



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT

DESCRIPTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Rapport final
Janvier 2016



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

Fondsvert Québec



ÉTUDE ÉCONOMIQUE RÉGIONALE DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT : DESCRIPTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Rapport final
Janvier 2016

RÉDACTION DU RAPPORT :
David Huard, Ouranos

MISE EN PAGE :
Beatriz Osorio, Ouranos

Rapport présenté 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 de *l'Étude économique des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques sur le fleuve Saint Laurent*, pilotée par Ouranos.

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

Numéro du projet Ouranos: 510019-123

Citation suggérée : 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.

Toute utilisation de cette publication et de son contenu n'engage pas Ouranos et ses partenaires.
Pour plus d'information sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques, nous vous invitons à consulter les sites www.adaptation.rncan.gc.ca et www.ouranos.ca

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet piloté par Ouranos avec le soutien de Ressources naturelles Canada et du Gouvernement du Québec.

Ces travaux n'auraient pas été possibles sans l'aide, les données et les conseils d'André Bouchard, Jean Morin et Bernard Doyon de la section Hydrologie et Écohydraulique du Service météorologique du Canada, ainsi que Yin Fan d'Environnement Canada. On remercie également Laura Fagherazzi (Hydro Québec) pour ses suggestions concernant la construction de scénarios de débits sur le Saint-Laurent ainsi que Richard Turcotte du Centre d'expertise hydrique du Québec (MDDELCC).

L'étude a bénéficié aussi de l'aide du Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme d'adaptation.



TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. INVENTAIRES DES BESOINS DE SCÉNARIOS CLIMATIQUES DES GROUPES DE TRAVAIL SECTORIELS	2
3. REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
3.1 Projections des niveaux des Grands Lacs	3
3.2 Analyse des séries historiques.....	4
3.3 Scénarios de niveaux et études d'impacts	6
4. MÉTHODOLOGIE DE PRODUCTION DE SCÉNARIOS CLIMATIQUES	1
4.1 Scénario de référence.....	1
4.1.1 <i>Estimation des débits et Niveaux aux sites</i>	1
4.1.2 <i>Données utilisées</i>	2
4.2 Scénario n° 1 : chaud et sec 2015 – 2065	2
4.2.1 <i>Vue d'ensemble</i>	2
4.2.2 <i>Projections climatiques</i>	4
4.2.3 <i>Modélisation des niveaux du fleuve</i>	5
4.2.4 <i>Données utilisées</i>	7
4.2.5 <i>Résultats</i>	9
4.2.6 <i>Extension du scénario à la période 2015-2039</i>	10
4.3 Scénario n°2: Cycle saisonnier amplifié 2015-2065	12
4.3.1 <i>Vue d'ensemble</i>	12
4.3.2 <i>Projections climatiques</i>	12
4.3.3 <i>Construction du scénario n°2</i>	13
4.3.4 <i>Données utilisées</i>	14
4.3.5 <i>Résultats</i>	15
4.4 Comparaison des scénarios.....	15
5. DÉTAIL DES SCÉNARIOS PRÉPARÉS POUR LES GROUPES DE TRAVAIL ...	20
5.1 Écosystèmes	20
5.2 Eaux municipales.....	20
5.3 Tourisme.....	20
5.4 Valeurs foncières	21
5.5 Production hydroélectrique	21
5.6 Transport maritime.....	22

6. NOTES ET RECOMMANDATIONS SUR L'UTILISATION DES SCÉNARIOS.....	25
6.1 Quart de mois	25
6.2 Comparaison avec les scénarios utilisés par le MOWAT	25
6.3 Scénario de référence de « Upper Great Lakes Study »	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Changements de niveau des lacs Supérieurs, Michigan-Huron, Érié et Ontario pour un ensemble de modèles climatiques de l'ensemble CMIP3 pour les périodes 2020-2034 (a), 2050-2064 (b) et 2080-2094 (c).....	3
Figure 2 Séries temporelles des niveaux des Grands Lacs	5
Figure 3 Exemple d'interpolation des débits reconstitués à Pointe-Claire (LaSalle).....	1
Figure 4 Exemple d'interpolation des niveaux à la station Pointe-Claire. Les niveaux sont d'abord interpolés spatialement à partir des huit simulations hydrodynamiques, puis ces niveaux sont interpolés en fonction des débits à Sorel correspondants.	2
Figure 5 Changements projetés de températures et de précipitations moyennes des simulations climatiques disponibles en 2003 sur la région des Grands Lacs.....	3
Figure 6 Changements projetés de température et précipitations moyennes sur la région des Grands Lacs parmi l'ensemble des projections disponibles à Ouranos en 2009.....	5
Figure 7 Profondeur du fleuve obtenue par modélisation hydrodynamique selon chacun des huit scénarios de débits à Sorel.	8
Figure 8 Élévation du lit du fleuve par rapport au niveau moyen des mers.	9
Figure 9 Illustration des scénarios de référence « base case », chaud et sec et chaud et humide préparés dans le cadre des travaux de la CMI. La courbe en gris représente le débit au quart de mois à la sortie du lac Ontario. Les cercles indiquent les minima annuels pour chacun des trois scénarios. Les années s'appliquent au scénario de référence, les scénarios futurs couvrent la période 2040-2069 en utilisant la même météo que le scénario de base auquel des deltas sur les températures et les précipitations ont été appliqués.....	10
Figure 10 Le scénario n°1 original ne couvrant que la période 2040-2069, une extension à la période 2015-2039 a été complétée afin de faciliter les études économiques. Cette extension est composée de 10 années de la série <i>base-case</i> , et de 15 années du scénario Chaud et sec. Chacune de ces deux sections est ensuite corrigée pour appliquer progressivement la différence mesurée entre les scénarios Chaud et sec et <i>base-case</i>	11
Figure 11 Cycle annuel des apports nets aux bassins des Grands Lacs simulés par les modèles climatiques et observés (noir). Le panneau inférieur présente la variation de NBS en climat futur.	13
Figure 12 Le scénario n°2 est construit en faisant un lien entre les NBS des Grands Lacs et le débit du fleuve à Sorel (panneau supérieur). Les différences de NBS en climat futur sont converties en différences de débit (panneau inférieur) via une relation de proportionnalité. Le cycle annuel des débits est calculé à partir de la série de débits reconstitués à Sorel au cours de la période 1953-2012.....	14
Figure 13 Cycle annuel moyen des scénarios de référence (1980-2010), n°1 (2040-2065) et n°2 (2040-2065) à Sorel. La zone ombragée et les lignes fines indiquent l'intervalle couvert par les 10 ^e et 90 ^e percentiles.	16

