTIQUE (ANGLAIS)

Peter McKinnon

TRADUCTION

Lise Malo

RÉVISEURS

Membres du Comité consultatif du projet

Rapport soumis à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada et au gouvernement du Québec dans le cadre du projet « *Étude économique des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent* », coordonné par Ouranos.

Titre du projet d'Ouranos : Étude économique des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint Laurent

Numéro de projet d'Ouranos : 510019-123

Citation recommandée : Larrivée, C., Desjarlais, C., Roy, R., et Audet, N. (2016).

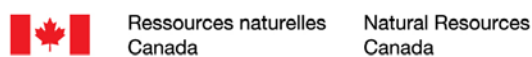
Étude économique régionale des impacts potentiels des bas niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent dus aux changements climatiques et des options d'adaptation. Rapport soumis à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada et au gouvernement du Québec, Montréal, Ouranos, 49 p.

Ouranos et ses partenaires déclinent toute responsabilité quant à l'utilisation du présent document.

Pour plus de renseignements sur les impacts et les mesures d'adaptation aux changements climatiques, veuillez consulter les sites adaptation.rncan.gc.ca et www.ouranos.ca

REMERCIEMENTS

La présente étude a été coordonnée par Ouranos, avec le soutien de la Plateforme d'adaptation aux changements climatiques (Groupe de travail sur la dimension économique de l'adaptation) de Ressources naturelles Canada. Le projet a également obtenu le soutien du Fonds vert du gouvernement du Québec pour la mise en œuvre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques.



Canada



Les auteurs reconnaissent la contribution de tous les collaborateurs ayant participé à cette étude et de toutes les organisations auxquelles les principaux auteurs des études sectorielles sont associés :



AECOM



Université 
de Montréal

CHAIRE

**de tourisme
Transat**

ESG UQÀM

RÉSUMÉ

Les impacts potentiels des changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent, ses écosystèmes et les activités socioéconomiques qui en dépendent sont une source de préoccupation pour de nombreux intervenants du Québec. Diverses études ont attiré l'attention notamment sur la possibilité d'assister à une diminution des niveaux d'eau des Grands Lacs et à des épisodes de plus faibles débits et de bas niveaux dans le Saint-Laurent.

Avec le soutien des gouvernements du Canada (Ressources naturelles Canada) et du Québec (Fonds vert) ainsi que la collaboration d'experts et d'économistes de diverses universités et organisations, Ouranos a coordonné une étude économique régionale sur les impacts potentiels de la baisse des niveaux d'eau et sur des mesures d'adaptation dans six secteurs d'activités directement liés au fleuve Saint-Laurent. Ces secteurs sont : 1) le transport maritime, 2) l'approvisionnement en eau et le traitement des eaux usées des municipalités, 3) les services écosystémiques et la pêche, 4) la navigation de plaisance, 5) la production hydroélectrique et 6) les valeurs foncières des propriétés riveraines. La zone d'étude couvre le fleuve Saint-Laurent entre la frontière Québec-Ontario et Trois-Rivières.

L'étude visait principalement à évaluer les coûts économiques des impacts potentiels des changements climatiques – plus précisément la baisse des niveaux d'eau – sur les six secteurs ciblés; à effectuer des analyses coûts-avantages de diverses mesures d'adaptation pour lesquelles il existe des données adéquates; et à réaliser une analyse intégrée des études sectorielles.

La méthodologie générale est la suivante :

- Produire des scénarios hydroclimatiques hypothétiques sur un horizon de 50 ans (2015-2064);
- Déterminer les impacts potentiels de la baisse des niveaux d'eau pour les six secteurs ciblés et en évaluer les coûts économiques;
- Identifier des options d'adaptation et réaliser des analyses coûts-avantages.

Les résultats suggèrent que les six secteurs d'activités étudiés pourraient être affectés économiquement par des épisodes de bas niveaux d'eau. Les impacts économiques les plus importants seraient associés à la perte de services écosystémiques. Des options d'adaptation ont été identifiées et ont fait l'objet d'analyses coûts-avantages pour trois secteurs : le transport maritime, l'approvisionnement en eau potable des municipalités et les services écosystémiques.

La présente étude a permis de mieux comprendre la vulnérabilité des activités socioéconomiques à la baisse des niveaux d'eau tout en contribuant au développement de méthodologies et de connaissances utiles pour la planification de stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Étant donné l'incertitude des conditions climatiques futures, la complexité du système des Grands Lacs / Saint-Laurent ainsi que les changements socioéconomiques à venir au cours des 50 prochaines années, l'évaluation des impacts économiques des bas niveaux d'eau sur une telle période demeure un défi considérable. Pour appuyer la planification et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation, des mises à jour de la présente évaluation et des études complémentaires portant sur des mesures d'adaptation précises seront nécessaires.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
1. INTRODUCTION	1
2. CONTEXTE ET OBJECTIFS	2
3. SCÉNARIOS CLIMATIQUES	4
3.1 LE SYSTÈME DES GRANDS LACS ET DU FLEUVE SAINT-LAURENT	4
3.2 DESCRIPTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES	5
4. ÉTUDES ÉCONOMIQUES SECTORIELLES	9
4.1 TRANSPORT MARITIME	9
4.2 APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE ET TRAITEMENT DES EAUX USÉES DES MUNICIPALITÉS.....	13
4.3 SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ET PÊCHE	17
4.4 NAVIGATION DE PLAISANCE ET ACTIVITÉS TOURISTIQUES	21
4.5 PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE	25
4.6 VALEURS FONCIÈRES DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES.....	29
5. ANALYSE	32
6. CONCLUSION	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Zone d'étude : tronçon du fleuve Saint-Laurent compris entre Cornwall et Trois-Rivières (excluant les tributaires)	3
Figure 2.	Débit annuel moyen à Sorel pour la période de référence (en noir) et les scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge).	6
Figure 3.	Cycles annuels moyens des scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge) dans les 20 dernières années de la période (2045–2065), comparativement au scénario de référence (en gris) couvrant la période 1990–2010.....	6
Figure 4.	Débits du Saint-Laurent à Sorel selon le scénario de référence (en noir/gris) et les scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge).	7
Figure 5.	Profondeurs obtenues par deux des huit simulations hydrodynamiques. Ces simulations permettent d'établir un lien entre les valeurs de débit à Sorel et les niveaux d'eau ailleurs. Le domaine couvre le tronçon Beauharnois–Trois-Rivières, excluant les rapides de Lachine.	8
Figure 6.	Évolution moyenne des prix à l'exportation par quart-de-mois et différence de production par quartile entre le scénario hypothétique 2 et le scénario de référence.	28

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.	Impacts économiques de bas niveaux d'eau pour la période 2015–2064 selon les trois scénarios (taux d'actualisation de 4 %; en dollars)	10
Table 2.	Coûts actualisés et avantages liés aux trois mesures d'adaptation (en dollars)	12
Table 3.	Sommaire des coûts et avantages des mesures d'adaptation.....	15
Table 4.	Sommaire de l'analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation (en dollars).....	16
Table 5.	Coût total des mesures d'adaptation sur 50 ans (2016-2064), ajusté selon un taux d'actualisation de 4 % par an (en millions de dollars de 2012)	20
Table 6.	Synthèse des valeurs d'usage du lac Saint-Pierre associées aux mesures d'adaptation (en millions de dollars de 2012)	20
Table 7.	Analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation aux changements climatiques (en millions de dollars de 2012)	21
Table 8.	Impacts économiques projetés par chaque scénario, selon un taux d'actualisation de 4 % (en millions de dollars de 2012)	24
Table 9.	Impact total de la variation de production à Beauharnois-Les Cèdres (en millions de dollars de 2012)	27
Table 10.	Valeurs estimatives (2012-2014) et prix de vente (2000-2012) des propriétés dans la région montréalaise.	30

1. INTRODUCTION

Les impacts potentiels des changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent, ses écosystèmes et les activités socioéconomiques qui en dépendent sont une source de préoccupations pour les communautés riveraines et plusieurs acteurs socioéconomiques. Diverses études ont attiré l'attention notamment sur la possibilité d'assister à une diminution des niveaux d'eau des Grands Lacs et à des épisodes de plus faibles débits et de bas niveaux dans le Saint-Laurent.

Pour réaliser cette étude économique régionale, le consortium Ouranos a obtenu le soutien de la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada dans le cadre du programme « Amélioration de la compétitivité dans un contexte de changements climatiques »¹. Le gouvernement du Québec, par l'entremise de son Fonds vert, a également contribué au projet en vue d'évaluer les coûts des impacts des changements climatiques et des adaptations s'y rapportant dans des secteurs clés de l'économie de la province.

D'une durée de deux ans, l'étude s'est concentrée sur les impacts potentiels de la baisse des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent et sur des mesures d'adaptation pour six secteurs d'activité. Ces secteurs sont 1) le transport maritime, 2) l'approvisionnement en eau potable et le traitement des eaux usées par les municipalités, 3) les services écosystémiques et la pêche, 4) la navigation de plaisance, 5) la production hydroélectrique et 6) les valeurs foncières des propriétés riveraines. Des experts et des économistes de diverses universités et organisations ont collaboré avec Ouranos dans la réalisation des six études économiques sectorielles.

Ce rapport présente le contexte et les objectifs du projet global (chapitre 2), les scénarios climatiques sur lesquels s'appuie l'analyse économique (chapitre 3), un survol des résultats des six études sectorielles (chapitre 4), une analyse plus transversale des résultats et des limites de l'étude (chapitre 5) ainsi que les conclusions principales, incluant l'identification de besoins pour des études futures.

Il est à noter enfin qu'une étude semblable a été menée sur la région des Grands Lacs par le *Council of the Great Lakes Region (CGLR)* et le *Mowat Centre for Public Policy Innovation* de l'Université de Toronto, avec le soutien de Ressources Naturelles Canada dans le cadre du même programme. Un rapport complémentaire² compare les deux études et en fait ressortir les différences de même que les leçons et les conclusions communes.

¹ Le consortium Ouranos a obtenu le soutien de la Plateforme d'adaptation aux changements climatiques (Groupe de travail sur la dimension économique de l'adaptation) de Ressources naturelles Canada.

² Desjarlais et Fisher (2016)

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Au Québec, le fleuve Saint-Laurent est un axe de navigation et de développement socioéconomique essentiel à de nombreux usages et activités. Depuis quelques décennies, les impacts potentiels des changements climatiques sur le Saint-Laurent préoccupent de nombreux acteurs et secteurs d'activité. Plusieurs études ont souligné la baisse possible des débits et des niveaux d'eau au cours des prochaines décennies. Au tournant du siècle, des études indiquant une réduction possible d'environ 40 % dans le débit annuel moyen ont soulevé des inquiétudes chez les experts et les utilisateurs (Mortsch *et al.*, 2000). Les étés 1999 et 2001 ont été particulièrement secs, et de nouvelles études ont montré que de faibles débits et niveaux d'eau pourraient poser problème dans les décennies à venir. Certaines de ces études ont cependant revu la fourchette de la baisse des niveaux d'eau (entre -4 et -24 %), tout en mentionnant l'incertitude importante liée à ces projections (Croley, 2003). Depuis, d'autres études hydroclimatiques ont évalué l'évolution probable des apports d'eau dans le système des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Certaines dressent un portrait plus modéré des pertes par évaporation dues aux températures plus élevées (Lofgren *et al.*, 2011). Étant donné la complexité du régime hydrique des Grands Lacs et du Saint-Laurent, une forte incertitude demeure quant à notre compréhension de l'influence des changements climatiques, mais il semble raisonnable d'anticiper une baisse des apports et des épisodes de bas niveaux d'eau dans le Saint-Laurent.

Diverses études, en particulier celles réalisées par la Commission mixte internationale et le Groupe d'étude international sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent, ont examiné les impacts potentiels des fluctuations de niveaux d'eau sur les usages humains et les milieux naturels. Ces études avaient pour objectif d'appuyer l'élaboration et l'évaluation de nouveaux plans de régularisation afin d'établir un meilleur équilibre entre les divers intérêts en jeu dans le système du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Elles ont fait ressortir les sensibilités et les vulnérabilités de certains milieux naturels et secteurs d'activité aux faibles niveaux d'eau. Cependant, peu d'études se sont penchées sur les aspects économiques des impacts des changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent et des mesures d'adaptation propres aux secteurs d'activité.

Dans cette optique, le projet présenté dans ce rapport visait principalement à évaluer les coûts économiques des impacts potentiels des changements climatiques – plus précisément la baisse des niveaux d'eau – sur les six secteurs ciblés ; à effectuer des analyses coûts-avantages de diverses mesures d'adaptation pour lesquelles il existait des données adéquates ; et à réaliser une analyse intégrée des études pour en cerner les conclusions communes.

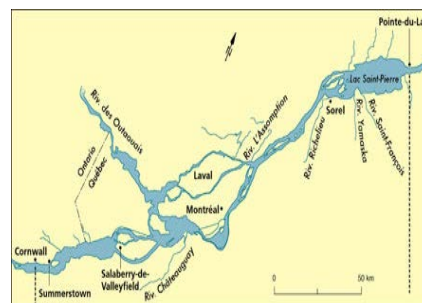


Figure 1. Zone d'étude : tronçon du fleuve Saint-Laurent compris entre la frontière Québec-Ontario et Trois-Rivières (excluant les tributaires)

Comme le précise le résumé ci-dessous et la section suivante, les équipes de recherche ont utilisé certaines hypothèses économiques communes et se sont référés aux mêmes scénarios hydroclimatiques. Diverses méthodologies d'évaluation économique ont cependant aussi été utilisées en fonction des enjeux spécifiques aux secteurs d'activités. Ces méthodologies sont présentées dans les rapports sectoriels finaux.

RÉSUMÉ DE LA MÉTHODOLOGIE ET DES HYPOTHÈSES

Baisse des niveaux d'eau

Les impacts des changements climatiques projetés sur le fleuve Saint-Laurent sont variés et complexes. Cette étude porte essentiellement sur les impacts de bas niveaux d'eau et les mesures d'adaptation s'y rapportant. Elle ne traite pas d'autres impacts possiblement liés aux changements climatiques, comme les inondations, l'érosion et la qualité de l'eau.

Zone d'étude

La zone étudiée se limite au tronçon du Saint-Laurent compris entre la frontière Québec-Ontario et Trois-Rivières. Certaines études sectorielles ont porté sur de plus petits segments du fleuve (p. ex., le lac Saint-Pierre).

Scénarios et période visée

L'analyse des impacts et des mesures d'adaptation se rapporte à trois scénarios hydroclimatiques : un scénario de référence s'appuyant sur des données historiques, et deux scénarios hypothétiques (*what-if scenarios*) couvrant une période de 50 ans (2015-2064). Ces scénarios sont étroitement liés aux observations historiques et aucune probabilité ne leur est associée. La méthodologie qui s'applique à ces scénarios est présentée dans la prochaine section.

Impacts et mesures d'adaptation

La détermination des impacts potentiels de la baisse des niveaux d'eau et des mesures d'adaptation s'est appuyée sur des revues de littérature, l'analyse de données existantes et dans certains cas la modélisation d'impacts. Pour certaines études sectorielles, des enquêtes sur le terrain et des sondages en ligne ont été effectués afin d'obtenir des données complémentaires. Des experts et des intervenants ont été consultés pour déterminer ou valider les impacts et les mesures d'adaptation.