Figure 14 Scénario What-If n°2 (rouge) comparé aux débits reconstitués à Sorel (noir). Dans le scénario n°2, le signal de changement climatique amplifie le cycle annuel en augmentant les débits hivernaux et en diminuant les débits estivaux.	18
Figure 15 Niveau d'eau du Saint-Laurent à la station de Sorel selon le scénario de référence et les scénarios n°1 et n°2.	19
Figure 16 Occurrence de niveaux inférieurs à 10 cm au-dessus du zéro des cartes au lac Saint-Pierre pour les scénarios de référence, n°1 et n°2. Chaque rectangle correspond à un quart de mois, dont la couleur indique le niveau par rapport au zéro des cartes. Les régions en blanc sont celles pour lesquelles les niveaux se maintiennent au-dessus de la barre du 10 cm.	21
Figure 17 Lignes de contour traçant la rive pour chacun des huit scénarios stationnaires dans la région du Lac St-Louis.	21
Figure 18 Scénarios de débits à la sortie du lac Ontario.	22
Figure 19 Distribution des niveaux observés à la Jetée n°1 avec ceux du scénario de référence (1980-2010), interpolés à partir des valeurs du Tableau 8. Les niveaux sont donnés par rapport au zéro des cartes.	23
Figure 20 Moyennes annuelles des niveaux observés et du scénario de référence à la Jetée n°1. On note la présence de biais importants jusqu'en 1980.	24
Figure 21 Changements de température projetés par un ensemble de modèles climatiques globaux selon les différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Tiré du quatrième rapport du GIEC.	26
Figure 22 Changements de températures globales simulées par différentes versions du CGCM et les scénarios d'émissions de GES IS92a, A2 et B2. Tiré des archives du site du CCCma.	26
Figure 23 Moyenne des niveaux d'eau à Sorel calculés à partir de trois scénarios de base (base case), soit celui de la CMI, celui de l'UGLS et les débits reconstitués par EC. Les moyennes sont calculées sur la période allant de 1962 à 1990.	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Sommaire des moyennes des changements de températures et précipitations sur la région des Grands Lacs et Saint-Laurent.....	4
Tableau 2 Conditions limites de débits amont et aval ainsi que des tributaires du tronçon Montréal/Trois- Rivières pour les huit scénarios stationnaires d'EC. Les valeurs correspondent aux conditions de printemps et automne.	6
Tableau 3 Conditions limites de débits amont et aval ainsi que des tributaires du lac St-Louis pour les huit scénarios stationnaires d'EC. Les valeurs correspondent aux conditions de printemps et automne.....	7
Tableau 4 Simulations climatiques régionales analysées.	12
Tableau 5 Description des scénarios proposés pour l'étude économique. Les alias sont utilisés pour identifier les fichiers contenant les scénarios.....	15
Tableau 6 Moyennes mensuelles des niveaux des scénarios de référence (1980-2010), n°1 (2040-2065) et n°2 (2040-2065) à Sorel.	16
Tableau 7 Moyennes mensuelles des débits des scénarios de référence (1980-2010), n°1 (2040-2065) et n°2 (2040-2065) à Sorel.	16
Tableau 8 Niveaux des conditions limites des huit scénarios stationnaires d'EC.	24
Tableau 9 Jours inclus dans chaque quart de mois selon le nombre de jours dans le mois.	25

1. INTRODUCTION

Ce document présente les choix méthodologiques menant aux scénarios *What-If* utilisés par les groupes de travail sectoriels (GTS) pour leurs analyses coûts-avantages (ACA). On souligne qu'en raison du temps limité alloué au projet, les GTS se concentrent sur les coûts économiques des impacts biophysiques des changements climatiques ainsi que les options d'adaptations permettant d'atténuer ces coûts (étapes 3 et 4 du diagramme ci-dessous).



La section 2 de ce document résume les conclusions tirées des entretiens avec les GTS sur leurs besoins et contraintes en matière de scénarios. La troisième section présente les quelques points forts de la revue de la littérature sur les scénarios climatiques traitant des niveaux du Saint-Laurent. La section 4 décrit les méthodes de construction des deux scénarios *What-if*. La cinquième section donne des détails sur les scénarios préparés pour chacun des groupes sectoriels et la dernière section contient quelques notes et recommandations sur l'utilisation des scénarios.

2. INVENTAIRES DES BESOINS DE SCÉNARIOS CLIMATIQUES DES GROUPES DE TRAVAIL SECTORIELS

Les rencontres tenues avec les GTS ont permis d'identifier les besoins et les contraintes relatives aux scénarios climatiques à utiliser aux fins d'analyses coûts-avantages (ACA). Des rencontres avec les quatre GTS externes ont été réalisées (Eaux municipales, Écosystèmes, Transport maritime et Tourisme), ainsi que des entretiens avec Manon Circé et Claude Desjarlais, les économistes d'Ouranos responsables des volets Valeur foncière et Production hydroélectrique. Une réunion de travail avec Hydro-Québec a également été menée afin de préciser les besoins en matière de scénarios pour la production hydroélectrique. Les comptes rendus de ces réunions sont fournis en Annexe A.

En ce qui a trait aux variables, les secteurs du tourisme, du transport maritime et des eaux municipales semblent pouvoir se contenter de débits et niveaux d'eau. Le principal défi consistera à calculer les niveaux pour des sites précis le long du tronçon. Dans le cas des eaux municipales, la séquence temporelle de niveaux entre le présent et le futur devra être spécifiée afin de pouvoir estimer les conséquences économiques des bas niveaux. De plus, il est possible que l'on doive fournir aux ingénieurs les événements de différentes périodes de retour afin qu'ils puissent compléter leur analyse.

Pour ce qui est des études sur la production hydroélectrique et les valeurs mobilières, très peu de détails ont été fournis sur les besoins en scénarios. A priori, la production hydroélectrique sera étudiée à partir de débits mensuels dans le canal Beauharnois. Les valeurs mobilières risquent quant à elle de dépendre de la distance séparant les propriétés du fleuve et des taux d'érosion. Les taux d'érosion constituant par contre un problème mal connu, le groupe envisage plutôt de calculer la variation des valeurs mobilières des propriétés du lac Saint-Louis en évaluant le lien entre la distance séparant les propriétés du bord de l'eau. Les scénarios de niveaux devront donc être reportés sur un modèle d'élévation incluant la localisation des propriétés. Cette partie de l'analyse sera effectuée par le GTS responsable du volet Valeurs foncières.

Le volet Écosystème est celui présentant les défis les plus importants. En effet, le lien entre niveaux d'eau et impacts biophysiques est complexe, passant par des modèles d'habitats pour les différentes espèces présentes dans le fleuve. Ces modèles d'habitats sont dynamiques et ne peuvent être réduits à des relations simples entre niveaux et santé des populations (communication personnelle, Jean Morin). Le GTS Écosystème ne disposant ni du temps ni des ressources pour simuler les habitats et évaluer les retombées des scénarios de niveaux sur le milieu vivant, l'analyse des impacts biophysiques reposera vraisemblablement sur des études existantes. Autrement dit, les scénarios *What-If* seraient idéalement des scénarios pour lesquels il existe des études d'impacts sur les écosystèmes.

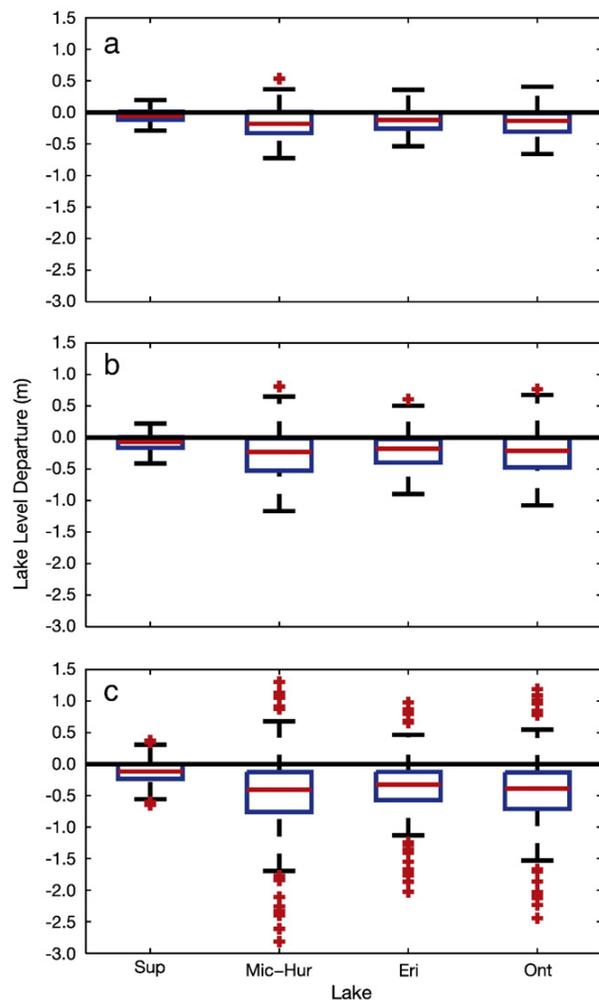
3. REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature effectuée dans le cadre de la production des scénarios *What-if* couvre principalement les études récentes modélisant les niveaux d'eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent en climat futur, l'analyse des niveaux historiques ainsi que quelques études sur les impacts biophysiques et économiques. Malgré ses 160 documents, cette revue de littérature n'a pas la prétention d'être exhaustive et ne couvre que la période 1990-2013.

3.1 PROJECTIONS DES NIVEAUX DES GRANDS LACS

Les études de Hartmann (1990) et Croley II (1990) évaluent les niveaux des Grands Lacs pour un climat s'étant stabilisé à deux fois les concentrations historiques de CO₂ (2xCO₂). Les résultats de Crowley suggèrent des réductions de 23 à 51% des apports au bassin, apports que Hartmann transpose en réductions des niveaux des lacs allant de 0.50 à 2.50m selon les modèles. Bien que quelques études réalisées au cours des années 90 suggèrent des hausses d'apport sur les Grands Lacs en raison de précipitations plus fortes, dans la plupart des cas la hausse de l'évaporation semble dominer et conduire à des baisses d'apports nets (L. Mortsch et coll. 2000). En particulier, une simulation du CCC GCM2 en climat 2xCO₂ projette une baisse du débit moyen du Saint-Laurent à l'exutoire du lac Ontario de 3100 m³/s, passant ainsi de 8 200 à 5 100 m³/s.

À partir des années 2000, les études sont plus nuancées, projetant des changements de niveaux parfois à la hausse, parfois à la baisse. La disponibilité d'un plus grand nombre de modèles et de simulations illustre également les grandes incertitudes reliées à la modélisation des apports aux Grands Lacs. En effet, les conditions actuelles sont le résultat d'un équilibre entre les précipitations et l'évaporation. En conséquence, même de légères différences à l'une ou l'autre de ces variables conduisent à des hausses ou des baisses d'apports aux bassins et de débit du Saint-Laurent. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** tirée de Angel et Kunkel (2010)



Tiré de Angel et Kunkel (2010).

Figure 1 Changements de niveau des lacs Supérieurs, Michigan-Huron, Érié et Ontario pour un ensemble de modèles climatiques de l'ensemble CMIP3 pour les périodes 2020-2034 (a). 2050-2064 (b) et 2080-2094 (c).

présente les résultats, par lac, de l'ensemble des simulations CMIP3 pour le scénario d'émission A2 pour les périodes 2020-2034 (a), 2050-2064 (b) et 2080-2094 (c). Bien que quelques modèles prévoient des augmentations de niveaux, la médiane reste négative. Néanmoins, la figure illustre bien la dispersion considérable des résultats.

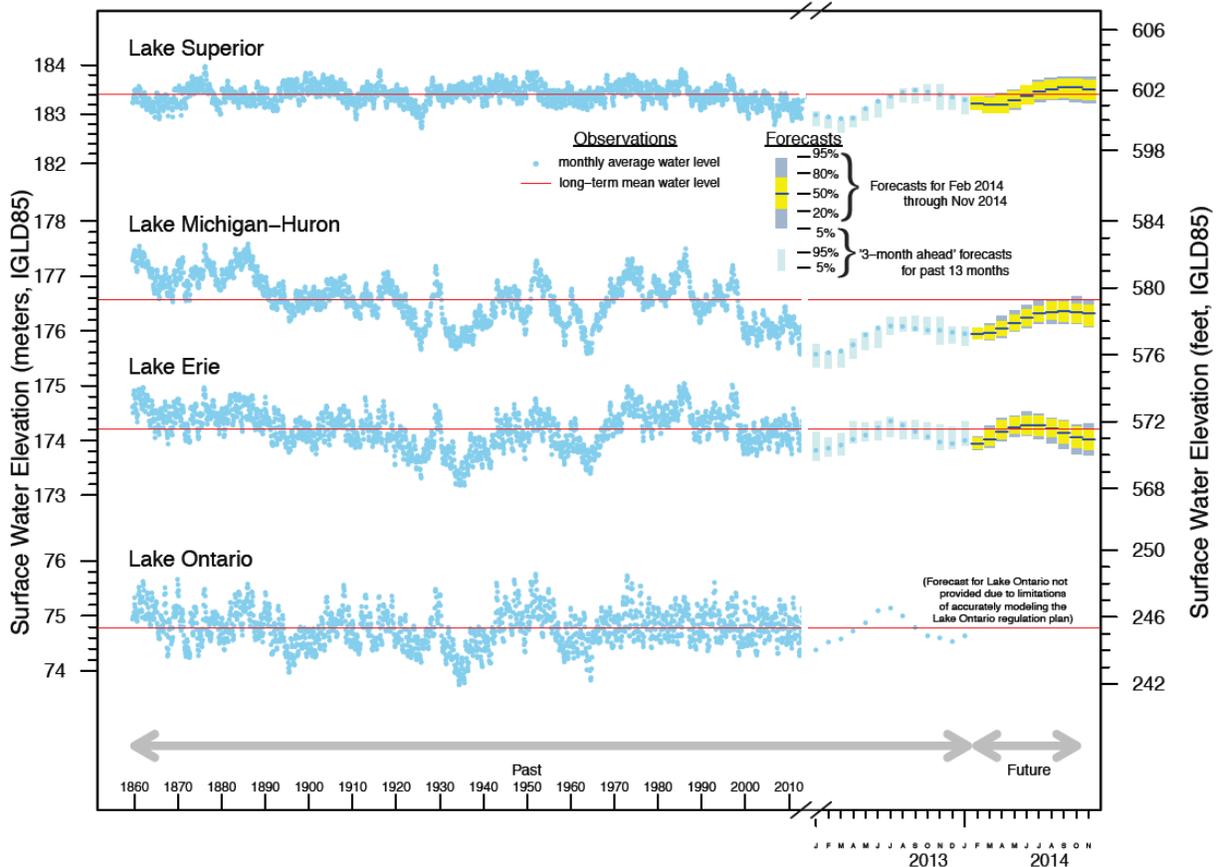
Les conclusions de ces études sont toutefois remises en question par un article de Lofgren, Hunter et Wilbarger (2011) suggérant que la méthodologie employée par la plupart des études hydrologiques sur les Grands Lacs tend à surestimer l'évapotranspiration. En effet, les études d'impacts des changements climatiques imposent typiquement une différence de température atmosphérique aux observations (Δ), négligeant le budget énergétique. Alors que les modèles climatiques incorporent une représentation détaillée des transferts d'énergie, ce n'est pas le cas de la plupart des modèles hydrologiques qui utilisent plutôt des formules d'évapotranspiration potentielle basées sur la température. Lofgren et coll. montrent ainsi que le flux de chaleur latente (évaporation) du modèle des Grands Lacs (LBRM) via la formule d'évapotranspiration est beaucoup plus grand que celui d'un GCM pour la même augmentation de température. Une analyse des apports aux bassins utilisant une approche de budget énergétique conduit ainsi à des augmentations moins marquées d'évapotranspiration malgré l'augmentation des températures. Dans quelques cas, plutôt que de projeter une diminution des niveaux des lacs, la même simulation climatique prévoit une augmentation des niveaux lorsque l'approche par bilan énergétique est utilisée au lieu d'une formule d'évapotranspiration potentielle.