Analyses coûts-avantages

Les coûts des impacts potentiels de la baisse des niveaux d'eau ont été évalués pour les six secteurs économiques étudiés. Les coûts et les avantages des mesures d'adaptation ont été quantifiés pour trois secteurs, soit le transport maritime, l'approvisionnement en eau des municipalités et les services écosystémiques et la pêche. Un ensemble d'hypothèses communes a été développé afin de rendre les études sectorielles comparables. Notamment, les analyses ont été réalisées dans une perspective de statu quo plutôt que de scénarios socioéconomiques projetés; l'année 2012 a été retenue comme année de référence pour les calculs en dollars constants, et le taux d'actualisation appliqué aux analyses sectorielles était de 4 % avec, dans certains cas, des analyses utilisant des taux de 2 et de 6 %.

3. SCÉNARIOS CLIMATIQUES³

Pour réaliser les analyses économiques de façon cohérente, Ouranos a préparé des scénarios de conditions hydrologiques communs pour toutes les études sectorielles.

Divers types de scénarios climatiques sont utilisés dans les études d'impacts et d'adaptation⁴. Ce projet-ci visait à évaluer les conséquences économiques de faibles débits potentiels sur le fleuve Saint-Laurent et, si possible, à déterminer et à comparer des mesures d'adaptation. Les scénarios retenus présentent divers futurs plausibles.

3.1 LE SYSTÈME DES GRANDS LACS ET DU FLEUVE SAINT-LAURENT

Comprendre et modéliser la réponse des Grands Lacs aux impacts des conditions climatiques changeantes comportent plusieurs défis. Entre autres, il est difficile de faire la distinction entre les influences des conditions climatiques et des interventions humaines, notamment lorsque les données observées se rapportent à la construction d'ouvrages de contrôle, de centrales hydroélectriques, d'écluses et de canaux.

La compréhension du rôle de l'évaporation et de la condensation est un autre défi. Les cinq lacs couvrent une superficie de 244 000 km², soit le tiers environ du bassin versant total (750 000 km²). Comme le ratio lac/terre est élevé, le rôle des processus s'opérant à l'interface air-eau (évaporation, condensation, formation de glace) est beaucoup plus important que dans d'autres bassins versants. Par ailleurs, l'effet de l'évaporation est contre-intuitif : en règle générale, les taux d'évaporation nette sont à leur minimum en juin et à leur maximum en janvier (Ehsanzadeh *et al.*, 2013). Les Grands Lacs, sauf le lac Érié, sont si grands et profonds que leurs eaux demeurent relativement fraîches en été. Une partie de l'air chaud et humide se condense et précipite, compensant ainsi les pertes d'évaporation qui surviennent dans les périodes sèches. À l'inverse, l'air froid et sec absorbe l'humidité des lacs relativement chauds en l'absence d'une couche de glace hivernale. Dans les premiers modèles hydrologiques des Grands Lacs, on calculait l'évaporation en utilisant une approche simple fondée sur les températures de l'air. L'application de ces modèles aux scénarios futurs qui incluent des températures de l'air plus chaudes produit des taux d'évaporation plus élevés et, parfois, des niveaux d'eau extrêmement bas. De récentes études tenant compte des transferts d'énergie entre l'air et l'eau fluviale brossent un portrait plus modéré des pertes par évaporation dues à des températures plus élevées (Lofgren *et al.*, 2011).

³ Le contenu de cette section provient principalement du rapport *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : Description des scénarios climatiques*, préparée par Huard (2016).

⁴ Pour plus d'information, voir le rapport complet de Charron (2014), le Guide sur les scénarios climatiques : utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation à www.ouranos.ca.

Ces considérations entraînent d'importantes incertitudes quant aux conditions climatiques et hydrologiques futures pour le système des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Plutôt que d'examiner un vaste ensemble de conditions climatiques futures, le présent rapport s'appuie sur deux scénarios hypothétiques plausibles qui pourraient affecter les utilisations futures de l'eau.

3.2 DESCRIPTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Les deux scénarios climatiques hypothétiques produits dans le cadre de la présente étude explorent des futurs possibles pour le fleuve Saint-Laurent.

Le scénario hypothétique 1 a été établi à partir du Modèle couplé climatique global canadien de deuxième génération (MCCG2) du Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat pour la période 2040–2069; des variables climatiques simulées ont servi à modifier les données météorologiques observées de 1961 à 1990. Les séries de températures et de précipitations synthétiques décrivant un futur plus chaud ont été entrées dans le modèle d'écoulement du bassin versant des Grands Lacs (Large Basin Runoff Model) afin de simuler le ruissellement vers des lacs et les échanges entre les lacs, compte tenu des règles de régularisation des débits. Les changements dans le débit des tributaires du fleuve sont évalués en transposant les changements attendus dans le bassin des Grands Lacs aux régions avoisinantes.

Le scénario hypothétique 2 s'appuie sur l'analyse d'un ensemble de simulations du Modèle climatique régional canadien (Music *et al.*, 2015) afin de déterminer les changements attendus dans l'apport net au bassin des Grands Lacs. Les changements mensuels relatifs de l'apport net au bassin ont été transposés aux débits mensuels à Sorel, avec un décalage de deux semaines pour tenir compte du transfert entre le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent.

Dans le premier scénario, les débits moyens diminuent avec le temps, les niveaux hauts et bas étant causés par des fluctuations naturelles. Dans le second scénario, la caractéristique dominante n'est pas le débit moyen, qui n'affiche aucune tendance à long terme, mais le cycle annuel, qui affiche de fluctuations saisonnières plus importantes. Plus précisément, les faibles débits de l'été et de l'automne baissent encore plus, tandis que les débits hivernaux augmentent.

Les deux scénarios couvrent la période 2015–2064. Dans le scénario 1, les débits diminuent graduellement et atteignent des conditions critiques dans les années 2040 – qui rappellent celles des années 1960 – et n'augmentent que partiellement par la suite. Durant cette période, le cycle annuel s'aplatit; la crue printanière se produit plus tôt et s'affaiblit. Dans le scénario 2, les débits diminuent rapidement et atteignent leur point le plus bas dans les années 2020 avant de revenir à des niveaux historiquement élevés, puis de diminuer peu à peu encore une fois. Le cycle annuel s'amplifie progressivement sur la période de 50 ans, avec des minima annuels qui diminuent en août et septembre. Ce sont souvent ces minima, plutôt que les moyennes annuelles, qui suscitent le plus d'attention et rendent nécessaire la mise en œuvre de mesures d'adaptation.

Ces scénarios ont d'importantes conséquences sur les analyses économiques, car les impacts qui ne surviennent qu'à la fin de la période étudiée (50 ans) entraînent des coûts potentiels actualisés nettement moins élevés. La figure 2 montre le débit annuel moyen à Sorel pour la période de référence et les deux scénarios hypothétiques.

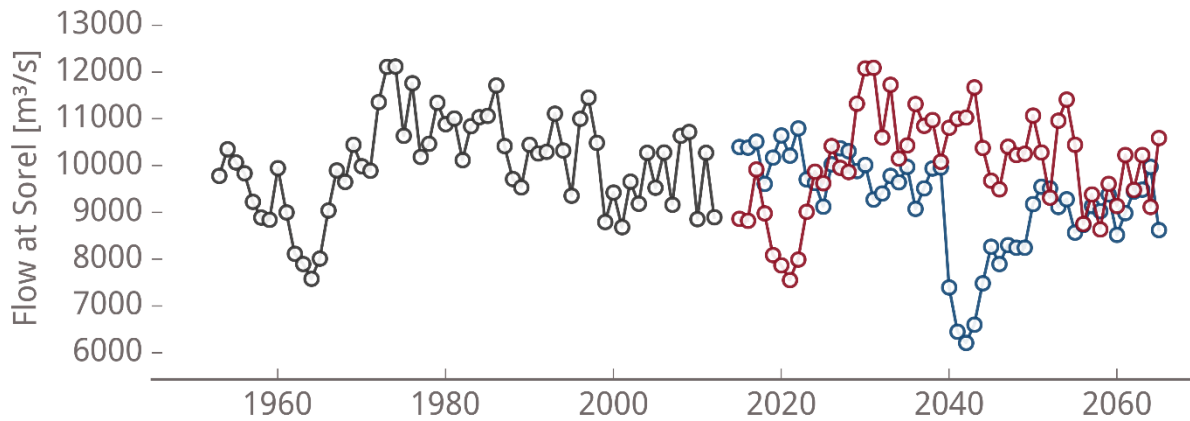


Figure 2. Débit annuel moyen à Sorel pour la période de référence (en noir) et les scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge).

La figure 3 montre les hydrogrammes annuels moyens du scénario de référence auquel ont été ajoutés les deux scénarios hypothétiques, illustrant la hausse progressive dans le cycle annuel du scénario hypothétique 2.

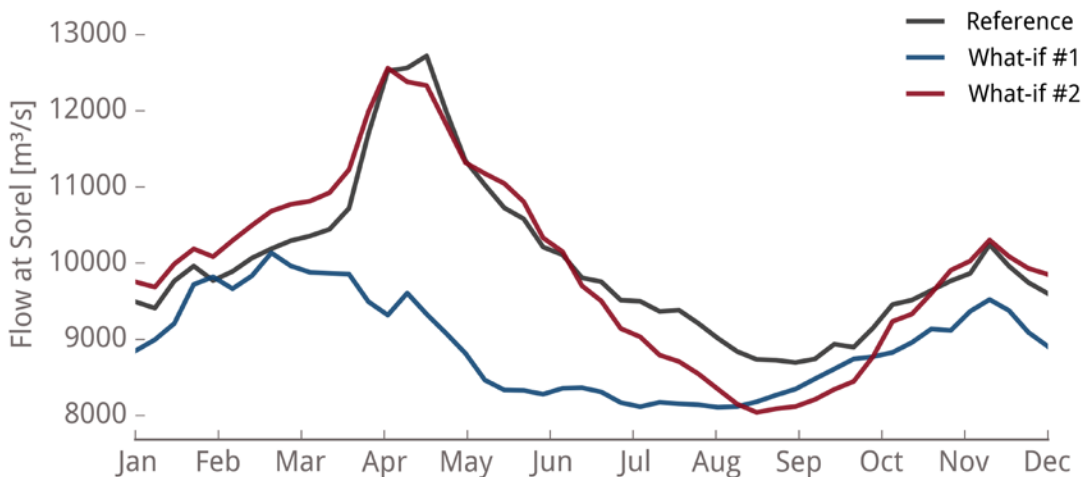


Figure 3. Cycles annuels moyens des scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge) dans les 20 dernières années de la période (2045–2065), comparativement au scénario de référence (en gris) couvrant la période 1990–2010.

La figure 4 montre les débits du Saint-Laurent à Sorel selon le scénario de référence (en gris), et les scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge). Le scénario hypothétique 1 prévoit de bas niveaux d'eau critiques pour la période 2040–2045; le scénario hypothétique 2 prévoit de bas niveaux d'eau pour 2020.

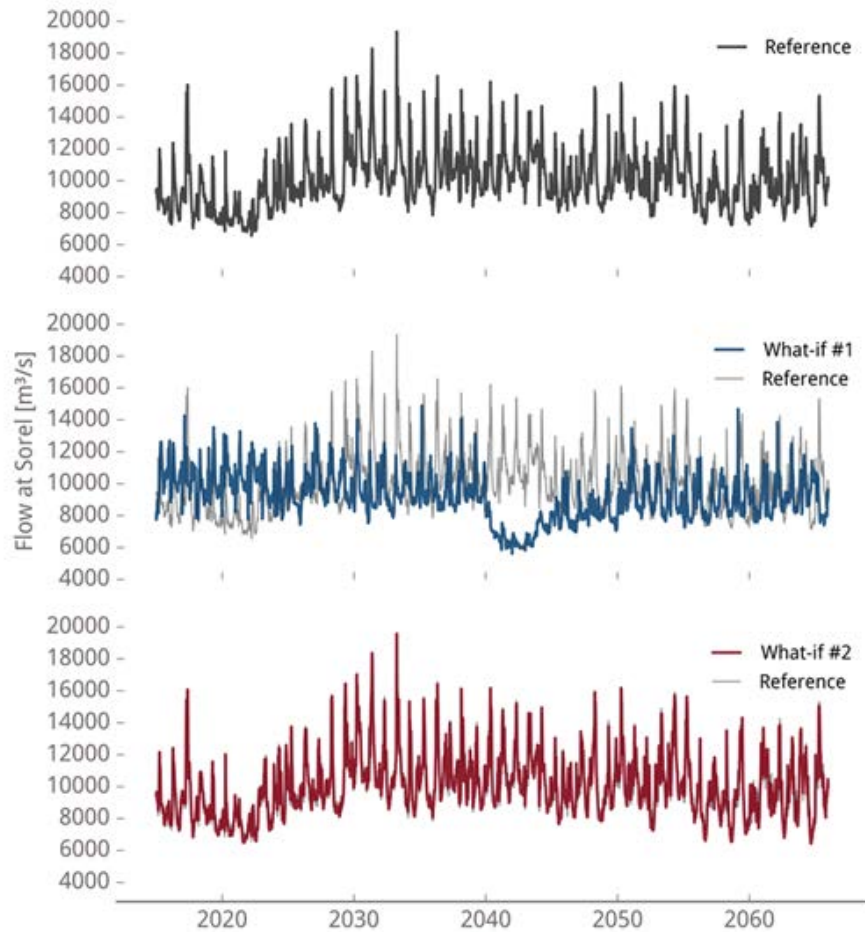


Figure 4. Débits du Saint-Laurent à Sorel selon le scénario de référence (en noir/gris) et les scénarios hypothétiques 1 (en bleu) et 2 (en rouge).

Les deux scénarios hypothétiques s'appuient sur des études existantes en hydrologie et en science du climat. Le premier scénario est fondé sur des scénarios de débit créés en 2004 dans le cadre d'une étude de la Commission mixte internationale (Mortsch *et al.*, 2005). Même si le modèle et la méthodologie remontent à plus d'une dizaine d'années, ils ont été utilisés dans de nombreuses études d'impacts environnementaux et économiques ayant contribué à enrichir la littérature au cours des dernières années. C'est l'une des raisons pour lesquelles ce scénario a été retenu.

Le second scénario s'appuie sur les simulations climatiques régionales des changements futurs de l'apport net au bassin des Grands Lacs, soit le bilan hydrique total de la région. Bien qu'aucun consensus ne semble se dégager des simulations, celles-ci laissent entrevoir une amplification du cycle annuel, l'apport d'eau étant plus important en été qu'en hiver.

Les scénarios doivent être plausibles non seulement du point de vue de la climatologie, mais aussi de l'hydraulique. Certaines analyses économiques présentées ici font référence aux débits, et d'autres aux niveaux d'eau correspondants. De plus, diverses entreprises le long du Saint-Laurent ont besoin des données de débits et de niveaux d'eau, notamment les marinas, les usines de traitement des eaux, les centrales, etc. Comme le rapport entre les débits et les

niveaux doit être aussi réaliste que possible et spatialement cohérent, des simulations hydrodynamiques du Saint-Laurent ont été utilisées. Effectuées par le Service météorologique du Canada à l'aide du modèle HYDROSIM (Leclerc *et al.*, 1995), ces simulations dressent un portrait bidimensionnel statique des niveaux d'eau le long de segments du fleuve Saint-Laurent selon des conditions de débit particulières. Celles-ci comprennent les débits entrants du lac Ontario, de la rivière des Outaouais, de la rivière Saint-Maurice, de la rivière Saint-François et d'autres tributaires. À partir de huit simulations de débits allant de 5 000 à 20 500 m³/s, il est possible d'évaluer les niveaux correspondants à des débits précis. Par exemple, la figure 5 montre les résultats de profondeur obtenus par deux des huit simulations hydrodynamiques.