L'étude de Lofgren et coll. permet de mieux comprendre les résultats des études de Manabe et coll. (2004) et Milly, Dunne, et Vecchia (2005) qui indiquent, sur la base des projections des modèles climatiques, des augmentations de débits dans la région des Grands Lacs. À la lumière de ces considérations, on peut donc s'attendre à des différences importantes entre les projections de niveaux basées sur les sorties directes des modèles climatiques et celles provenant de modèles hydrologiques pilotés par des changements de températures.

3.2 ANALYSE DES SÉRIES HISTORIQUES

L'analyse visuelle des séries historiques des niveaux (voir Figure 1) indique une variabilité multidécennale, avec des cycles irréguliers. La baisse graduelle des débits du fleuve depuis les années 1970 a donc initialement été parfois interprétée comme faisant partie de ces cycles naturels. Les projections climatiques discutées précédemment suggèrent plutôt que cette tendance à la baisse soit liée aux changements climatiques. Cela dit, l'attribution des bas niveaux actuels des Grands Lacs aux changements climatiques reste spéculative en raison de la complexité des phénomènes impliqués.

Basé sur l'analyse des tendances à long terme des niveaux mensuels des Grands Lacs au cours de la période 1860-1998, Lenters (2001) trouve peu de changements aux moyennes annuelles, mais des changements importants dans le cycle annuel des niveaux. Plus précisément, la hausse et la baisse des lacs Érié et Ontario ont lieu un mois plus tôt en 1998 qu'en 1860. Aussi, l'amplitude du cycle annuel du lac Ontario a augmenté de 23% au cours de la même période. L'étude montre également que la relation entre le bilan des lacs et la température n'est pas simple, et que des températures plus élevées n'impliquent pas automatiquement une évaporation plus forte.



Tiré de GLERL (2014).

Figure 1 Séries temporelles des niveaux des Grands Lacs.

En effet, l'évaporation est contrôlée par la pression de vapeur, qui dépend de la température du lac, de l'air ambiant et du taux d'humidité. L'évaporation atteint ainsi son maximum durant les mois de décembre, janvier et février (Ouarda et coll. 2009), lorsque l'eau encore chaude des lacs est en contact avec l'air froid et sec venant des Prairies. Pour un petit lac comme le lac Érié, le maximum d'évaporation est atteint plus tôt à l'automne en raison d'une inertie thermique plus faible. Ehsanzadeh et coll. (2013) font une analyse de tendance et de point de rupture pour montrer qu'à l'échelle annuelle, il ne semble pas y avoir de tendance à long terme dans l'évaporation des Grands Lacs. Un article de Gronewold et Stow (2013) met en évidence les changements observés au cycle annuel au cours des années 2011 et 2012 par rapport à la période historique.

Notez que bien que l'on s'intéresse ici aux modifications dues aux changements climatiques, les variations historiques de niveaux des Grands Lacs et débits du fleuve ne dépendent pas uniquement du climat, mais également du rehaussement isostatique du continent, des infrastructures de régularisation ainsi que des travaux de dragage, ces derniers ayant une influence à long terme sur les niveaux des Grands Lacs.

3.3 SCÉNARIOS DE NIVEAUX ET ÉTUDES D'IMPACTS

En ce qui a trait aux projections climatiques de niveaux d'eau et de leurs impacts, les travaux de la Commission Mixte Internationale (CMI) sont certainement les plus complets (Stakhiv et coll. 2006). L'étude traite des options de régularisation des débits de l'ensemble des Grands Lacs et du tronçon fluvial du Saint-Laurent et porte autant sur les impacts biophysiques qu'économiques, et ce afin de mettre à jour le plan de régularisation des Grands Lacs. L'étude propose quatre scénarios de changements climatiques, en plus d'un scénario de référence, afin de mesurer la sensibilité des plans de régularisations aux différentes conditions climatiques plausibles. La méthodologie de cette étude est décrite dans la section suivante.

Ces mêmes scénarios ont été utilisés par Morin, Champoux et Martin (2009) afin d'étudier les impacts sur les nombreux écosystèmes du Saint-Laurent via des modèles d'habitats pour les plantes submergées, l'habitat des poissons, des canards, des oiseaux palustres ainsi que des espèces menacées. Une étude subséquente sur le roseau envahisseur (Marie-Andrée Tougas-Tellier et coll. 2013) effectuée pour le compte d'Ouranos utilise les mêmes scénarios, de même qu'une étude sur les impacts des changements climatiques sur la navigation commerciale (D'Arcy, Bibeault, et Raffa 2005).

4. MÉTHODOLOGIE DE PRODUCTION DE SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Vu la sophistication des scénarios de la CMI et l'existence de diverses études basées sur ceux-ci, l'approche initialement envisagée consistait à choisir les deux scénarios *What-if* de la présente étude parmi eux. Plus précisément, les scénarios Chaud et sec et Chaud et humide étaient pressentis, en raison de leur utilisation dans les travaux de Morin *et coll.* concernant les impacts sur les habitats. À la suite du travail de collecte de données et d'analyse, ces deux scénarios sont apparus comme trop similaires l'un à l'autre; l'utilisation des deux revêt ainsi un intérêt limité. C'est donc le scénario Chaud et sec qui a été retenu, et une méthodologie différente a été choisie afin de créer un deuxième scénario *What-if* contrastant avec le premier. La construction du scénario de référence ainsi que des deux scénarios *What-if* est décrite dans les sous-sections qui suivent.

4.1 SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Le scénario de référence est construit sur la base des débits reconstitués à Sorel par EC (Bouchard et Morin, 2000). Ces débits sont mis à jour régulièrement et la série transmise par EC couvre la période 1933-2013. Ce scénario possède deux avantages par rapport au scénario de référence (*base case*) utilisé dans les études de la CMI: la série temporelle est considérablement plus longue (81 ans plutôt que 29), ce qui facilite l'analyse fréquentielle de la série, et les données sont vraisemblablement plus près des valeurs réelles. En effet, le scénario de référence utilisé par la CMI est issu d'une modélisation hydrologique plutôt que d'observations. Afin de s'en tenir à la période contemporaine, le scénario de référence est défini comme les 60 ans de cette série de débits reconstitués couvrant la période 1953-2012.

4.1.1 ESTIMATION DES DÉBITS ET NIVEAUX AUX SITES

Le calcul des débits ailleurs qu'à Sorel s'opère en utilisant les relations de débits du **Tableau 2** ou du **Tableau 3**, selon l'endroit. Les valeurs de ces tableaux permettent de faire correspondre à un débit donné à Sorel le débit d'un autre endroit dans le fleuve ou de ceux des tributaires. Par exemple, pour obtenir la série de débits reconstitués à Pointe-Claire, on interpole à partir des débits à Sorel les débits à LaSalle, tel qu'illustré à la **Figure 2**. Pour les sites entre Sorel et Trois-Rivières, on cumule les débits des affluents en amont à ceux de Sorel.

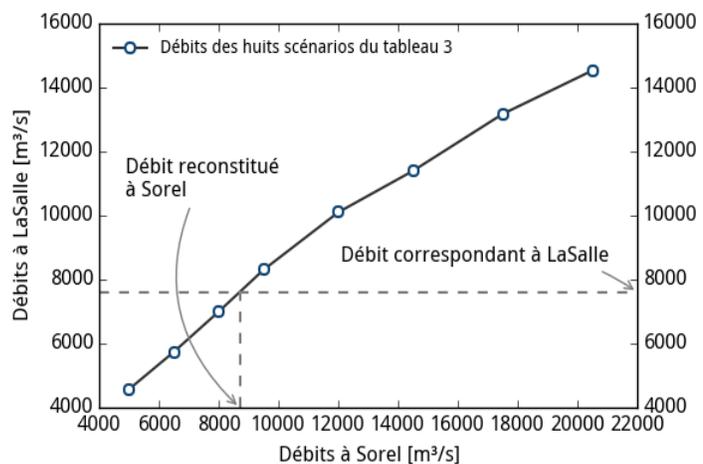


Figure 2 Exemple d'interpolation des débits reconstitués à Pointe-Claire (LaSalle).

Le calcul des niveaux d'eau ou de la profondeur du fleuve passe par les scénarios hydrodynamiques stationnaires d'EC, décrit plus en détail dans la section suivante. Pour une position géographique donnée, on interpole spatialement les niveaux d'eau des huit scénarios stationnaires (valeur du plus proche voisin). Pour n'importe quel débit à Sorel, on peut ainsi interpoler parmi ces huit niveaux, tel qu'illustré à la **Figure 3**. Les séries temporelles de niveaux sont construites en appliquant cette procédure pour toutes les valeurs de débits de la série temporelle. La seule exception à cette règle est le scénario préparé pour le volet Eaux municipales qui utilise une technique d'interpolation décrite à la section 0.

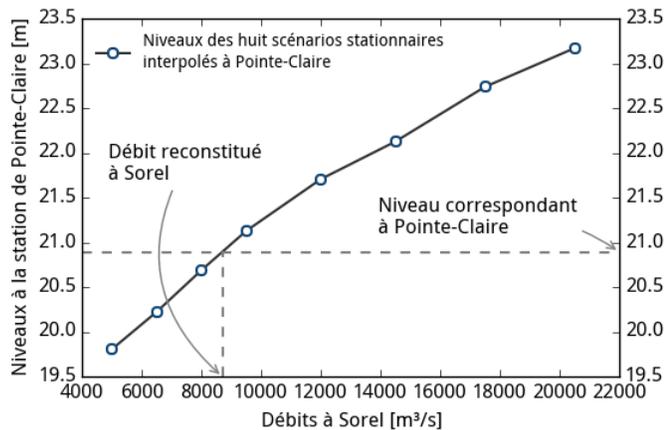


Figure 3 Exemple d'interpolation des niveaux à la station Pointe-Claire. Les niveaux sont d'abord interpolés spatialement à partir des huit simulations hydrodynamiques, puis ces niveaux sont interpolés en fonction des débits à Sorel correspondants.

4.1.2 DONNÉES UTILISÉES

Les données requises pour la construction du scénario de référence incluent la série de débits reconstitués à Sorel ainsi que les niveaux des huit scénarios stationnaires hydrodynamiques, le tout fourni par l'équipe d'Alain Bouchard de la section hydrologie et échohydraulique du Service météorologique du Canada d'EC.

4.2 SCÉNARIO N°1 : CHAUD ET SEC 2015 – 2065

Le scénario *What-if* n°1 correspond au scénario Chaud et sec de la CMI utilisé par Morin, Champoux, et Martin (2009) dans le rapport intitulé « Analyse de l'impact des changements climatiques et de travaux de maintien du niveau d'eau sur les indicateurs biotiques du fleuve Saint-Laurent. »

Afin de réduire au minimum les efforts, non planifiés, demandés à Environnement Canada (EC), il a été convenu que les séries temporelles de scénarios climatiques soient générées à l'interne plutôt que transmises intégralement des bases de données d'EC. En effet, le travail d'extraction des séries aurait exigé une collaboration étendue avec EC afin de répondre aux besoins encore mal définis des GTS. Le présent chapitre détaille donc les données acquises et l'approche utilisée pour reproduire le plus fidèlement possible les scénarios d'EC.

4.2.1 VUE D'ENSEMBLE

Les projections climatiques développées aux fins des études de la Commission Mixte Internationale sur l'impact des changements climatiques sur les niveaux des Grands Lacs sont décrites dans Mortsch, Alden, et Klaassen (2005). Ces scénarios sont utilisés par Crowley pour

calculer les niveaux et débits à l'exutoire des Grands Lacs (Croley II 2003). Afin d'estimer les niveaux résultants sur le Saint-Laurent, David Fan et Yin Fay (F&F) ont développé des relations (Fan et Fay 2002) entre les débits des tributaires du Saint-Laurent et les niveaux d'eau à cinq stations de mesure : Montréal, Varennes, Sorel, Lac St-Pierre, Trois-Rivières et Batiscan. F&F ont également générés des débits de tributaires (Chateauguay, St-François, Richelieu, St-Maurice) en climat futur via une fonction de transfert simple entre les bassins de ces rivières et les sous-bassins de la rivière Outaouais et du lac Ontario pour lesquels des scénarios de changements climatiques étaient disponibles (Fan et Fay 2003a). La combinaison des débits du fleuve en scénarios de changements climatiques simulés par Crowley avec celui des tributaires estimés par F&F permet de calculer le débit total dans le fleuve et son niveau aux cinq stations de mesures mentionnées précédemment.

Les scénarios de F&F pour les niveaux du Saint-Laurent n'étant produits qu'aux stations de mesure, l'équipe d'EC a utilisé les huit scénarios stationnaires 2D décrits dans Morin et Bouchard (2001) afin d'interpoler les niveaux entre les stations. Ces scénarios décrivent les niveaux atteints, en moyenne, pour un débit donné du Saint-Laurent et de ses tributaires. Les huit scénarios stationnaires couvrent toute la gamme des débits plausibles, allant de 5000 à 20500 m³/s à Sorel, soit des niveaux minimum et maximum atteint en moyenne une fois tous les 10000 et 7000 ans respectivement¹. Les débits à Sorel des scénarios de F&F sont utilisés pour déterminer les scénarios de débits inférieurs et supérieurs, dont les niveaux aux stations sont ensuite associés aux niveaux de F&F. La valeur ajoutée des séries de F&F est d'incorporer l'effet des tributaires dans l'interpolation spatiale des niveaux.