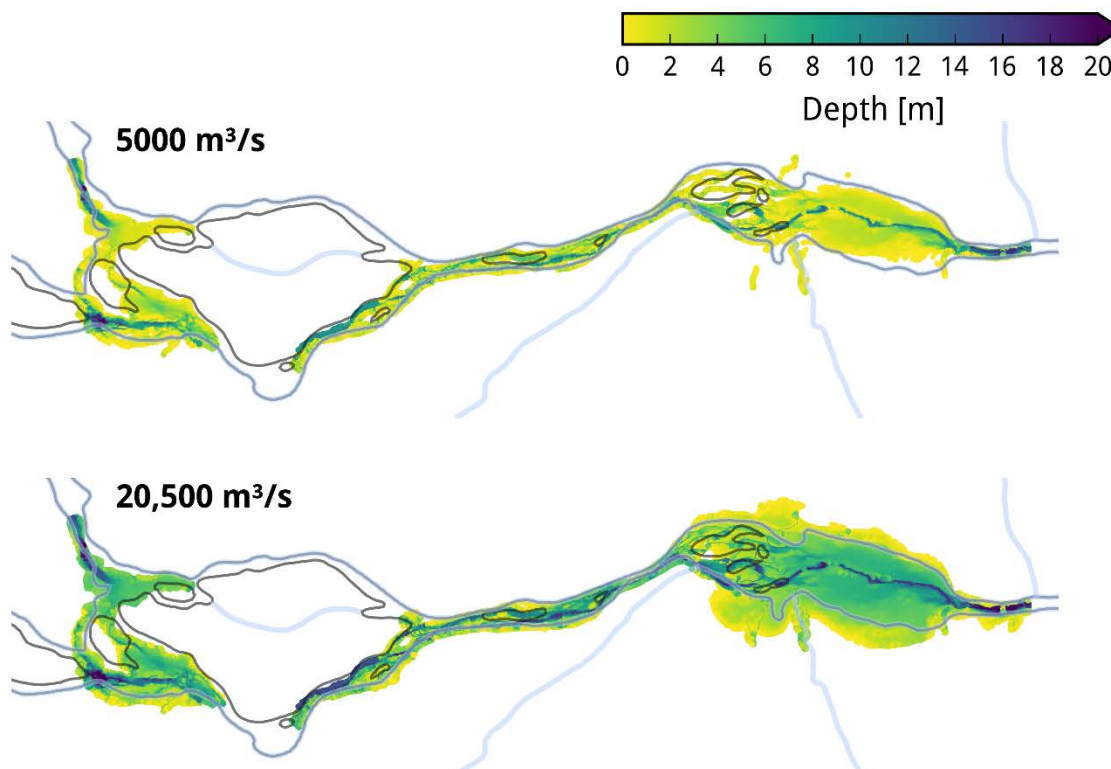


Figure 5. Profondeurs obtenues par deux des huit simulations hydrodynamiques. Ces simulations permettent d'établir un lien entre les valeurs de débit à Sorel et les niveaux d'eau ailleurs. Le domaine couvre le tronçon Beauharnois–Trois-Rivières, excluant les rapides de Lachine.

4. ÉTUDES ÉCONOMIQUES SECTORIELLES

La présente section résume les résultats des six études qui portent sur les secteurs suivants : le transport maritime; l'approvisionnement en eau potable et le traitement des eaux usées des municipalités; les services écosystémiques et la pêche; la navigation de plaisance et les activités touristiques; la production hydroélectrique; et les valeurs foncières des propriétés riveraines.

4.1 TRANSPORT MARITIME⁵

Étroitement lié à la croissance économique, le transport maritime joue un rôle essentiel dans le système de distribution de marchandises à l'échelle mondiale en ce qu'il permet de déplacer sur de longues distances des volumes importants de marchandises à un coût relativement faible. Les nombreuses routes qui sillonnent les océans témoignent de la mondialisation de cette industrie. Plus de 75 % des industries québécoises se situent en bordure ou à proximité du Saint-Laurent, et bon nombre d'entre elles utilisent le fleuve comme voie commerciale.

Depuis 1970, le tonnage mondial transporté par mer a plus que doublé. En 2012, plus de 9 milliards de tonnes de marchandises ont transité par mer (UNCTAD, 2013). Depuis les années 1990, le taux de croissance du volume des exportations mondiales de marchandises surpasse celui de la production économique mondiale. À l'évidence, les systèmes portuaires doivent s'adapter aux besoins du trafic. En 2012, le cabinet de services-conseils ADEC a calculé que les charges d'exploitation et les investissements directs, indirects et dérivés de l'industrie maritime de Montréal seulement représentaient une contribution annuelle de 751,8 millions de dollars au produit intérieur brut du Québec (ADEC, 2012). Cette somme ne comprend pas les revenus fiscaux versés aux gouvernements provincial et fédéral se rapportant aux salaires et diverses charges sociales (assurance-emploi, RRQ CSST, etc.)

L'impact des changements climatiques pourrait être significatif. Selon la plupart des projections, des changements dans le type, le volume, la saisonnalité et la distribution des précipitations affecteront les débits et les niveaux d'eau des voies navigables et, par conséquent, le commerce maritime.

4.1.1 IMPACTS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La présente étude s'intéresse aux impacts des niveaux d'eau sous la barre du zéro des cartes (le niveau à marée basse figurant sur les cartes de navigation) sur la capacité de transport des navires porte-conteneurs navigant sur le Saint-Laurent. Elle pose comme hypothèse que de faibles niveaux d'eau limiteraient cette capacité. La mesure standard de la capacité de transport maritime est l'équivalent vingt pieds (EVP); pour un navire, la perte d'un EVP représente une

⁵ Le contenu de cette section provient principalement du rapport *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet transport maritime*, préparé par Comtois et Slack (2016).

perte de revenus de 373 \$. Les conséquences économiques des scénarios décrits dans la présente étude sont établies selon un taux d'actualisation de 4 % par année.

Considérant des études réalisées par D'Arcy *et al.* (2005) et l'Institute of Water Resources, de même que les données utilisées par Transport Québec concernant la perte potentielle de capacité de cargo due à la diminution de la profondeur d'eau, trois hypothèses ont été retenues⁶.

Hypothèse 1

- Perte de 3,8 EVP par cm d'eau sous le zéro des cartes

Hypothèse 2

- Perte de 6,0 EVP par cm d'eau sous le zéro des cartes

Hypothèse 3

- Perte de 11,5 EVP par cm d'eau sous le zéro des cartes

Comme pour les autres études sectorielles, trois scénarios ont été utilisés : un scénario de référence (données historiques) et deux scénarios hypothétiques.

Dans le scénario de référence, la navigation au port de Montréal serait touchée par de bas niveaux d'eau environ 1 766 jours durant la période 2015–2064 (environ 10 % du temps). Selon l'analyse de la variation des niveaux, les niveaux d'eau sous le zéro des cartes seraient plus fréquents dans les périodes 2015–2024 et 2055–2064.

Le tableau suivant résume les impacts économiques de chaque scénario.

Table 1. Impacts économiques de bas niveaux d'eau pour la période 2015–2064 selon les trois scénarios (taux d'actualisation de 4 %; en dollars)

Hypothèse	Coût total (2015-2064)		
	Scénario de référence	Scénario hypothétique 1	Scénario hypothétique 2
H 1 (3,8 EVP)	29 087 890	69 975 299	38 715 802
H 2 (6,0 EVP)	45 928 247	110 487 315	61 130 215
H 3 (11,5 EVP)	88 029 141	211 767 354	117 166 245

Selon le scénario de référence, les impacts économiques projetés pour la période de 50 ans se situent entre 20 et 88 millions de dollars. Selon le scénario hypothétique 1, les bas niveaux d'eau toucheraient la navigation au port de Montréal environ 22 % du temps, soit quelque 4 040 jours dans la période 2015–2064. Les niveaux d'eau sous le zéro des cartes seraient plus fréquents dans la seconde moitié de la période. Les impacts économiques projetés pour la période de 50 ans se situent entre 69 et 211 millions de dollars, comme le montre le tableau 1. Selon le scénario hypothétique 2, les bas niveaux d'eau toucheraient le port de Montréal

⁶ Voir le rapport complet de Comtois et Slack (2016).

environ 11 % du temps, soit 2 080 jours, et les niveaux sous le zéro des cartes seraient plus fréquents dans les périodes 2015–2025 et 2055–2064. Les impacts économiques de ce scénario se situent entre 38 et 117 millions de dollars.

Les trois scénarios indiquent des baisses périodiques et temporaires des niveaux d'eau sous le zéro des cartes au port de Montréal. Une baisse des niveaux d'eau affecte la capacité de chargement des navires, le détournement du trafic, les transferts modaux et la fluctuation des volumes de stocks. Ces impacts soulignent l'importance de déterminer et de quantifier les mesures d'adaptation relatives au transport maritime.

4.1.2 MESURES D'ADAPTATION POTENTIELLES

L'étude a identifié quatre principales mesures d'adaptation pour les routes maritimes, les ports et les flottes : 1) le dragage; 2) la construction d'ouvrages; 3) le transfert d'activités portuaires; et 4) la minimisation du dégagement sous quille⁷. Selon la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution⁸), deux mesures obtiennent un score plus élevé : la minimisation du dégagement sous quille et le dragage. Les deux autres coûtent nettement plus cher et entraînent des externalités sociales et environnementales négatives (D'Arcy *et al.*, 2005). La méthode TOPSIS tient compte des critères suivants :

- la capacité de la mesure d'adaptation de répondre aux baisses prolongées des niveaux d'eau sous le zéro des cartes;
- les coûts de la mise en place des mesures d'adaptation à la baisse des niveaux d'eau;
- les externalités sociales et environnementales négatives associées à la mise en œuvre des mesures d'adaptation;
- l'incidence de la mesure d'adaptation sur la compétitivité de la navigation maritime et des activités portuaires durant les épisodes de bas niveaux d'eau.

Le tableau 2 présente l'analyse coûts-avantages de trois mesures : le dragage, la minimisation du dégagement sous quille et une combinaison de ces deux mesures. La mesure retenue pour le dragage de la voie navigable prenait en compte une profondeur accrue de 40 cm. La mesure de minimisation du dégagement sous quille consistait à améliorer les capacités de surveillance et de prévision des niveaux d'eau. Cette mesure, comme la première, permet d'accroître la capacité des navires. Plusieurs analyses coûts-avantages ont été réalisées en lien avec les coûts d'investissement, les coûts environnementaux, la perte d'EPV par cm sous le zéro des cartes, le taux d'actualisation utilisé et la profondeur de dragage requise.

⁷ On entend par dégagement sous quille la distance minimale entre le point le plus bas du navire et le fond du cours d'eau en eau calme. Cette mesure d'adaptation suppose l'amélioration de la surveillance et de la prévision des niveaux d'eau afin de déterminer une bathymétrie à résolution plus fine pour optimiser les routes maritimes.

⁸ TOPSIS est une méthode multicritère. Voir le rapport complet de Comtois et Slack (2016).

Table 2. Coûts actualisés et avantages liés aux trois mesures d'adaptation (en dollars)

Mesure d'adaptation		Scénario de référence	Scénario hypothétique 1	Scénario hypothétique 2
Dragage	Total des avantages (coûts de transport épargnés et avantages environnementaux)	28 110 415	45 764 278	34 903 994
	Total des coûts (dragage, coûts en capital, entretien, décontamination, indemnisation pour l'habitat)	8 764 544	8 764 544	8 764 544
	Valeur actuelle nette	19 345 871	36 999 734	26 139 450
	Ratio coûts-avantages	1:3	1:5	1:4
Dégagement sous quille	Total des avantages	2 0791 859	27 621 521	23 219 766
	Total des coûts	3 248 215	3 248 215	3 248 215
	Valeur actuelle nette	17 543 644	24 373 306	19 971 551
	Ratio coûts-avantages	1:6	1:9	1:7
Dragage et dégagement sous quille	Total des avantages	28 952 058	58 367 216	38 246 762
	Total des coûts	12 012 756	12 012 756	12 012 756
	Valeur actuelle nette	16 940 302	46 354 460	26 234 006
	Ratio coûts-avantages	2:5	1:5	1:3

Suivant le scénario hypothétique 1, la valeur actuelle nette la plus élevée correspond à la solution mixte (dragage et minimisation du dégagement sous quille). Cette mesure permettrait d'épargner 46,4 millions de dollars en frais de transport, contre 37,0 millions pour la mesure de dragage seule et 24,4 millions pour la mesure de minimisation du dégagement sous quille seule. Selon le scénario hypothétique 2, la valeur actualisée nette la plus élevée correspond ici aussi à la solution mixte, bien que la marge soit faible par rapport à la solution de dragage seule (26,2 millions de dollars et 26,1 millions respectivement). Dans ce scénario également, la solution de minimisation du dégagement sous quille offre un meilleur ratio coûts-avantages étant donné les coûts moins élevés.

Des analyses de sensibilité prenant en compte un dragage plus profond et des coûts plus élevés pour la minimisation du dégagement sous quille modifient les résultats et l'ordre de préférence des mesures. Par exemple, un coût plus élevé pour la minimisation du dégagement sous quille rendrait la mesure de dragage seule plus intéressante économiquement. Notons cependant que ces analyses n'incluent peut-être pas la valeur totale des impacts environnementaux ni l'incidence des impacts sociaux.

4.2 APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE ET TRAITEMENT DES EAUX USÉES DES MUNICIPALITÉS⁹

Le fleuve Saint-Laurent est la principale source d'eau potable de quelque 2,5 millions de personnes et il approvisionne 27 usines de traitement d'eau potable. De ce nombre, neuf usines situées en amont du barrage Beauharnois d'Hydro-Québec ont été exclues de l'analyse¹⁰, car elles puisent de l'eau dans le lac Saint-François. Les niveaux d'eau du lac sont régulés de manière à assurer la navigabilité de la voie maritime du Saint-Laurent et l'approvisionnement des neuf usines¹¹. La zone couverte par l'étude comprend également les 28 usines qui traitent les eaux usées produites par quelque 2,5 millions de personnes et rejettent les effluents dans le Saint-Laurent.

4.2.1 IMPACTS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La baisse des niveaux d'eau due aux changements climatiques pourrait nuire à la capacité des usines de pomper, de traiter et de produire de l'eau potable.

Des niveaux d'eau minimaux dans le fleuve sont requis pour vaincre la perte de charge des conduites d'adduction entre les prises d'eau et le puits d'eau brute. Dans la présente étude, l'impact des bas niveaux d'eau a été évalué en fonction de la capacité de production nominale des usines de traitement des eaux. Une pénurie d'eau potable peut survenir si les niveaux d'eau chutent sous les niveaux requis pour maintenir la capacité de production nominale. De plus, les niveaux minimaux du fleuve doivent être au-dessus des prises d'eau et celles-ci doivent être submergées pour prévenir le brassage de l'eau ainsi que l'encrassement et le colmatage causés par des débris flottants. Par conséquent, l'ampleur d'une pénurie a été évaluée comme étant la différence entre la capacité de production nominale d'une usine et le niveau de production qu'elle peut maintenir quand les niveaux d'eau sont bas. La capacité de production d'eau potable peut également diminuer si les niveaux minimaux d'eau du fleuve ne sont pas suffisants pour assurer la submersion des prises d'eau.