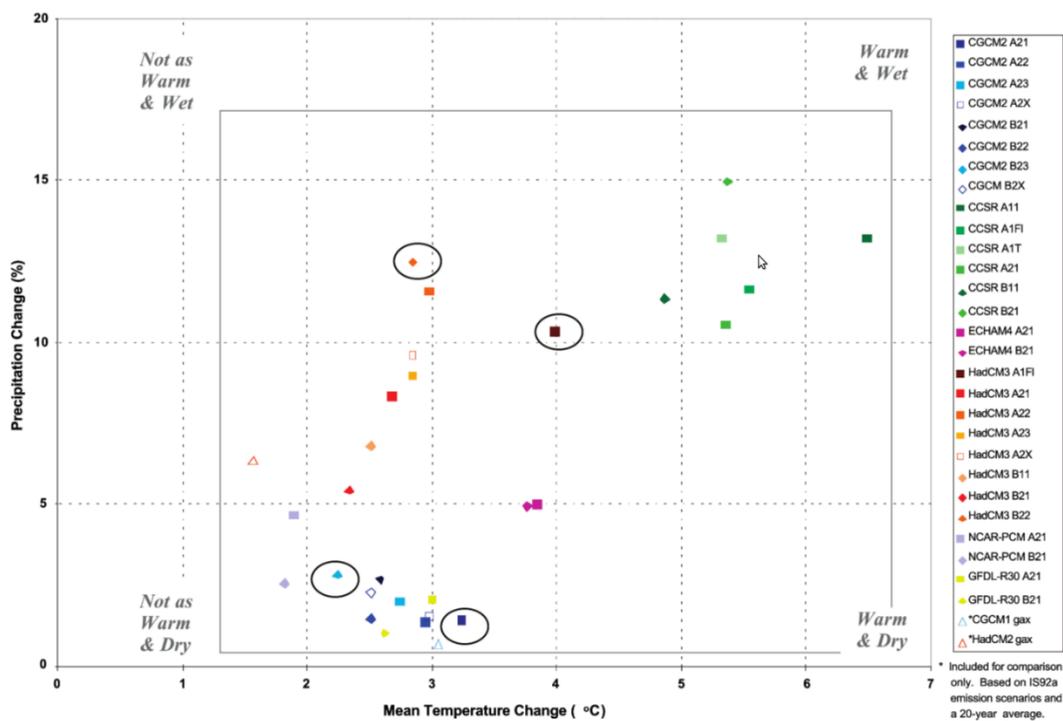


Figure 4 Changements projetés de températures et de précipitations moyennes des simulations climatiques disponibles en 2003 sur la région des Grands Lacs.

¹ L'analyse fréquentielle des minima et maxima annuels semble avoir été réalisée à partir de la série reconstituée des débits à Sorel (Bouchard et Jean Morin 2000), utilisant la distribution Log-Pearson III calibrée par la méthode des L-moments.

4.2.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES

Dans le cadre de l'étude de la CMI, 28 simulations tirées de six modèles globaux ont été examinées. Ces simulations couvrent deux fenêtres, l'une en climat de référence (1961–1990) et l'autre en climat futur à l'horizon 2050 (2040–2069). Les valeurs moyennes de changements (deltas) de températures et de précipitation ont été calculées sur la région des Grands Lacs, puis tracées dans un diagramme de dispersion (**Figure 4**). Dans une perspective d'étude de sensibilités, quatre simulations ont été sélectionnées, représentant des conditions plus chaudes et plus humides, plus chaudes et plus sèches, moins chaudes et plus humides et moins chaudes et plus sèches. Les simulations choisies sont détaillées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 Sommaire des moyennes des changements de températures et précipitations sur la région des Grands Lacs et Saint-Laurent.

<i>Modèle</i>	<i>Variable</i>	<i>Annuel</i>	<i>Hiver (DJF)</i>	<i>Printemps (MAM)</i>	<i>Été (JJA)</i>	<i>Automne (SON)</i>
<i>HadCM3 A1F1</i> <i>Chaud et humide</i>	T (°C)	3,99	3,90	3,57	4,44	4,07
	P (%)	10,33	21,52	19,18	3,06	4,67
<i>CGCM2 A21</i> <i>Chaud et sec</i>	T (°C)	3,24	4,32	3,26	3,17	2,21
	P (%)	1,40	4,38	4,39	-1,60	1,28
<i>HadCM3 B22</i> <i>Pas aussi chaud et humide</i>	T (°C)	2,84	3,33	2,35	3,08	2,60
	P (%)	12,51	20,81	19,93	7,70	8,00
<i>CGCM2 B23</i> <i>Pas aussi chaud et sec</i>	T (°C)	2,24	3,17	2,57	2,32	1,60
	P (%)	2,84	5,33	6,60	0,10	1,35

Depuis la sélection de ces simulations en 2003, plusieurs simulations se sont ajoutées à l'ensemble des simulations globales disponibles. Une mise à jour du diagramme de dispersion température/précipitation a été réalisée par Diane Chaumont dans le cadre du travail de Morin et Bouchard (2009) (**Figure 5**). Les résultats indiquent que si les simulations avaient été choisies aujourd'hui, la simulation chaude et sèche aurait vraisemblablement été plus chaude et plus sèche que celle choisie en 2003. De même, les simulations « froides » auraient été considérablement plus froides que celles choisies en 2003.

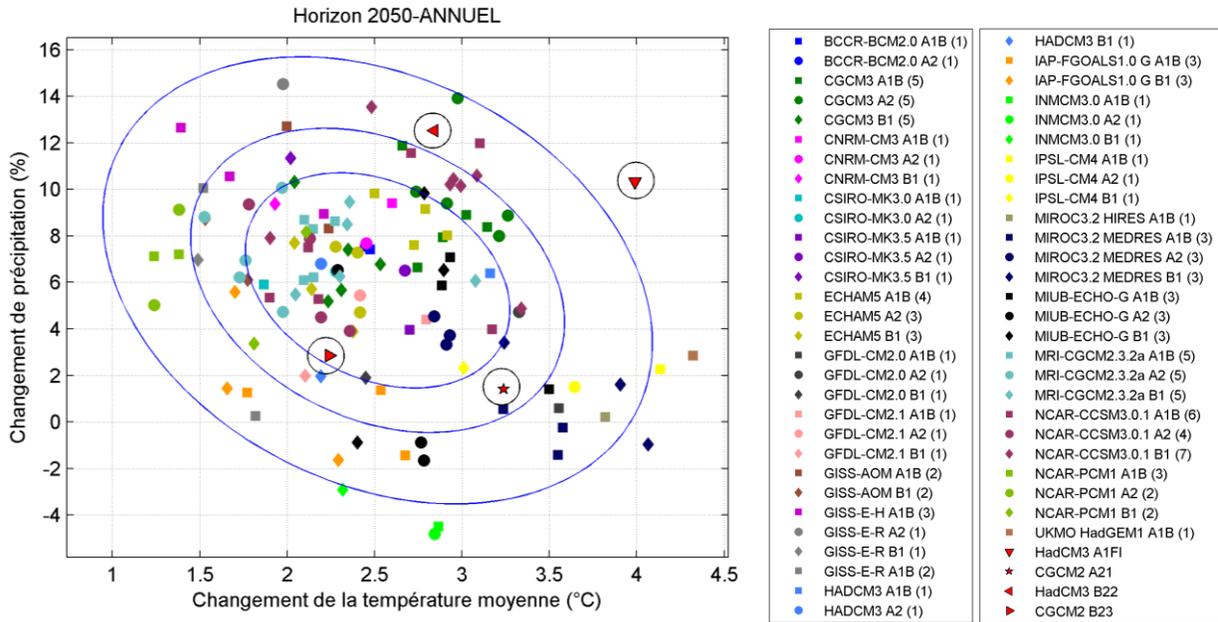


Figure 5 Changements projetés de température et précipitations moyennes sur la région des Grands Lacs parmi l'ensemble des projections disponibles à Ouranos en 2009.