La présente étude a évalué les niveaux minimaux théoriquement requis pour assurer la capacité de production de chaque usine à partir de données techniques tirées de l'étude de Carrière et Barbeau (2004), de données recueillies auprès de 18 usines de traitement des eaux, de calculs de la perte de charge des prises d'eau selon de l'équation Hazen-William, et d'une hauteur de submersion minimale d'un mètre (Brière, 2000) ou de 1 ou 1,5 fois le diamètre de la conduite d'adduction (Knauss, 1987). Ces niveaux minimaux ont ensuite été comparés aux niveaux projetés des trois scénarios hydroclimatiques pour déterminer l'éventualité de pénuries d'eau.

⁹ Le contenu de cette section provient principalement du rapport *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet eaux municipales*, préparé par Chan et al. (2015).

¹⁰ Ces usines sont, d'ouest en est, St-Régis (N.Y.), St-Régis (Qc), Saint-Zotique, Les Coteaux, Coteau-du-Lac, Grande-Île, Salaberry-de-Valleyfield, Pointe-des-Cascades et Beauharnois. Le modèle hydraulique du fleuve utilisé par l'équipe d'Ouranos pour la conception des scénarios ne couvre pas le lac Saint-François.

¹¹ Les 18 usines de traitement des eaux municipales prises en compte dans cette étude sont situées à Bécancour, Berthierville, Candiac, Châteauguay, Contrecoeur, Dorval, Île Perrot, La Prairie, Lachine, Lavaltrie, Longueuil (usines locales, régionales et industrielles), Montréal (usines Atwater et Des Bailleurs), Pointe-Claire, Régie de l'eau de l'Île Perrot, Régie intermunicipale de l'eau potable de Varennes, Sainte-Julie et Saint-Amable (RIEP), Verchères.

L'analyse indique que deux usines d'eau potable pourraient connaître des pénuries au cours de la période étudiée, et six autres usines y seraient vulnérables étant donné des marges de sécurité réduites ou la perte de redondance des prises d'eau. Bien que les projections n'indiquent pas de pénurie d'eau pour ces six usines, leur exploitation dans des conditions sous-optimales réduit leur capacité de prendre en charge d'autres risques potentiels (ex., accidents, panne d'équipement).

La perte de capacité de production d'eau est le principal impact des bas niveaux d'eau. À celui-ci s'ajoutent la dégradation de la qualité de la source d'eau et, en conséquence, le besoin de modifier les processus de traitement pour rendre l'eau potable. Toutes les usines de traitement d'eau visées par l'étude pourraient être affectées par la dégradation de la qualité de l'eau due à la réduction des niveaux et des débits du fleuve. Cependant, l'étude n'a pas quantifié ces impacts en raison d'un manque de données quant à l'incidence des changements climatiques sur les facteurs biophysiques qui influencent la qualité de l'eau (p. ex., température de l'eau, turbidité, croissance et décomposition accrues des plantes aquatiques et des algues).

Les coûts des impacts liés aux pénuries d'eau ont été évalués en fonction d'une répartition proportionnelle des types d'utilisation (p. ex., résidentiel, commercial, industriel) dans les secteurs desservis par les deux usines les plus vulnérables. Plus précisément, le volume estimé de la pénurie a été multiplié par la valeur de l'eau pour chaque type d'utilisation. L'eau potable peut également servir à d'autres fins, notamment aux activités récréatives (p. ex., les centres aquatiques, les piscines), mais ces quantités d'eau étant généralement moins importantes, elles n'ont pas été prises en compte dans l'analyse.

Selon l'étude, l'une des deux usines les plus exposées à des pénuries d'eau pourrait connaître une pénurie d'une semaine une seule fois dans la période de 50 ans. Cela se traduirait par une réduction d'environ 13 % de sa capacité de production et un coût évalué à 3 100 \$ (fourchette de 2 700 à 3 600 \$) en valeur actualisée à un taux de 4 %. Pour la seconde usine, la fréquence et l'intensité des pénuries sont plus prononcées : celles-ci se produiraient 14 fois durant l'été et l'hiver et s'étendraient sur plusieurs semaines. La réduction de la capacité de production nominale journalière pourrait atteindre 4 %, avec un impact économique total de 53 700 \$ (fourchette de 46 200 à 63 200 \$) en valeur actualisée de 2012, à un taux de 4 %. Selon les projections, les pénuries se produiraient seulement dans le cas du scénario hydroclimatique le plus sec des trois scénarios étudiés.

En ce qui concerne le traitement des eaux usées, une baisse des niveaux d'eau pourrait affecter la capacité du fleuve à diluer adéquatement les effluents en plus des déversements d'eaux non traitées. Cela pourrait nuire à des activités en aval des stations d'épuration des eaux usées (p. ex., prises d'eau, baignade, pêche) et dégrader les écosystèmes (p. ex., qualité des habitats aquatiques, biodiversité).

Toutefois, étant donné l'insuffisance de données sur la capacité du Saint-Laurent de diluer adéquatement les effluents des eaux usées, il n'a pas été possible de réaliser une analyse quantitative et économique. Par conséquent, une analyse plus qualitative des impacts sur le rendement des stations d'épuration a été réalisée dans le cadre des scénarios hydroclimatiques. Pour la plupart des stations visées par l'étude, il a été supposé que les débits futurs dépasseraient les minima requis pour assurer une dilution adéquate. Cependant, cela pourrait ne pas s'appliquer aux stations dont les volumes d'effluents sont plus importants. Compte tenu de la nature qualitative et hypothétique de ces conclusions, il n'a pas été possible d'évaluer le coût de ces impacts. Par ailleurs, aucune solution d'adaptation à ces impacts n'a été déterminée.

4.2.2 MESURES D'ADAPTATION POTENTIELLES

Pour quatre des huit usines vulnérables, les mesures d'adaptation comportent généralement la modification ou le remplacement des pompes existantes par des équipements capables de fonctionner à des niveaux d'eau plus bas ainsi que l'agrandissement ou la reconfiguration des systèmes d'adduction afin de réduire le risque de perte de charge et les contraintes hydrauliques. Les coûts en capital de ces mesures ont été évalués et il a été supposé qu'ils pouvaient être pris en charge par les budgets actuels.

Pour trois des huit usines, aucune mesure d'adaptation n'a été déterminée, car leur situation n'a pas été considérée comme étant grave. Cela s'explique en partie par le fait qu'en périodes de bas niveaux d'eau, les usines pourraient fonctionner à pleine capacité en toute sécurité ou mettre en place des procédures opérationnelles additionnelles.

Les mesures proposées comportent comme avantages les économies réalisées grâce aux pénuries évitées ainsi que la sécurisation des systèmes d'approvisionnement en eau. Les coûts de la sécurisation n'ont pas été évalués, car la méthode d'évaluation, soit une étude sur la volonté de payer, dépassait le mandat de l'étude. Le tableau 3 présente les coûts et avantages de la mise en œuvre des mesures d'adaptation.

Table 3. Sommaire des coûts et avantages des mesures d'adaptation

Usine de traitement	Mesures d'adaptation	Coût approximatif \$	Avantages
1	Modifier ou remplacer les pompes existantes	250 000	8 930 \$ et sécurisation du système d'approvisionnement
2	Remplacer les conduites existantes, installer des pompes submersibles	5 250 000	155 700 \$ et sécurisation du système d'approvisionnement
3	Aucune mesure envisagée reposant uniquement sur les contraintes hydrauliques	-	-
4	Données insuffisantes pour déterminer une mesure d'adaptation adéquate	-	-
5	Modifier les vannages du puits de pompage; agrandir et abaisser l'ouverture principale en amont du dégrilleur de la première prise	200 000	Sécurisation du système d'approvisionnement
6	Aucune mesure envisagée reposant uniquement sur les contraintes hydrauliques	-	-
7	Aucune mesure envisagée reposant uniquement sur les contraintes hydrauliques	-	-
8	Renforcer ou agrandir la prise d'eau de la première prise	3 000 000	Sécurisation du système d'approvisionnement

Le tableau suivant résume l'analyse coûts-avantages sur l'horizon de 50 ans, à un taux d'actualisation de 4 %, pour les deux usines les plus vulnérables aux pénuries.

Table 4. Sommaire de l'analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation (en dollars)

Valeur actuelle nette de 4 %, horizon de 50 ans	Usine de traitement 1	Usine de traitement 2
Coûts	109 710	2 303 880
Avantages : pénuries d'eau évitées (scénario 1 seulement)	3 100	53 730
Coûts nets	106 610	2 250 150
Ratio coûts-avantages (C/A)	35:1	42:1

L'analyse montre que les coûts nets de la mise en œuvre de mesures d'adaptation ne sont pas efficaces au plan économique si on ne considère que les impacts des changements climatiques. Les pénuries d'eau attribuables aux changements climatiques entraînent des coûts nets d'environ 100 000 \$ pour l'usine 1 (ratio C/A de 35) et plus de 2,2 millions de dollars pour l'usine 2 (ratio C/A de 42). L'application d'un taux d'actualisation de 2 et de 6 % ne modifie pas les résultats de façon significative. Il est important de souligner que l'évaluation de ces coûts nets repose sur les valeurs d'eau établies pour les types d'utilisation de l'eau potable (c.-à-d., résidentiel, commercial et industriel). Ces valeurs devraient être beaucoup plus élevées pour avoir un effet sur le ratio C/A.

Une analyse de sensibilité a été réalisée en lien avec un incident survenu dans une importante usine de traitement des eaux de la région qui a entraîné une rupture complète de l'approvisionnement en eau pendant plusieurs jours. L'eau en bouteille fournie par la municipalité durant cette période a représenté un coût d'environ 745 000 \$, soit quelque 557 \$/m³ (en dollars de 2012). Si la valeur de cette eau était appliquée aux pénuries projetées des deux usines vulnérables, l'avantage net serait d'environ 19 millions de dollars (ratio C/A de 9). Cependant, cet exemple serait difficilement applicable à la présente analyse car, compte tenu des impacts projetés, la rupture de l'approvisionnement serait partielle, et non complète. Pour cette raison, les valeurs utilisées dans l'analyse originale sont jugées plus pertinentes.

Malgré le fait que les coûts des mesures d'adaptation semblent démesurés par rapport aux coûts des pénuries potentielles, les mesures proposées permettraient de répondre en partie à d'autres enjeux, notamment la demande croissante, la réhabilitation ou le renouvellement des infrastructures ainsi que des améliorations sur le plan de la fiabilité.

Cette étude a permis d'identifier les usines d'eau potable vulnérables aux bas niveaux d'eau du Saint-Laurent. Elle n'a pas toutefois évalué les facteurs biophysiques qui influent sur la qualité de l'eau brute (p. ex., température, turbidité, algues, pollution) et qui peuvent boucher les systèmes d'induction (p. ex., frasil, débris). Il n'a donc pas été possible d'évaluer les coûts liés à ces impacts ni de déterminer des mesures d'adaptation. Les consultations menées auprès des exploitants d'usines ainsi que la documentation existante sur ce sujet (Carrière et Barbeau,

2004; Hudon, 2011) ont permis de souligner l'importance de ces facteurs dans la production d'eau potable. Des études futures devraient s'intéresser à ces facteurs et mesures d'adaptation.

4.3 SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ET PÊCHE¹²

La présente étude sectorielle porte sur la région du lac Saint-Pierre et les services écosystémiques qu'il offre. Avec une longueur de près de 30 km et une largeur de 13 km, le lac Saint-Pierre couvre une superficie d'environ 500 km et représente plus de 40 % des milieux humides le long du fleuve Saint-Laurent (MDDEFP, 2013). Les îles de Sorel, soit 103 îles au total, constituent le plus important archipel du fleuve (Municonsult, 2002). D'une profondeur moyenne de 3 m, excluant le chenal de navigation creusé en son centre, le lac Saint-Pierre est la plus grande plaine inondable d'eau douce du Québec (MDDEFP, 2013). L'écosystème unique du lac est caractérisé par une diversité de milieux humides qui servent d'habitat pour un grand nombre d'espèces fauniques et floristiques : 288 espèces aviaires, soit 72 % des espèces répertoriées dans la province et 79 espèces piscicoles, soit 70 % des espèces de poissons d'eau douce au Québec (MDDEFP, 2013). En raison de son importance écologique, le lac Saint-Pierre a été désigné site Ramsar en 1998 et déclaré réserve de la biosphère en 2000 par l'UNESCO.

Les communautés riveraines du lac Saint-Pierre et les visiteurs de la région bénéficient des services offerts par les écosystèmes du lac grâce à la fourniture de biens matériels, comme les poissons pêchés, et de services de régulation écologique tels que la prévention des inondations et la purification de l'eau. Certains écosystèmes du lac génèrent de l'emploi et des revenus dans le secteur touristique.

Au cours des dernières décennies, l'intégrité de l'écosystème du lac Saint-Pierre a été profondément affectée par les activités humaines dans les bassins versants de ses affluents et sa plaine inondable, causant des pertes d'habitats pour la faune et la flore (MDDEFP, 2013). La qualité de l'eau reste préoccupante dans plusieurs secteurs, et ce malgré les améliorations apportées par des programmes gouvernementaux. Depuis deux décennies, la population de certaines espèces comme la perche commune a décliné à un point tel qu'un moratoire sur la pêche de celle-ci a été adopté en 2012.

Les changements climatiques ont le potentiel d'entraîner des modifications importantes du régime hydrique du lac, avec, entre autres, des crues qui seront probablement plus hâtives et des périodes sèches plus graves. Des épisodes de mortalité massive de poissons reliés à des températures anormalement élevées de l'eau, dont celui qui a été observé en 2001, pourraient aussi être plus fréquents. Ces conditions climatiques changeantes rendront potentiellement de plus en plus complexe la conciliation entre la protection de la biodiversité et le maintien ou le développement de certaines activités pratiquées sur le lac, dont la pêche.

Au cours des dernières années, et plus particulièrement depuis la publication du rapport de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire en 2005 (MEA, 2005), le concept de services écosystémiques s'est imposé pour désigner les nombreux avantages de la biodiversité et des écosystèmes pour les communautés humaines. Ces services sont essentiels au bien-être

¹² Le contenu de cette section provient principalement du rapport *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet services écosystémiques*, préparé par He et al. (2016).

humain et, dans bien des cas, ne peuvent être remplacés par des produits de fabrication humaine (Daily 1997; De Groot, 2002; MEA, 2005).

Du point de vue économique, les résultats de plusieurs travaux publiés dans la dernière décennie montrent que la réelle contribution des écosystèmes au bien-être humain est mal évaluée, ce qui mène à un mauvais usage du capital naturel et à la dégradation de l'environnement (MEA, 2005; TEEB, 2010). Cela s'explique entre autres par la difficulté d'évaluer les impacts économiques des services écosystémiques non marchands. Par conséquent, ces derniers ne sont pas représentés en termes économiques et ne peuvent être facilement intégrés à des outils de prise de décision. Pour remédier à ce problème, des outils et méthodes d'évaluation économique des services écosystémiques non marchands ont été développés dans les dernières décennies (Dupras *et al.* 2013).

Une analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation aux changements climatiques pour la préservation de la pêche sportive et des services écosystémiques au lac Saint-Pierre a été réalisée. Les avantages marchands et non marchands découlant de la pêche sportive et des autres principaux services écosystémiques ont été évalués économiquement, puis les coûts de mise en œuvre de différentes stratégies d'adaptation aux changements climatiques visant à assurer le maintien de ces services ont été comparés.

4.3.1 IMPACTS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le patrimoine naturel du lac Saint-Pierre offre plusieurs services écosystémiques. Cependant, les changements climatiques pourraient affecter les écosystèmes et les services qui y sont associés.

Selon Carignan (2004), les conditions hydrologiques futures du lac Saint-Pierre pourraient ressembler aux conditions observées au cours de la période 1999-2004, à savoir de faibles crues au printemps et de brusques inondations en hiver et en été, et des années très sèches alternant avec des conditions plus près de la normale. Ces nouvelles conditions baisseraient le niveau d'eau et réduiraient la superficie de la plaine inondable. L'assèchement partiel du lac rendra ses rives plus accessibles et donc plus exposées aux activités humaines. En été, des périodes sèches plus prononcées et des niveaux d'eau plus bas seraient à prévoir (MDDEFP, 2013). Les conséquences sur la faune et leurs habitats pourraient être considérables.

Selon les scénarios hypothétiques développés par l'équipe d'Ouranos, il a été supposé que des conditions semblables relativement aux niveaux d'eau pourraient se produire vers la deuxième moitié de la période étudiée ou même plus tôt¹³. Celles-ci entraîneraient une baisse soudaine du niveau du lac Saint-Pierre (entre 30 et 40 cm en moyenne) et une réduction de 10 à 13 % de sa profondeur moyenne actuelle de 3 m. Les baisses seraient accompagnées de variations saisonnières des niveaux d'eau (c.-à-d. des niveaux d'eau bas et élevés) plus prononcées. Les impacts potentiels associés aux scénarios hypothétiques sont qualitativement décrits dans He *et al.* (2016) et portent sur les aspects suivants :

¹³ L'équipe responsable de cette étude sectorielle-ci a abordé les scénarios un peu différemment en examinant des périodes précises de l'horizon de 50 ans. Dans le scénario A, les bas niveaux d'eau sont prévus pour le début de la période et dans le scénario B, ils sont prévus aux environs de 2050. Les scénarios ont été renommés pour éviter toute confusion avec les deux scénarios hypothétiques utilisés dans les autres études.

- zones humides et végétation riveraine
- qualité de l'eau
- faune piscicole
- faune aviaire
- reptiles et amphibiens
- services récréotouristiques

4.3.2 MESURES D'ADAPTATION POTENTIELLES

Pour déterminer les avantages économiques des mesures d'adaptation, deux questionnaires ont servi à évaluer les avantages marchands et non marchands que la population accorde aux services écosystémiques et aux biens du lac Saint-Pierre, dont la pêche sportive. Les questionnaires ont permis de recueillir des données socioéconomiques sur les répondants, leur attitude envers l'environnement, leurs connaissances relatives au lac, les dépenses effectuées lors de leur visite de la région et leur volonté de payer pour l'amélioration des conditions du lac.

Six mesures d'adaptation ont été examinées :

- 1) Restaurer les zones riveraines autour du lac Saint-Pierre afin de réduire l'empiètement par les activités humaines.
- 2) Restaurer les plaines inondables autour du lac Saint-Pierre afin de réduire l'empiètement par les activités humaines.
- 3) Modifier les pratiques agricoles en vue d'améliorer l'utilisation de l'eau et de réconcilier les activités agricoles et la protection de la faune.
- 4) Accroître l'efficacité et la capacité du traitement des eaux usées par les municipalités.
- 5) Protéger et restaurer des habitats pour les espèces menacées ou vulnérables.
- 6) Éduquer et sensibiliser le public.

4.3.3 AVANTAGES ÉCONOMIQUES DES MESURES D'ADAPTATION

Le tableau 5 montre les coûts des mesures d'adaptation proposées. Les trois scénarios (optimiste, médian et pessimiste) s'appuient sur une revue de la littérature et un jugement d'expert quant aux coûts estimatifs de la mise en œuvre des mesures, multipliés par l'étendue de la superficie requise pour compenser l'impact des changements climatiques, exprimés en dollars par km ou par hectare¹⁴. Par exemple, on évalue que le contrôle du roseau commun sur une superficie de 5 000 hectares coûterait entre 63 et 126 millions de dollars.

¹⁴ Voir le rapport complet de He *et al* (2016) pour plus d'information sur les scénarios.

Table 5. Coût total des mesures d'adaptation sur 50 ans (2016-2064), ajusté selon un taux d'actualisation de 4 % par an (en millions de dollars de 2012)

Mesure d'adaptation	Scénario optimiste (M \$)	Scénario médian (M \$)	Scénario pessimiste (M \$)
Restauration des zones riveraines	24,9	32,6	40,2
Restauration de la plaine inondable	89,6	129,6	150,9
Modification des pratiques agricoles	16,8	67,0	368,6
Traitement amélioré des eaux usées	198,8	298,2	397,7
Protection et restauration des habitats	4,5	9,0	13,5
Éducation et sensibilisation	11,2	22,3	33,5
Coût total	345,8	558,7	1 004,4

4.3.4 ANALYSE COÛTS-AVANTAGES

Le tableau 6 montre la valeur d'usage actuelle du lac Saint-Pierre ainsi que les valeurs avec et sans mise en œuvre de toutes les mesures d'adaptation. En combinant les résultats des avantages économiques directs, la valeur d'accès et les droits d'entrée annuels au lac Saint-Pierre, la valeur d'usage totale s'établirait à 419 millions de dollars par année. Ce chiffre reflète principalement la valeur attribuée à la perte évitée de l'usage du lac grâce aux mesures d'adaptation proposées (la prévention des détériorations anticipées est évaluée à 300 millions de dollars par année) et aux gains potentiels dans la valeur d'usage du lac (les améliorations découlant de la mise en œuvre des mesures sont évaluées à 119 millions de dollars par année). À des fins de comparaison, les valeurs correspondantes pour la pêche blanche sont présentées. Le tableau 6 résume les avantages en termes de valeur d'usage associée aux mesures d'adaptation.

Table 6. Synthèse des valeurs d'usage du lac Saint-Pierre associées aux mesures d'adaptation (en millions de dollars de 2012)

Source des valeurs	Population générale (\$/an)	Pêche blanche
Pertes évitées en valeur d'usage	300	41,6
Conséquences économiques	75,8	3,9
Valeur d'accès	224,2	37,7
Gains des mesures en valeur d'usage	119	3,6
Conséquences économiques	24,4	2,6
Volonté de payer pour les droits d'entrée annuels	94,7	1
Total des gains en valeur d'usage	419	45,2

Les gains totaux présentés au tableau 7 reposent sur deux scénarios qui prévoient chacun une période de huit années consécutives de bas niveaux d'eau, soit 2015-2023 (scénario B) et 2040-2048 (scénario A), selon un taux d'actualisation de 4 %. Il est supposé qu'il n'y a pas d'autres conséquences économiques pendant le reste des 50 ans. Les résultats sont très sensibles au taux d'actualisation, comme le montre le scénario de l'occurrence tardive (B) de la baisse du niveau d'eau, qui réduit de façon importante la valeur actuelle nette de la mise en œuvre des mesures d'adaptation. Le tableau montre également que tous les scénarios avec interventions entraînent des avantages totaux nets. Selon cette analyse, la mise en œuvre des mesures d'adaptation serait économiquement rentable, surtout si la baisse du niveau d'eau survient plus tôt dans la période.

Table 7. Analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation aux changements climatiques (en millions de dollars de 2012)

Taux d'actualisation	Avec interventions 4 %	Sans interventions ¹ 4 %
Baisse des niveaux d'eau 2015-2023 (scénario B)		
Avantages totaux	3 271,14	-2341,70
Coûts totaux (scénario pessimiste)	1 004,40	0
Avantages totaux nets	2 266,74	-2 341,70
Baisse des niveaux d'eau en 2040–2048 (scénario A)		
Avantages totaux	1 227,06	-878,44
Coûts totaux (scénario pessimiste)	1 004,40	0
Avantages totaux nets	223,46	-878,44

1. Les scénarios « sans interventions » évaluent les changements potentiels dans les gains totaux liés aux services écosystémiques du lac Saint-Pierre en n'utilisant que la perte de gains associée à la perte de services écosystémiques et de la pêche due aux changements climatiques.

4.4 NAVIGATION DE PLAISANCE ET ACTIVITÉS TOURISTIQUES¹⁵

La présente étude sectorielle porte sur la navigation de plaisance et les croisières-excursions en eaux nationales et internationales.

L'étude s'est appuyée sur une revue de la littérature, des consultations auprès d'experts, des entrevues auprès de gestionnaires et un sondage auprès des plaisanciers. Celui-ci a permis de relever les caractéristiques socioéconomiques des répondants, les types d'embarcations, les intentions de pratique du nautisme dans les prochaines années et les impacts de niveaux d'eau très bas.. Le sondage a également permis de mesurer les connaissances des répondants concernant les mesures d'adaptation déjà mises en œuvre.

¹⁵ Le contenu de cette section provient principalement du rapport *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet nautisme et croisières-excursions*, préparé par Bleau et al. (2016).

On dénombre actuellement 16 entreprises de croisières-excursions dans le secteur étudié. Des impacts très localisés observés pendant des épisodes de bas niveaux d'eau (p. ex. en 2012) sur la rive sud de Montréal ainsi que dans le port de Montréal ont limité l'amarrage et l'accès des passagers aux embarcations. Des impacts sur les infrastructures ont également été observés. Les navires de croisière internationale, cependant, se mettent à quai seulement à Trois-Rivières et à Montréal. Jusqu'à maintenant, les bas niveaux d'eau n'ont pas eu d'effet marqué sur ces activités, car les exploitants de croisières ont facilement mis en place des solutions.

On dénombre 48 marinas et de nombreuses rampes de mise à l'eau publiques et privées dans le secteur étudié. Selon une évaluation réalisée en 2006, le secteur de la navigation de plaisance au Québec génère des retombées annuelles de 2,5 milliards de dollars et plus de 37 000 emplois. Selon les estimations réalisées la même année à l'échelle nationale, 150 000 emplois directs et indirects étaient reliés à ce secteur (NMMA, 2012).

Les données recueillies auprès des exploitants de marinas et des plaisanciers indiquent que la plupart des marinas atteignent chaque saison leur capacité d'accueil maximale et ne peuvent accommoder qu'un nombre limité de nouvelles embarcations, et ce depuis au moins les cinq dernières années. Sans d'importantes améliorations aux installations, seules quelques marinas pourraient augmenter leur potentiel d'accueil en ajoutant de 5 à 30 emplacements à quai ou au mouillage.

Selon les estimations de Lefebvre établies en 2014, 9 162 embarcations (bateaux à moteur et voiliers) naviguent dans la partie supérieure du fleuve Saint-Laurent. De plus, les résultats du sondage indiquent que 85 % des plaisanciers utilisent les installations nautiques existantes (clubs nautiques, marinas, ports, etc.) et que, dans les années à venir, 90 % d'entre eux comptent pratiquer le nautisme au moins aussi souvent que par le passé.

Les gestionnaires de marinas s'attendent à ce que les taux d'occupation resteront inchangés et que les listes d'attente s'allongeront probablement s'ils n'agrandissent pas leurs marinas. Comme le mentionnaient les gestionnaires interviewés, les coûts de réfection des infrastructures maritimes ou de modernisation des installations nautiques excèdent souvent les revenus générés par les marinas, ce qui complique l'adaptation aux conditions hydroclimatiques changeantes.

4.4.1 IMPACTS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Bien que de nombreux facteurs influent sur l'industrie lucrative de la navigation de plaisance¹⁶, les bas niveaux d'eau et les événements extrêmes affectent principalement les infrastructures sensibles aux fluctuations des niveaux d'eau. Des niveaux élevés peuvent inonder les quais, tandis que des bas niveaux assèchent les rampes de mise à l'eau et les marinas, et rendent la navigation plus hasardeuse. Pour assurer la sécurité, les exploitants de plusieurs marinas considèrent que la profondeur idéale de leurs bassins serait d'au moins 7 pieds durant la saison de navigation, avec un seuil critique de 5,5 pieds au zéro des cartes.

Selon l'Association maritime du Québec, bon nombre de plaisanciers ressentent les effets des bas niveaux d'eau, principalement à la fin de l'été et à l'automne, mais aussi à d'autres

¹⁶ Par exemple, le taux de change, la qualité de l'équipement et des installations, le nombre d'emplacements disponibles, l'espace d'entreposage ainsi que les coûts et les préférences des clients.

périodes. Des experts considèrent que l'accessibilité aux différents plans d'eau est limitée par un nombre grandissant de marinas publiques et privées en détérioration. D'importants investissements seraient nécessaires pour améliorer les infrastructures et les équipements, notamment les brise-lames, les jetées, les quais, les pontons de service, les équipements de levage, les bassins et les bers hydrauliques. De tels investissements dépendent en grande partie de la structure de gouvernance et du nombre de membres de la marina.

De faibles niveaux d'eau auraient aussi d'autres types de conséquences, notamment sur le nombre de nuitées, la capacité d'accueil, les services et l'accessibilité, les bris d'équipements nautiques.. En ce qui concerne le risque, la plupart des gestionnaires et des exploitants ont mentionné non seulement l'impossibilité d'assurer les services et la sécurité des utilisateurs, mais aussi de prévenir les dommages aux infrastructures maritimes existantes. De tels dommages ont été associés à des épisodes de très bas niveaux d'eau en haute saison, à la mise à l'eau et à la sortie de l'eau des bateaux. Pour la saison 2013-2014, les dépenses annuelles totales du secteur de la navigation de plaisance ont été évaluées à 4,2 millions de dollars pour les bateaux à moteur et à 450 000 \$ pour les voiliers.

Le nombre d'emplacements à risque varie selon les caractéristiques propres au lieu et peut atteindre jusqu'à 20 % de la capacité d'une marina. La situation pourrait s'aggraver si aucune mesure d'adaptation n'est adoptée en réponse aux conditions climatiques changeantes. Les zones les plus problématiques sont les chenaux secondaires et les entrées des marinas en raison de l'ensablement. Il était difficile pour les exploitants de marinas d'évaluer les pertes et les gains financiers potentiels se rapportant aux quais et aux services liés à la navigation de plaisance.

Selon les résultats du sondage, les dépenses annuelles moyennes des plaisanciers sont de 8 400 \$ pour les propriétaires de bateaux à moteur et de 4 500 \$ pour les propriétaires de voiliers. Les propriétaires de bateaux à moteur consacrent la moitié des dépenses au carburant. Les autres postes de dépenses comprennent l'utilisation d'installations telles que les rampes de mise à l'eau, l'approvisionnement en épicerie (17 % du total) ainsi que l'hébergement et la restauration (12 % du total). Quant aux propriétaires de voiliers, 25 % des dépenses totales sont consacrées à l'approvisionnement en épicerie et 16 % à l'hébergement et la restauration. Même si ces dépenses peuvent être remplacées par d'autres activités touristiques et récréatives, elles représentent néanmoins une perte pour la navigation de plaisance lorsque les niveaux d'eau sont trop bas pour naviguer.

L'analyse démontre que les impacts de la baisse des niveaux d'eau affecteront trois segments du fleuve Saint-Laurent : la région de Montréal (Pointe-Claire), les îles de Boucherville, Contrecoeur (Sorel) et la région du lac Saint-Pierre. Le nombre de jours de bas niveaux d'eau et l'ampleur de la baisse ont été évalués au moyen d'un scénario de référence et de deux scénarios hypothétiques, puis convertis en impacts économiques selon un taux d'actualisation de 4 %.

Les impacts économiques potentiels pour les utilisateurs sont quantifiés comme suit :

- le nombre de jours de navigation perdus, peu importe les conditions climatiques (bonne ou mauvaise température);
- la valeur que les plaisanciers accordent à une journée de navigation;
- les dépenses additionnelles entraînées par les conséquences négatives de bas niveaux d'eau (réparations et adaptations).