4.2.3 MODÉLISATION DES NIVEAUX DU FLEUVE

La modélisation des niveaux du fleuve à partir des simulations climatiques passe par une chaîne complexe de modélisation. L'étape suivant la sélection des simulations climatiques est la modélisation des niveaux des Grands Lacs. Cette modélisation est effectuée par l'équipe du Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL, NOAA) à l'aide du Large Basin Runoff Model (LBRM). À partir des observations quotidiennes de température minimale et maximale, précipitation liquide et solide, vitesse du vent, couvert nuageux, humidité et radiation, le modèle hydrologique permet de calculer l'évaporation, le ruissellement et le stockage dans les lacs. Cette première simulation réalisée à partir des données météorologiques observées constitue l'état de référence (*base case*).

Pour chacun des quatre scénarios préparés par L. Mortsch, les deltas de température minimale et maximale, précipitation, vitesse du vent, humidité et radiation sont calculés en comparant les simulations climatiques et climats de référence et futur. Ces deltas, calculés à l'échelle mensuelle, sont ensuite appliqués aux séries quotidiennes observées, les mêmes utilisées pour calculer l'état de référence. On obtient ainsi des niveaux de lacs pour chacun des quatre scénarios de climat futur.

L'étape suivante dans la chaîne de modélisation consiste à appliquer un modèle de régularisation. En effet, le barrage Moses-Saunders situé près de Cornwall régule l'écoulement du lac Ontario vers le fleuve Saint-Laurent. Les différentes règles de régularisation sont codifiées dans le plan 58-DD établi par la CMI et modélisées par le Coordinated Great Lakes Regulation and Routing model (CGLRRM). Les niveaux du lac Ontario modélisés par le LBRM sont donc convertis en débit du fleuve, auquel s'ajoute le débit des différents affluents.

Le calcul des niveaux du fleuve est estimé en première instance par les travaux de Fan et Fay (voir (Fan et Fay 2003b; Fan et Fay 2003c; Fan et Fay 2002; Fan et Fay 2003a; Fan et Fay

2003d)). Leur approche consiste à calibrer une relation de type régression entre les débits et les niveaux observés. Cette relation tient compte de l'effet des glaces, du coefficient de frottement aux différents sites et de l'effet des marées. En estimant de manière simplifiée les débits des différents tributaires du fleuve en scénario de changement climatique, F&F arrivent ainsi à convertir les débits à l'exutoire du barrage Moses-Saunders en niveaux aux cinq points de contrôle (Montréal, Varennes, Sorel, Lac St-Pierre, Trois-Rivières et Batiscan). Une relation existe également pour la station Pointe-Claire.

Si pour certains GTS les niveaux aux points de contrôle suffisent, ce n'est pas le cas de tous. Par exemple, le volet Tourisme requiert les niveaux d'eaux aux différentes marinas situées aux abords du fleuve. Afin d'interpoler les niveaux calculés par les relations de F&F, les simulations hydrodynamiques d'EC sont utilisées. Le modèle hydrodynamique d'EC développé à l'INRS-ÉTÉ permet, à partir de conditions frontière de débit amont et de niveau aval, de calculer l'écoulement 2D le long du tronçon fluvial. Cela permet d'estimer les niveaux partout sur le fleuve pour une condition d'écoulement donnée. En raison du temps de calcul considérable, le modèle n'est pas utilisé pour générer des séries temporelles d'écoulement. La stratégie d'EC consiste plutôt à caractériser un petit nombre de conditions stationnaires couvrant toute la plage des débits, puis d'interpoler entre ces conditions pour estimer les niveaux pour un débit donné. Les conditions de débits correspondants aux des huit scénarios stationnaires du modèle hydrodynamique sont présentés au **Tableau 2** et **Tableau 3** pour le tronçon Montréal-Trois-Rivières et le lac St-Louis respectivement.

Tableau 2 Conditions limites de débits amont et aval ainsi que des tributaires du tronçon Montréal/Trois-Rivières pour les huit scénarios stationnaires d'EC. Les valeurs correspondent aux conditions de printemps et automne.

Scénario	Tributaires amont de Sorel			Tributaires aval de Sorel						Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Sorel	Lasalle	MIP	Assomption	Richelieu	Yamaska	Saint-François	Nicolet	Maskinongé	duLoup	Trois-Rivières	
m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	
8	20 500	14 531	5 374	550	1 100	410	980	380	122	107	23 554
7	17 500	13 174	3 824	502	1 044	345	850	233	119	97	20 188
6	14 500	11 396	2 772	332	898	220	572	130	105	92	16 517
5	12 000	10 102	1 750	148	615	126	330	76	43	37	13 227
4	9 500	8 304	1 142	54	326	52	155	30	16	14	10 093
3	8 000	6 997	960	43	240	38	139	24	14	14	8 469
2	6 500	5 740	728	32	148	29	128	19	8	11	6 843
1	5 000	4 572	398	30	137	28	120	17	7	10	5 319

Tiré de *Morin et Bouchard (2001)*

Tableau 3 Conditions limites de débits amont et aval ainsi que des tributaires du lac St-Louis pour les huit scénarios stationnaires d'EC. Les valeurs correspondent aux conditions de printemps et automne.

Scenario	Spring	1	2	3	4 + 5	6	7	8
	Lasalle	Carillon	Milles-îles	Des Prairies	Chenaux Sainte-Anne +Vaudreuil	Les Cèdres	Beauharnois	Châteauguay Outlet
8	14531	9590	1640	3680	4270	2401	7660	200
7	13174	7375	954	2670	3751	1815	7444	164
6	11396	4885	609	1960	2316	1751	7262	67
5	10102	3288	360	1440	1488	1464	7097	53
4	8304	2784	264	1284	1237	427	6589	52
3	6997	2127	155	1100	872	383	5699	43
2	5740	1339	100	858	381	336	5102	11
1	4572	610	18	563	29	190	4345	8

Tiré de Morin et coll. (2003).

La procédure d'interpolation spatiale est décrite en détail dans le rapport de Morin et Bouchard (2009) et consiste à interpoler d'abord linéairement entre les deux points de contrôle les plus proches, puis de corriger cette interpolation par la différence entre l'interpolation linéaire des mêmes points de contrôle dans les niveaux calculés par le modèle et la valeur de niveau au site. Cette double interpolation permet de corriger le modèle pour l'effet des tributaires, dont le débit est fixé dans les simulations hydrodynamiques, mais tenu en compte par les formules de régression de F&F.

4.2.4 DONNÉES UTILISÉES

4.2.4.1 Scénarios hydrodynamiques stationnaires d'EC

Les huit scénarios 2D ont été transmis par l'équipe d'EC sous la forme d'une base de données SQLite, stockant pour chaque scénario les coordonnées du maillage du modèle (X, Y, Z), la profondeur ainsi que la vitesse de l'eau. La résolution du maillage varie considérablement d'une région à l'autre selon le degré de détail requis pour modéliser l'écoulement. La **Figure 7** illustre le domaine couvert par le modèle et la résolution atteinte par le maillage dans les canaux les plus étroits. Les simulations hydrodynamiques sont découpées en trois zones distinctes : lac St-Louis, Montréal-Lanaudière et lac St-Pierre. Les débits de la frontière aval d'une zone sont les conditions limites amont de la zone suivante. On note à cet effet une légère discontinuité à la frontière entre les zones Montréal-Lanaudière et lac St-Pierre. La **Figure 6** illustre la profondeur calculée par le modèle hydrodynamique pour les huit conditions de débit.