Selon les scénarios, au cours des 50 prochaines années, le nombre d'années de baisses prononcées sera peu élevé, mais le nombre de jours de baisse durant ces années sera élevé.

Deux indicateurs ont été retenus pour quantifier le coût de l'impact des niveaux d'eau sur la navigation de plaisance :

1. le nombre de jours perdus par secteur de navigation selon les scénarios hydroclimatiques à l'horizon 2064 (avec analyses de sensibilité relatives aux niveaux potentiels);
2. la volonté de payer (surplus du consommateur) pour une sortie en bateau, selon le sondage réalisé sur le terrain.

Le surplus du consommateur est le principal indicateur ayant servi à calculer les conséquences économiques d'une baisse potentielle des niveaux d'eau. Ce surplus correspond au montant que l'utilisateur aurait accepté de payer si les faibles niveaux d'eau ne l'avaient pas forcé à annuler ou reporter sa sortie.. Le surplus est évalué à partir des résultats du sondage et de la volonté de payer de l'utilisateur.

Table 8. Impacts économiques projetés par chaque scénario, selon un taux d'actualisation de 4 % (en millions de dollars de 2012)

Impact	Scénario de référence	Scénario hypothétique 1	Scénario hypothétique 2
Total en dollars de 2012¹	65	129	142
Impact relatif	référence	129 - 65 = 64	142 - 65 = 77

Les impacts économiques des deux scénarios de changements climatiques s'établissent à 64 et 77 millions de dollars sur l'horizon de 50 ans (en dollars de 2012, selon un taux d'actualisation de 4 %). Le taux d'actualisation modifie légèrement ces résultats. Bien que les sommes semblent peu importantes, les intervenants ont mentionné que des bas niveaux à répétition (baisses de 10 cm ou plus) pourraient rendre impraticable l'accès à certaines installations, nuire considérablement à l'expérience du client, voire ruiner certaines entreprises.. À l'avenir, il faudra donc prendre en considération les impacts économiques associés aux bas niveaux d'eau sur les marinas et autres installations nautiques.

4.4.2 MESURES D'ADAPTATION POTENTIELLES

Les mesures d'adaptation peuvent être de nature structurelle, organisationnelle, politique ou communicationnelle. Les intervenants interviewés (secteurs de la navigation de plaisance et des croisières-excursions) semblaient privilégier les solutions techniques, car celles-ci offrent des réponses à long terme aux fluctuations et à la baisse récurrente des niveaux d'eau. Parmi les solutions possibles, ils ont évoqué souvent le dragage ainsi que la réorganisation et la modernisation des installations maritimes et des ouvrages de protection (ex., jetées et brise-lames). Des mesures plus souples comme l'amélioration du marquage et du balisage pour faciliter l'accès aux quais et prévenir l'échouement sont faciles à planifier et à mettre en œuvre. Si ces mesures sont insuffisantes ou inadéquates, il est possible de déplacer les quais ou de les attribuer aux plaisanciers en fonction des caractéristiques de leur bateau tels que le tirant

d'eau ou d'installer des ponts flottants. Le dragage des canaux et des bassins sont généralement considérés comme des solutions de dernier recours.

Les plaisanciers eux-mêmes pourraient adopter certaines mesures (Bibeault *et al.*, 2004), par exemple naviguer dans des secteurs moins touchés par la baisse des niveaux d'eau, devenir membres d'une autre marina ou modifier leurs pratiques, itinéraires et lieux d'accès (rampes de mise à l'eau, marinas, ports, clubs nautiques). Également, ils pourraient opter pour une embarcation à tirant d'eau moins élevé, surtout dans des secteurs problématiques comme les îles de Boucherville et la rive nord du lac Saint-Louis, où une concentration élevée d'installations nautiques, dont des clubs privés, marinas et rampes de mises à l'eau publiques, sont plus vulnérables aux bas niveaux d'eau.

Il n'a pas été possible de quantifier adéquatement les coûts et les avantages de l'adaptation, en raison notamment du manque de données sur la mise en œuvre des mesures d'adaptation. Certains enjeux font obstacle à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, notamment le financement des coûts en capital, les exigences réglementaires et les intérêts divergents relativement aux propriétés riveraines.

4.5 PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE¹⁷

Parallèlement au transport maritime et à la navigation de plaisance, la production hydroélectrique est l'une des principales activités économiques qui reposent sur les apports en eau du système des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. L'énorme potentiel hydroélectrique du système a eu un impact considérable sur l'industrialisation de l'ensemble de la région. Au total, 15 principaux barrages et centrales sont exploités sur les Grands Lacs et le long du Saint-Laurent, et leur capacité combinée s'établit à plus de 9 000 mégawatts (MW). L'hydroélectricité représente environ le septième de la production nette d'énergie de la région. C'est une source d'électricité plus importante en Ontario (25 %), au Québec (98 %) et dans l'État de New York (19 %).

La centrale au fil de l'eau de Beauharnois est le deuxième plus important complexe hydroélectrique de la région, et ses 38 turbines produisent jusqu'à 1 903 MW. Construite en trois phases entre 1929 et 1961, c'est la troisième plus importante centrale hydroélectrique possédée et exploitée par Hydro Québec. Bien située pour alimenter Montréal et le sud du Québec, elle se trouve également à proximité des marchés de l'Ontario et du nord-est des États-Unis. Elle fonctionne en combinaison avec la centrale Les Cèdres (104 MW), qui a fêté son 100^e anniversaire en 2014. La production hydroélectrique est la plus importante source d'énergie au Québec : elle représente près de 40 % de la demande énergétique totale. Le complexe Beauharnois-Les Cèdres y joue un rôle considérable et contribue jusqu'à 4 % de la production totale d'Hydro Québec, qui s'établit à plus de 200 TWh par année.

4.5.1 IMPACTS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les températures à la hausse causées par des concentrations de plus en plus élevées de gaz à effet de serre dans l'atmosphère pourraient entraîner une évaporation et une évapotranspiration accrues dans les Grands Lacs, lesquelles ne seraient pas compensées par l'augmentation

¹⁷ Le contenu de cette section provient principalement du rapport *L'impact économique des changements climatiques sur la production hydroélectrique du Saint-Laurent*, préparé par Desjarlais et Da Silva (2016).

attendue de la précipitation. La combinaison de températures à la hausse et de changements dans la précipitation entraînerait des débits plus faibles et réduirait la capacité de production hydroélectrique du système des Grands Lacs et du Saint-Laurent. S'appuyant sur deux scénarios hydroclimatiques hypothétiques, la présente étude vise à quantifier, pour les centrales de Beauharnois et Les Cèdres, l'ampleur des réductions de production dues aux impacts des changements climatiques sur les niveaux et les débits d'eau, puis à déterminer les coûts associés pour Hydro-Québec et la population québécoise en général.

Dans le scénario hypothétique 1, sur un horizon de 50 ans, on évalue à 3 % la perte de production associée à une réduction des débits d'environ 6 %. Selon ce scénario, une hausse de la production par rapport au scénario de référence (légèrement inférieure à 10 %) est prévue pour la période 2015–2024, puis suivie d'une chute marquée de la production (plus de 15 % en moyenne) durant la période 2040–2049. Selon le scénario hypothétique 2, la chute de production est beaucoup plus petite (0,3 %) pour l'ensemble de la période. De faibles hausses en hiver et au printemps et une baisse durant l'été donneraient lieu à une baisse de production moyenne d'un peu moins de 3 %.

Plusieurs valeurs économiques permettent d'évaluer l'impact économique des pertes de production, par exemple le coût de production moyen par kWh et le prix accordé par le marché durant la période considérée.

La première valeur suppose que la perte de production doit être compensée pour répondre aux besoins du marché intérieur. La valeur de la production d'électricité perdue correspond donc à son coût de remplacement, qui peut être le coût moyen de production ou le coût marginal. La seconde valeur correspond au prix de l'électricité achetée au cours de la période étudiée. La perte de production est évaluée au prix des marchés extérieurs.

Hydro-Québec indique dans son *Rapport annuel 2014* que le coût moyen de production représente une valeur de 2,01 ¢/kWh. En y ajoutant le coût de transport, soit 1,73 ¢/kWh, on obtient un coût moyen de remplacement de 3,74 ¢/kWh. Il est possible de présumer que la réduction de la production de Beauharnois-Les Cèdres serait compensée par une augmentation de la production de l'ensemble des autres centrales d'Hydro-Québec, réparties sur le territoire québécois. Par conséquent, le coût de remplacement de cette énergie produite à proximité de Montréal correspond au coût moyen de production et de transport de l'ensemble du parc d'Hydro-Québec.

Le second coût utilisé dans l'étude est le coût marginal de production. Le coût de 7,5 ¢/kWh du dernier complexe de production hydroélectrique qui sera mis en exploitation prochainement (La Romaine) est considéré comme le coût marginal de production d'Hydro-Québec. L'ajout de La Romaine devrait permettre à Hydro-Québec de satisfaire ses besoins en puissance additionnelle pendant plusieurs années et constitue donc une bonne référence pour le coût marginal de remplacement.

La troisième valeur utilisée pour quantifier la valeur économique des changements de production causés par les changements climatiques est le prix sur les marchés d'exportation. Nous avons considéré que pour les périodes où le Québec se trouvera en situation de surplus, la perte de production se traduira essentiellement par une perte de vente sur le marché d'exportation. Comme le principal marché d'exportation du Québec est la Nouvelle-Angleterre, le prix de vente de l'électricité sur les marchés extérieurs utilisé ici est le prix hebdomadaire de janvier 2010 à septembre 2015 du International Hub publié par l'ISO New England, en dollars de 2012.

Le tableau 9 montre en dollars de 2012 la valeur des changements dans la production au complexe Beauharnois-Les Cèdres pour la période 2015–2064, selon les trois hypothèses de prix et les deux scénarios hydroclimatiques hypothétiques. Dans le scénario 1, la baisse de production se situe entre 44,6 millions de dollars au coût moyen de remplacement (dollars de 2012) et 89,5 millions de dollars au coût marginal de remplacement, selon un taux d'actualisation de 4 %. Le choix du facteur d'actualisation a une incidence considérable sur les coûts, puisque les bas niveaux d'eau deviennent plus critiques vers la fin de la période considérée.

Dans le scénario 2, qui prévoit une augmentation des fluctuations saisonnières et une baisse relativement faible des débits totaux (0,3 %) sur l'ensemble de la période, la perte de production est beaucoup moins importante, à savoir 26,1 millions de dollars au coût moyen de remplacement et 52,2 millions de dollars au coût marginal de remplacement.

Table 9. Impact total de la variation de production à Beauharnois-Les Cèdres (en millions de dollars de 2012)

Scénario hypothétique 1		
	Non actualisé	4 %
Coût moyen de remplacement	-742,6	-44,6
Coût marginal de remplacement	-1 489,1	-89,5
Prix à l'exportation	-902,9	-30,5
Scénario hypothétique 2		
	Non actualisé	4 %
Coût moyen de remplacement	-76,9	-26,1
Coût marginal de remplacement	-154,3	-52,2
Prix à l'exportation	33,2	20,9

Selon l'hypothèse du prix à l'exportation, la valeur de la perte de production du scénario 1, selon un taux d'actualisation de 4 %, chute à 31 millions de dollars, soit moins que les deux valeurs précédentes. Dans le scénario 2, il pourrait y avoir un gain net de 21 millions de dollars, car l'augmentation des débits de pointe dépasse en valeur les pertes subies en périodes de bas niveaux. La figure 6 montre la variation totale de la production par quart-de-mois pour le scénario hypothétique 2 de même que l'évolution moyenne du prix de l'électricité sur le marché de l'exportation. Comme on le constate, les prix en période estivale et automnale sont beaucoup plus faibles que dans le reste de l'année. Également, la différence de production entre le scénario 2 et le scénario de référence durant la période hivernale est positive (courbe en bleu), tandis que les prix à l'exportation sont relativement élevés. Même si le scénario hypothétique 2 prévoit globalement une légère baisse globale de la production sur 50 ans, la combinaison de la variation des débits par rapport au niveau de référence et de la variation des prix à l'exportation pourraient produire des gains économiques.



Figure 6. Évolution moyenne des prix à l'exportation par quart-de-mois et différence de production par quartile entre le scénario hypothétique 2 et le scénario de référence.

Comme nous l'avons mentionné, le choix du taux d'actualisation exerce une influence déterminante sur les résultats car, en fonction du moment d'occurrence des bas niveaux d'eau, la valeur économique des impacts peut être plus élevée. Si les périodes de bas niveaux surviennent plus tôt que les scénarios le prévoient, les coûts seront plus élevés. Dans le scénario 1, qui prévoit des hausses de production et des gains économiques dans la première décennie, suivis à partir de 2025 de baisses de production dont l'impact maximum sera atteint vers 2040, le taux d'actualisation de 4 % a pour effet de diminuer beaucoup plus la valeur des pertes de production que les gains de production réalisés dans les premières années.

Dans le scénario hypothétique 2, l'actualisation diminue aussi les valeurs totales, mais de façon moins radicale. Ce scénario prévoit une baisse de production par rapport au scénario de référence. La perte de production au coût moyen de remplacement, actualisée à 4 %, se traduit par une valeur de 26 millions de dollars, tandis que la valeur non actualisée est de 77 millions de dollars. Au coût marginal, la valeur actualisée à 4 % est de 52 millions de dollars et la valeur non actualisée, de 154 millions de dollars.

Cette étude de l'impact économique des changements climatiques sur l'hydroélectricité montre que la baisse des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent, causée par les changements climatiques, pourrait avoir d'importantes conséquences financières, et ce, même si la baisse des débits est limitée. La centrale de Beauharnois en particulier, avec une capacité de 1 903 MW, est un élément important de la capacité de production d'Hydro-Québec et toute réduction de ses apports en eau entraînera des pertes de production. De plus, avec l'augmentation du coût de remplacement de l'énergie, la valeur de ces pertes augmentera vraisemblablement avec le temps.

4.5.2 MESURES D'ADAPTATION POTENTIELLES

Comme Beauharnois est une centrale au fil de l'eau, les mesures d'adaptation ponctuelles sont peu nombreuses. Dans ce cas, les mesures d'adaptation concernent davantage la gestion de l'ensemble du réseau d'Hydro-Québec et comprennent notamment la construction de nouvelles

capacité hydroélectrique (réservoirs et centrales) ou de parcs éoliens. L'efficacité énergétique est également un bon moyen de réduire les impacts des changements climatiques sur l'hydroélectricité produite par la centrale de Beauharnois en permettant de reporter d'importants investissements.

4.6 VALEURS FONCIÈRES DES PROPRIÉTÉS RIVERAINES¹⁸

En règle générale, les propriétés établies en bordure de l'eau sont valorisées en raison d'avantages tels que la qualité de la vue, l'accès direct à la navigation et à la baignade ainsi que l'attrait de l'environnement. En comparaison d'autres propriétés ayant les mêmes qualités structurelles (taille, type de bâtiment, services, qualité de construction) établies plus loin de l'eau, les propriétés riveraines se vendent habituellement à un prix considérablement plus élevé.

La valeur ajoutée des propriétés offrant une vue ou un accès varient selon les régions et les pays, et plus particulièrement selon la rareté relative des propriétés riveraines, mais elles demeurent généralement importantes. Par exemple, dans la région de Montréal, la différence moyenne de prix entre les propriétés avec vue et celles sans vue est évaluée à 42,6 %. De plus, les données de ventes immobilières indiquent que les propriétés dans la région qui donnent accès à l'eau comportent une prime de 124 % par rapport aux propriétés n'ayant qu'une vue sur l'eau.

Des conditions hydroclimatiques changeantes, dont la baisse des niveaux d'eau, peuvent avoir une incidence sur la vue et l'accès à l'eau des propriétés riveraines. Les vues peuvent perdre de leur valeur esthétique si les plages sont érodées, si la baisse du niveau de l'eau laisse voir de la boue et des roches ou si le bord de l'eau se couvre de marécages et de plantes aquatiques telles que des algues (Brutzman, 2012). La baisse du niveau d'eau peut aussi réduire l'accès aux plans d'eau pour la navigation ou la baignade, et entraîner des coûts liés à l'agrandissement des quais par exemple. Les propriétaires qui ont investi dans ces terrains en tenant compte de la qualité de la vue ou de l'accès au plan d'eau pourraient ainsi voir la valeur de leur propriété diminuer.

La sensibilité à la baisse du niveau d'eau varie en fonction des endroits. Selon Kashian *et al.* (2006), les primes des propriétés riveraines des lacs Koshkonong et Beaver, dont les niveaux sont régulés par des barrages hydroélectriques, ont augmenté de 79 à 90 % en comparaison des lacs dont le niveau avait cinq centimètres de moins. Une autre étude réalisée au Tennessee par Murray *et al.* (2003) indique que les faibles niveaux d'eau entraînent une réduction de 1 à 5 % des valeurs foncières. Ces pertes ont tendance à augmenter si les niveaux continuent de baisser au cours de l'année et, au contraire, à diminuer lorsque les niveaux reviennent à la normale. Hanson et Hatch (2001) ont constaté qu'une baisse prolongée du niveau d'eau peut réduire de 4 à 15 % les valeurs foncières.

4.6.1 IMPACTS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'étude vise à évaluer la perte de valeur des propriétés due à la baisse des niveaux d'eau le long du fleuve Saint-Laurent, entre la frontière ontarienne et Trois-Rivières. Elle s'appuie sur les

¹⁸ Le contenu de cette section provient principalement du rapport *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet valeurs foncières*, préparé par Özdilek et Revéret (2015).

changements de débits projetés par le scénario hypothétique 1, décrit dans la section 3. Ce scénario prévoit, par rapport au scénario de référence, une baisse moyenne de 6 % des débits sur une période de 50 ans. Les débits augmenteraient dans la première décennie de la période, puis diminueraient ensuite de façon prononcée à partir de 2040.

Les impacts ont été évalués au moyen d'un modèle de régression linéaire multiple, où la valeur de la propriété est fonction d'un ensemble de caractéristiques de structure et d'emplacement, dont la vue et l'accès à l'eau.

Pour la plupart des variables, les données ont été tirées des ventes et des rôles fonciers municipaux entre 2000 et 2015, et positionnées à l'aide d'un système d'information géographique pour identifier les propriétés avec vue et/ou accès direct à l'eau. Des données plus précises sur les changements dans les débits ont été obtenues auprès du Centre d'expertise hydrique du Québec et d'Ouranos, également sous forme numérique et géocodée.

Table 10. Valeurs estimatives (2012-2014) et prix de vente (2000-2012) des propriétés dans la région montréalaise.

VALEURS ESTIMATIVES (en dollars de 2012)						
	Valeur moyenne	Nombre d'unités	Médiane	Minimum	Maximum	Total
Sans effet	250 972	136 088	231 090	36 600	5 100 000	34 154 234 439
Avec vue	346 391	9 893	265 930	50 000	6 090 000	3 426 842 870
Avec accès	817 306	4 291	593 010	67 000	9 570 000	3 507 058 608
	471 556	150 272	395 000	36 000	9 570 000	41 088 135 917
PRIX DE VENTE						
	Valeur moyenne	Nombre d'unités	Médiane	Minimum	Maximum	Total
Sans effet	266 991	52 367	235 750	50 000	4 900 000	13 981 525 681
Avec vue	380 649	802	297 500	50 000	1 900 000	305 280 566
Avec accès	851 360	652	650 000	50 000	1 900 000	555 086 764
	499 667	53 821	410 000	50 000	5 000 000	14 841 893 011

Comme le montre le tableau 10, il y a un écart moyen d'environ 95 000 \$ dans les valeurs estimatives des propriétés avec vue et sans vue (sans effet), soit une valeur marchande d'environ 38 % de plus selon le rôle foncier municipal. Quant aux propriétés ayant accès à l'eau, la différence moyenne de leur valeur par rapport à celle des propriétés avec vue seulement est de 471 000 \$ (136 %), et de 566 000 \$ (226 %) par rapport aux propriétés n'ayant ni vue ni accès.

La contribution de chaque caractéristique à la valeur de propriétés a été évaluée à l'aide du modèle de régression linéaire multiple. Dans l'ensemble, le modèle a dégagé de bons résultats et explique assez bien la variation des prix. En particulier, il indique que le marché déprécie les

valeurs foncières quand les débits sont faibles au moment de la vente. Toutes caractéristiques étant égales par ailleurs, il y aurait une prime de 15,2 \$ par m³/s de débit supplémentaire quand une propriété riveraine est vendue. Cela suggère que la vente d'une propriété donnant accès à l'eau peut se vendre plus cher à un moment où les débits sont élevés qu'à un moment où ils sont faibles. Cependant, cette tendance a sans doute des limites si l'on tient compte, à l'autre extrême, des risques de dommages qui pourraient survenir en période de forts débits dans des secteurs vulnérables à l'érosion ou aux inondations par exemples. Notons aussi que le modèle ne dégage aucune corrélation significative entre les débits et les propriétés avec vue mais sans accès à l'eau. Nous pouvons donc en déduire que l'impact de bas niveaux d'eau n'affecterait que les propriétés riveraines ayant accès à l'eau.

Les résultats du modèle associant les débits et les valeurs foncières ont ensuite servi à évaluer l'impact économique des bas niveaux d'eau du scénario hypothétique 1 sur les 4 291 propriétés des rives du Saint-Laurent entre la frontière ontarienne et Trois-Rivières. Selon le modèle et suivant un taux d'actualisation de 4 %, l'impact économique pour les 4 291 propriétés serait une perte de 72,5 millions de dollars, soit un impact négatif de -2 % de la valeur totale de ces propriétés. Les analyses de sensibilité réalisées avec des taux d'actualisation de 2 % et de 6 % suggèrent des pertes potentielles de 102 et 53 millions de dollars respectivement, ce qui montre l'incidence considérable du taux d'actualisation.

Soulignons que cet impact économique ne tient pas compte de la hausse potentielle attribuable au nombre de propriétés ou aux rénovations.

4.6.2 MESURES D'ADAPTATION POTENTIELLES

Le fleuve Saint-Laurent est un important cours d'eau et il est difficile d'envisager y construire de nouveaux ouvrages tels que des seuils, déversoirs ou barrages pour réguler les niveaux d'eau. Sans pouvoir contrôler les niveaux d'eau dans les secteurs où des propriétés riveraines ont été construites, il y a peu de mesures d'adaptation possibles. Dans les circonstances, nous n'avons pas réalisé d'analyse coûts-avantages de mesures d'adaptation potentielles.

5. ANALYSE

Les études sectorielles montrent que la baisse potentielle des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent due aux changements climatiques pourrait avoir des impacts négatifs sur les six secteurs évalués au cours de la période 2015–2064 et au-delà. Pour certains secteurs d'activités, des mesures d'adaptation rentables sur le plan économique pourraient contribuer à une importante atténuation des impacts. Un sommaire des résultats sectoriels et une analyse des limites de l'étude sont présentés ci-dessous.

5.1.1 SOMMAIRE DES RÉSULTATS

En considérant les six études sectorielles, les impacts économiques les plus importants de la baisse des niveaux d'eau du Saint-Laurent découleraient de la perte de services écosystémiques. Plus particulièrement, la baisse des niveaux d'eau affecterait considérablement l'environnement du lac Saint-Pierre, la plaine inondable d'eau douce la plus importante du Québec. L'écosystème unique du lac se caractérise par une grande diversité de milieux humides qui abritent de nombreuses espèces végétales et animales. Plusieurs activités récréotouristiques, telles que la pêche, l'observation des oiseaux et la navigation de plaisance, y sont pratiquées. La valeur économique des impacts, établie selon un taux d'actualisation de 4 %, se situe entre 878 millions et 2,3 milliards de dollars. Comme cette étude portait uniquement sur les écosystèmes du lac Saint-Pierre, des recherches complémentaires sur d'autres sections du fleuve feraient probablement ressortir des impacts encore plus importants pour l'ensemble de la zone étudiée.

Diverses mesures d'adaptation pourraient contribuer à atténuer ces impacts et même améliorer l'état actuel de l'écosystème. Six stratégies d'adaptation ont été considérées : 1) restaurer les zones riveraines autour du lac Saint-Pierre; 2) restaurer les plaines inondables autour du lac Saint-Pierre; 3) modifier les pratiques agricoles; 4) accroître l'efficacité et la capacité du traitement des eaux usées par les municipalités; 5) protéger et restaurer des habitats pour les espèces menacées ou vulnérables; et 6) éduquer et sensibiliser le public. Selon les estimations, le coût de la mise en œuvre des six mesures d'adaptation se situait entre 346 millions et 1 milliard de dollars ; les retombées totales variaient entre 1,2 à 3,3 milliards de dollars ; et les avantages nets, entre 216 millions et 2,3 milliards de dollars, compte tenu d'un taux d'actualisation de 4 %. Les mesures d'adaptation pourraient s'avérer utiles en réponse à d'autres impacts liés aux changements climatiques, notamment en ce qui a trait à la qualité de l'eau. De plus, certaines de ces mesures dites « sans regret » pourraient être avantageuses peu importe l'ampleur des changements du climat. Dans l'étude consacrée aux services écosystémiques et à la pêche récréative, les valeurs attribuées aux biens et services non marchands ont été établies en fonction des préférences et de la volonté de payer des usagers. Cette approche contingente est différente des évaluations marchandes utilisées dans les autres études sectorielles. Il est important d'en tenir compte dans la comparaison des avantages relativement élevés associés aux services écosystémiques.

Dans le secteur du transport maritime, l'analyse des impacts économiques a porté sur les conséquences des niveaux d'eau sous le zéro des cartes, tels que fournis par les scénarios hydroclimatiques. Il en ressort que la baisse des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent limiterait

la capacité de chargement des navires. Avec un taux d'actualisation de 4 % et une perte de 3,8 EVP par centimètre d'eau pour la période de 50 ans, la valeur des impacts varie entre 38 millions de dollars pour le scénario hypothétique 2 et près de 70 millions pour le scénario hypothétique 1. Cependant, ces résultats sont sensibles au nombre d'EVP perdus par centimètre d'eau sous le zéro des cartes¹⁹.

Suite à une analyse multicritère Topsis, deux mesures ont été examinées de plus près : le dragage et la minimisation du dégagement sous quille. Selon les estimations, la valeur des avantages associés à la combinaison de ces deux mesures, selon un taux d'actualisation de 4 %, se situe entre 58 millions de dollars pour le scénario hypothétique 1 et 38 millions pour le scénario hypothétique 2. Le coût total des mesures est d'environ 12 millions de dollars. Une analyse réalisée au moyen des valeurs actuelles nettes montre que les avantages dépassent les coûts par une marge de 46 millions et 26 millions pour les deux scénarios, avec des ratios coûts-avantages de 5 et de 3 respectivement. Ces évaluations n'incluent peut-être pas la valeur totale des impacts environnementaux ni l'incidence des impacts sociaux.

La navigation de plaisance est également touchée par la baisse des niveaux d'eau du Saint-Laurent. Suivant les deux scénarios hypothétiques, l'impact économique total de la variation des niveaux d'eau, à un taux d'actualisation de 4 % pour la période de 50 ans, se situerait entre 64 et 77 millions de dollars. Les impacts sont évalués en fonction de la valeur accordée aux jours de navigation, mais ne comprennent pas les coûts potentiels de l'adaptation des équipements ou des infrastructures des marinas et clubs nautiques. L'étude a déterminé des mesures d'adaptation pour la navigation de plaisance, mais celles-ci n'ont pas été quantifiées puisqu'elles se rapportent principalement à des modifications dans les pratiques de gestion et d'exploitation.

La baisse des débits et des niveaux d'eau affecterait également la production hydroélectrique de la centrale Beauharnois-Les Cèdres. La baisse attendue dans la production hydroélectrique de cette centrale se traduirait par d'importantes pertes financières, attribuables à la réduction des ventes sur les marchés intérieurs et extérieurs. Au coût marginal de production, la perte pourrait s'établir à 52 millions de dollars pour le scénario hypothétique 2 et à 89 millions pour le scénario hypothétique 1. Ces résultats sont cependant sensibles au taux d'actualisation utilisé. Compte tenu du type de production au fil de l'eau de la centrale Beauharnois-Les Cèdres, qui ne permet pas de retenir l'eau dans un réservoir, l'adaptation aux changements climatiques exigerait des solutions telles que l'amélioration de l'efficacité énergétique et une production accrue provenant d'autres bassins versants ou sources d'énergie. Les coûts et les avantages économiques de ces mesures n'ont pas été évalués.

La baisse des niveaux d'eau affecterait également la valeur foncière des propriétés offrant un accès au fleuve. Au cours de la période de 50 ans, selon le scénario hypothétique 1, l'impact économique de faibles niveaux soutenus pour les quelque 4 300 propriétés situées sur les rives du fleuve entre la frontière Québec-Ontario et Trois-Rivières pourrait s'élever à 72,5 millions de dollars. Cela correspond à une perte d'environ 2 % de la valeur totale des propriétés. Aucune mesure d'adaptation n'a été déterminée pour ce secteur. D'autres études sur les impacts des changements climatiques sur les valeurs foncières des propriétés riveraines devraient examiner la question des inondations et envisager des solutions d'adaptation possibles en réponse à la fluctuation des niveaux d'eau.

¹⁹ Voir le rapport de Slack et Comtois (2016) pour plus d'information sur la sensibilité des résultats au nombre d'EVP perdus par centimètre d'eau.

La baisse des débits et des niveaux d'eau du Saint-Laurent due aux changements climatiques pourrait nuire aux usines qui pompent, traitent et produisent de l'eau potable. Pour que les usines maintiennent leur capacité de production nominale, le niveau d'eau du Saint-Laurent doit être suffisamment élevé pour vaincre la perte de charge des conduites d'adduction entre les prises d'eau et le réseau d'approvisionnement. Selon les scénarios utilisés, des pénuries d'eau pourraient survenir au cours de la période de 50 ans dans 2 des 18 usines de traitement évaluées dans cette étude. Selon les estimations, l'impact économique total se situerait entre 48 900 \$ et 66 800 \$ selon un taux d'actualisation de 4 % pour la période. Ces impacts demeurent assez faible en comparaison au coût des mesures d'adaptation.

Les mesures d'adaptation considérées comprennent la modification ou le remplacement des pompes existantes par des équipements capables de fonctionner à des niveaux d'eau plus bas, par exemple l'agrandissement ou la reconfiguration des systèmes d'adduction pour réduire le risque de perte de charge et les contraintes hydrauliques associées aux bas niveaux d'eau. Les avantages que procurent ces mesures d'adaptation sont les économies réalisées grâce aux pénuries évitées ainsi que la sécurisation de l'approvisionnement en eau. L'analyse coûts-avantages de deux usines vulnérables aux pénuries d'eau – utilisant un taux d'actualisation de 4 % pour la période de 50 ans – a montré que la mise en œuvre de ces mesures ne serait pas rentable au plan économique si on ne considère que les impacts des changements climatiques. Le coût net serait d'environ 100 000 \$ pour une usine (ratio de 35) et de 2,2 millions de dollars pour l'autre (ratio de 42). Cependant, l'analyse a aussi démontré que la mise en œuvre de ces mesures dans le cadre de travaux de construction ou de réhabilitation n'augmenterait que marginalement les coûts tout en rendant les systèmes plus robustes.

5.1.2 LIMITES DE L'ÉTUDE

Scénarios hydroclimatiques

Les scénarios hydroclimatiques développés sont fondés sur l'état actuel des connaissances hydroclimatiques dans le bassin des Grands-Lacs et du Saint-Laurent et représentent des conditions futures plausibles. Aucune probabilité ne leur est cependant associée et ils demeurent donc hypothétiques. Le développement de scénarios probabilistes et la prise en compte d'un plus large éventail de scénarios permettrait d'analyser une plus grande diversité de futurs possibles.

Horizon et taux d'actualisation

En raison de l'application d'un taux d'actualisation (4%), le moment d'occurrence des bas niveaux d'eau exerce une forte influence sur la valeur économique accordée aux impacts. Par exemple, le scénario hypothétique 1 montre une forte baisse des niveaux d'eau vers la fin de la période (2040–2049). La valeur accordée aux impacts économiques de cette baisse diminuerait davantage si celle-ci advenait plus tard dans la période et, inversement, l'impact économique augmenterait si la baisse survenait plus tôt, comme c'est d'ailleurs le cas dans le scénario 2. Les analyses de sensibilité réalisées avec des taux de 2% et de 6% (au lieu de 4%) démontrent aussi cet effet, notamment pour le secteur de la production hydroélectrique. Il ne s'agit pas ici d'une limite de l'étude, mais d'un élément à considérer dans l'analyse des résultats.

Hypothèse du statu quo socioéconomique

La décision de réaliser les analyses en considérant un statu quo socioéconomique doit également être prise en compte. Ce choix visait à isoler l'effet des changements climatiques et à simplifier les analyses. Dans la réalité, toutefois, la croissance démographique, le développement économique, les progrès techniques et d'autres facteurs se conjugueront aux changements climatiques et agiront sur l'ampleur des impacts ainsi que sur les mesures d'adaptation envisagées au cours des prochaines décennies. Par exemple, s'il fallait augmenter la capacité d'usines de traitement d'eau potable en réponse à une croissance démographique et à des besoins plus importants, il pourrait alors devenir avantageux économiquement de saisir l'occasion de mieux adapter les équipements aux bas niveaux d'eaux et aux changements climatiques.

Zone d'étude

La zone étudiée couvre le fleuve Saint-Laurent entre la frontière Québec-Ontario et Trois-Rivières. Divers écosystèmes et activités économiques en dehors de cette zone peuvent aussi être fortement affectés par les changements climatiques et les fluctuations des niveaux d'eau. Par exemple, l'approvisionnement en eau des villes de Québec et de Lévis pourrait être vulnérable. Ce secteur n'a pas été inclus dans la présente étude notamment en raison de l'effet important des marées qui exigent des efforts différents de modélisation. Des études complémentaires sont cependant souhaitables pour évaluer les impacts potentiels et les mesures d'adaptation dans ce secteur et dans d'autres tronçons du Saint-Laurent.

Mesures d'adaptation sectorielles

L'étude n'a examiné que des mesures d'adaptation sectorielles. Bien qu'il en ait été question, aucune mesure d'adaptation structurelle, comme la construction d'ouvrage de régulation des niveaux d'eau du fleuve, n'a fait l'objet d'une analyse coûts-avantages. Selon l'analyse multicritère réalisée dans l'étude sur le transport maritime²⁰, les retombées économiques et la faisabilité sociale et technique de telles mesures (comme la construction de digues, de seuils ou de nouveaux ouvrages de régularisation) semblaient trop faibles pour en considérer la mise en œuvre. De plus, les entrevues et les consultations auprès des utilisateurs favorisaient des adaptations propres aux divers secteurs. Néanmoins, soulignons que la révision du plan de régularisation du Lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent et l'approche de gestion adaptative proposée par la Commission Mixte Internationale demeurent des leviers d'adaptation importants à considérer dans la gestion des niveaux d'eau.

Prise en compte des biens et services écosystémiques non marchands

Quantifier la valeur économique des biens et services écosystémiques est un défi. Cette quantification n'a pas été faite pour tous les secteurs, mais les analyses qui ont tenu compte de ces services ont montré que cela peut influencer fortement les résultats. Comme l'importance de l'évaluation des biens non marchands est de plus en plus reconnue, il faudra relever les défis méthodologiques associés à leur inclusion dans les analyses coûts-avantages.

²⁰ Voir : *Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet transport maritime*, préparé par Comtois et Slack (2016).

6. CONCLUSION

Cette étude régionale représente un premier pas dans l'évaluation des aspects économiques de l'adaptation à la baisse des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent due aux changements climatiques. Elle a permis d'approfondir nos connaissances sur la sensibilité d'activités socioéconomiques et de services écosystémiques aux bas niveaux d'eau.

Les résultats suggèrent que des épisodes des bas niveaux d'eau tels que présentés dans les scénarios hydroclimatiques pourraient entraîner des impacts dans les six secteurs étudiés. Pour tous ces secteurs, les impacts projetés par le scénario hypothétique 1 sont légèrement supérieurs à ceux du scénario hypothétique 2, cela même si les épisodes les plus critiques arrivent tardivement dans le scénario 1 et que leur impact économique a donc été considérablement réduit par l'application du taux d'actualisation.

Les coûts économiques les plus importants sont associés aux impacts potentiels sur les services écosystémiques et la pêche. Compte tenu de l'approche contingente qui a été utilisée pour évaluer ces coûts, cela démontre notamment que les populations sondées affichent une forte volonté à payer pour protéger les services écosystémiques du lac Saint-Pierre. Le secteur dont les coûts liés aux impacts sont les plus faibles est celui de l'approvisionnement en eau des municipalités. En effet, la majorité des usines de traitement d'eau puisant dans le fleuve Saint-Laurent semblent être déjà relativement bien adaptées aux fluctuations des niveaux d'eau.

Sachant que les scénarios hydroclimatiques ont dû être analysés suivant des approches différentes, il est difficile de comparer les valeurs des impacts sectoriels. Bien que des hypothèses et des directives communes aient été définies pour l'ensemble des études, les méthodologies utilisées pour évaluer les coûts varient aussi selon la nature des impacts et les types de mesures d'adaptation propres aux secteurs. Pour le transport maritime et l'approvisionnement en eau des municipalités, des approches d'évaluation marchandes ont été utilisées, tandis que l'étude des services écosystémiques nécessitait une évaluation contingente de la valeur de biens et services non marchands. Les résultats auraient probablement été différents si les impacts sur l'approvisionnement en eau avaient pris en compte la volonté de payer pour l'eau potable. Les valeurs des impacts demeurent par conséquent sensibles aux méthodologies utilisées et donc difficilement comparables.

L'étude a contribué à la collecte de nouvelles données et à l'application de méthodologies utiles pour appuyer la planification de stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Dans la plupart des études sectorielles, des parties prenantes ont été consultées afin de mieux comprendre les enjeux de la baisse des niveaux d'eau et les mesures d'adaptation potentielles. Des mesures ont été déterminées et quantifiées pour le transport maritime, l'approvisionnement en eau des municipalités et les services écosystémiques. Les analyses coûts-avantages indiquent que certaines mesures d'adaptation, pour le transport maritime et pour les services écosystémiques en particulier, pourraient être économiquement avantageuses.

Les études montrent aussi qu'il serait possible d'envisager certaines mesures « sans regret » ou à « faible regret », c'est-à-dire des mesures qui demeurent intéressantes peu importe l'ampleur ou le moment d'occurrence des impacts des changements climatiques, et qui

pourraient contribuer à mieux s'adapter à la variabilité climatique actuelle. Il pourrait s'agir, par exemples, de mesures de protection ou de restauration d'habitats, d'efforts de sensibilisation des usagers, ou d'amélioration à la signalisation autour des marinas. De plus, en tenant compte du cycle de vie des infrastructures ou des équipements, certaines mesures d'adaptation pouvant s'arrimer et contribuer à la réalisation d'autres objectifs pourraient être intégrés à des projets d'investissements déjà prévus. La production d'eau potable des municipalités en est un bon exemple, car le coût marginal pour l'adaptation de certains équipements aux bas niveaux d'eau pourrait ne représenter qu'une fraction des coûts totaux en capital prévus pour augmenter la capacité de production d'une usine pour répondre à la croissance démographique.

Étant donné l'incertitude des conditions climatiques futures et la complexité du système des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, l'évaluation des impacts économiques de la baisse des niveaux d'eau et des mesures d'adaptation pertinentes pour les 50 prochaines années demeure un défi considérable. La présente étude apporte néanmoins une contribution importante à la compréhension des enjeux et à leur analyse économique. Des efforts supplémentaires de recherche seront souhaitables notamment pour anticiper de façon plus précise les conditions hydroclimatiques futures des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Plusieurs organisations collaborent déjà à la modélisation hydrologique et hydraulique en vue de produire des scénarios plus probabilistes. Des collaborations transdisciplinaires seront nécessaires aussi pour établir des liens plus forts entre les expertises hydroclimatiques et économiques et avec tous les domaines concernés par les impacts de la baisse des niveaux d'eau.

La mise à jour de ce type d'évaluation générale sera souhaitable pour tenir compte de nouvelles connaissances scientifiques et pour contribuer à la planification de stratégies d'adaptation adéquates. Des études plus techniques seront aussi nécessaires dans certains cas pour évaluer plus finement la faisabilité et les coûts et avantages de mesures d'adaptation bien précises.

Enfin, l'attention a été portée dans cette étude sur les bas niveaux d'eau, mais les changements climatiques soulèvent d'autres enjeux touchant le Saint-Laurent. Des inondations pourraient survenir dans certains secteurs du fleuve par exemple. De même, l'érosion est un enjeu important dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent mais elle peut aussi affecter différentes sections de la partie fluviale. Aussi, malgré la capacité de dilution importante du fleuve, des événements de précipitations extrêmes pourraient causer des problèmes de qualité de l'eau dans certaines zones spécifiques. Il sera important de poursuivre des travaux de recherche scientifique et une collaboration avec toutes les parties prenantes pour favoriser l'adaptation aux bas niveaux d'eau du Saint-Laurent et aux autres enjeux liés aux changements climatiques.

RÉFÉRENCES

- ADEC (2012). Étude de l'impact économique de l'industrie maritime au Québec. Montreal, ADEC, 88 p.
- Bleau, S., Lefebvre, P., Germain, K., Leclerc, V., Archambault, M (2016). Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet nautisme et croisières-excursions. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada, au gouvernement du Québec et à Ouranos. Chaire de tourisme Transat ESG, UQAM. 168 p.
- Carignan, R. (2004). *Le Lac Saint-Pierre en péril*, Québec Science.
- Carrière, A., & Barbeau, B. (2003). Impacts of level fluctuations in the St. Lawrence River on water treatment plant operation. Montréal: École Polytechnique de Montréal.
- Charron, I. (2014). Guide sur les scénarios climatiques : utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation. Ouranos.
- Chan, C., Coppens, C. et Boisjoly, L. (2016). Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet eaux municipales. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, au gouvernement du Québec et à Ouranos. Montréal : Ouranos. 48 p. et annexes
- Comtois, C. et Slack, B. (2016). Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet Transport maritime. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, au gouvernement du Québec et à Ouranos. Montréal : Ouranos. 64 p.
- Croley II, Thomas E. (1990). "Laurentian Great Lakes Double-CO2 Climate Change Hydrological Impacts." *Climatic Change* 17: 27-47.
- Croley, T.E. (2003) *Great Lakes Climate Change Hydrologic Assessment, I.J.C. Lake Ontario-St. Lawrence River Regulation Study*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Memorandum GLERL- 126
- D'Arcy, P., Bibeault, J.-F. & Raffa, R. (2005) *Changements climatiques et transport maritime sur le Saint-Laurent. Étude exploratoire d'options d'adaptation*. Ottawa et Québec : Comité de concertation navigation du Plan d'action Saint-Laurent, 140 p.
- Desjarlais, C. et Da Silva, L. (2016). *L'impact économique des changements climatiques sur la production hydroélectrique du Saint-Laurent*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada et au gouvernement du Québec. Montréal : Ouranos. 16p.
- Desjarlais and Fisher (2016). *Regional economic study impacts and adaptation to climate change: the Great Lakes and Saint-Laurent River*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada et au gouvernement du Québec. Joint Report of the Mowat Center and Ouranos. 17 p.

- Dupras, J., Revéret, J.P. et He, J. (2013a). L'évaluation économique des biens et services écosystémiques dans un contexte de changements climatiques : Un guide méthodologique pour une augmentation de la capacité à prendre des décisions d'adaptation. Ouranos, 225 p.
- Ehsanzadeh, E., H.M. Saley, T.B.M.J. Ouarda, D.H. Burn, A. Pietroniro, O. Seidou, C. Charron, D. Lee (2013), Analysis of changes in the Great Lakes hydro-climatic variables, *Journal of Great Lakes Research*, 39, 383-394.
- Huard, D. (2016). Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : Description des scénarios climatiques. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada et au gouvernement du Québec. Montréal : Ouranos. 29 p.
- He, J., Poder, T., Dupras, J. et Enomana, H. J. (2016). La valeur économique de la pêche blanche et des services écosystémiques au lac Saint-Pierre : analyse coûts-avantages des stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada, au gouvernement du Québec et à Ouranos. Montréal : Université du Québec à Montréal. 162 p.
- Leclerc, M., Boudreault, A., Bechara, T. A. & Corfa, G. Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling: A Neglected Tool in the Instream Flow Incremental Methodology. *Trans. Am. Fish. Soc.* 124, 645–662 (1995).
- Lofgren, B. M., Hunter, T. S. & Wilbarger, J. (2011). Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology. *J. Great Lakes Res.* 37, 744–752.
- Mortsch, Linda, Henry Hengeveld, Murray Lister, Lisa Wenger, Brent Lofgren, Frank Quinn, et Michel Slivitzky. 2000. "Climate Change Impacts on the Hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence System." *Canadian Water Resources Journal* 25 (2) (January): 153–179.
- Mortsch, L. D., Alden, M. & Klaassen, J. Development of climate change scenarios for impact and adaptation studies in the Great Lakes – St. Lawrence Basin. (2005).
- Music, B., Frigon, A., Lofgren, B. M., Turcotte, R. & Cyr, J.-F (2015). Present and future laurentian great lakes hydroclimatic conditions and associated water supplies as simulated by regional climate models. *Clim. Change* :10.1007/s10584-015-1348-8
- NMMA Canada (2012). *The Economic Impact of recreational boating in Canada 2012*. Disponible en ligne, consulté le 6 août 2014.
- Özdilek, U. et Revéret, J.-P. (2015). Étude économique régionale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint-Laurent : volet valeurs foncières. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada et au gouvernement du Québec. Montréal : Ouranos. 70 p. + Annexes



**550 Sherbrooke Ouest, 19^e étage
Montréal, Québec (H3A 1B9)
Canada**

Téléphone : 514-282-6464

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 d'une part, et les impacts et l'adaptation d'autre part. 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.