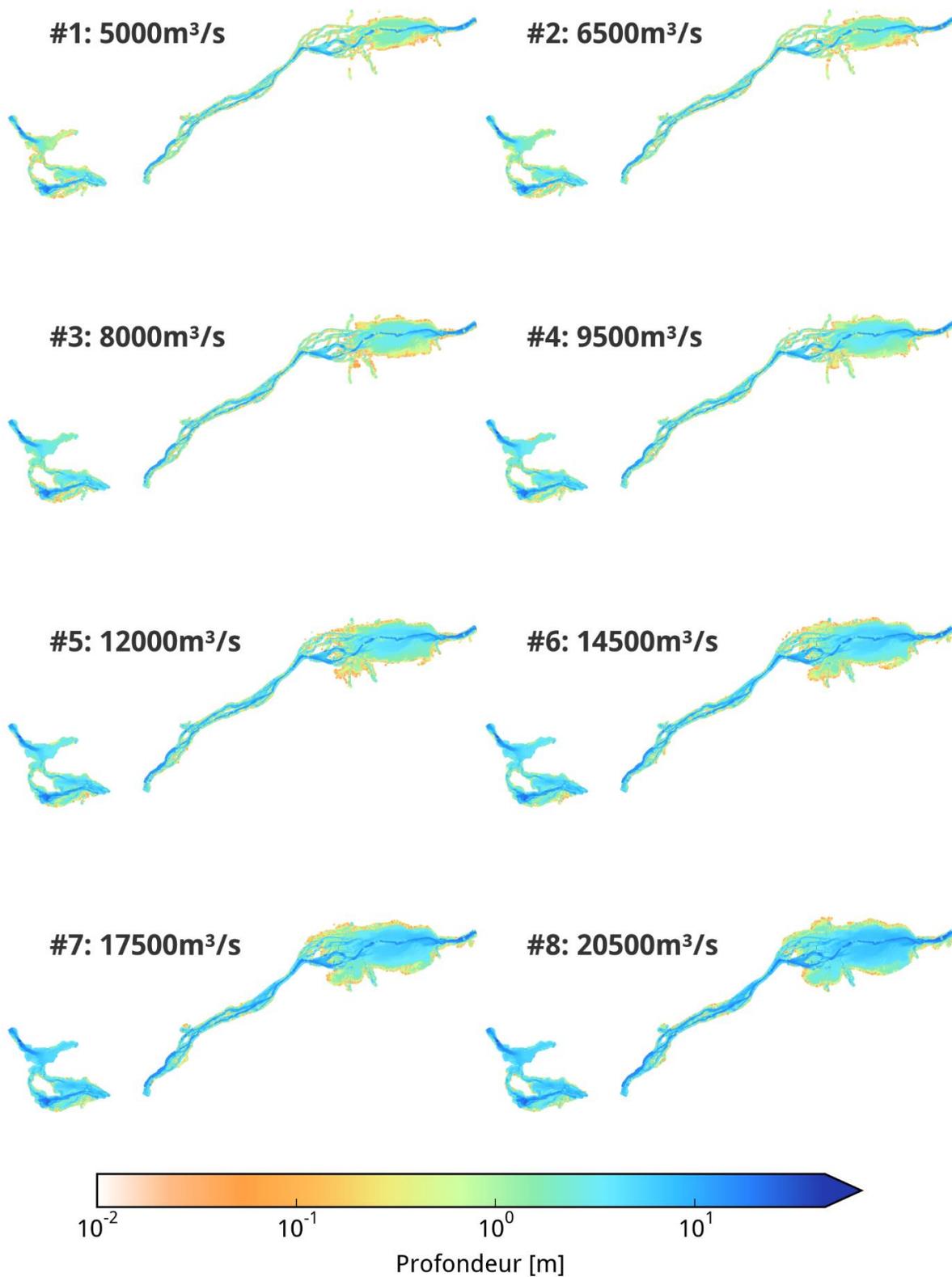


Figure 6 Profondeur du fleuve obtenue par modélisation hydrodynamique selon chacun des huit scénarios de débits à Sorel.

4.2.4.2 Niveaux et débits de Fan & Fay

Yin Fan a transmis les fichiers stockant les scénarios de base (bc : *base case*), chaud et humide (ww : *warm & wet*) et chaud et sec (wd : *warm & dry*). Ces fichiers de type CSV contiennent les débits des tributaires, les coefficients de marée, les coefficients de frottement aux différents sites et dans quelques cas les niveaux. Les formules de régression sont extraites des différents rapports contenus dans la revue de littérature. Une vérification entre les niveaux transmis par Yin Fan et les niveaux calculés à partir des régressions et des débits des tributaires a permis de valider la conformité des résultats originaux de F&F.

Avertissement : Les scénarios des tributaires de Fan et Fay ont été construits afin d'évaluer les plans de régulation du Lac Ontario et non pour une utilisation dans un cadre d'étude d'impact.

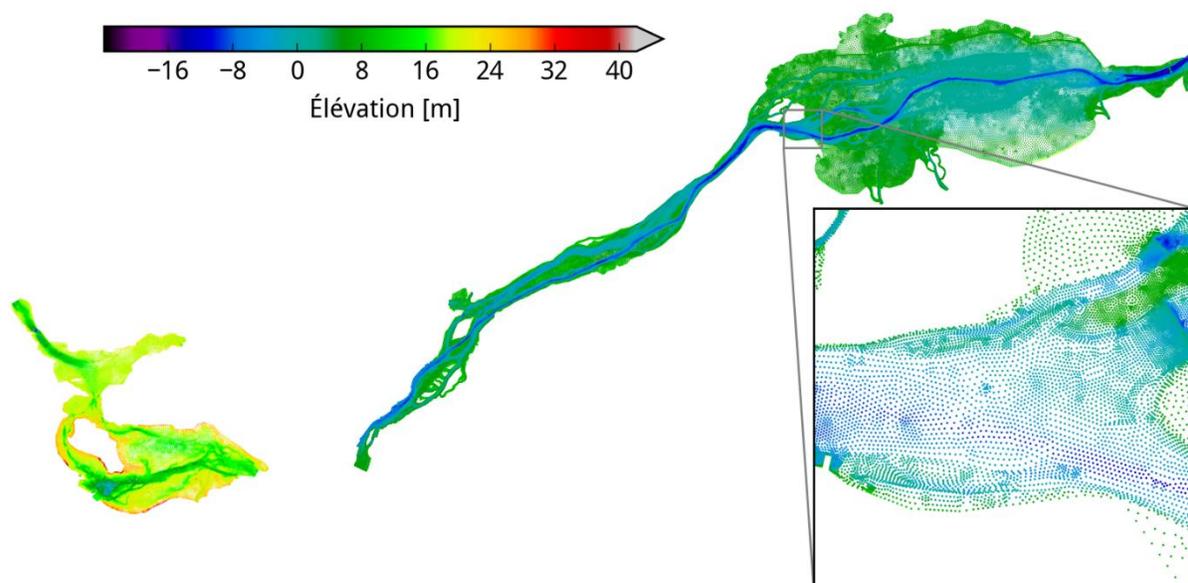


Figure 7 Élévation du lit du fleuve par rapport au niveau moyen des mers.

4.2.5 RÉSULTATS

La **Figure 8** présente les débits simulés via la chaîne de modélisation à la sortie du Lac Ontario dans l'état de référence (en gris), ainsi que les minima annuels des scénarios de référence, chaud et humide et chaud et sec. Notez que l'échelle temporelle en abscisse est celle de la simulation de référence, et que les scénarios futurs se déroulent entre 2040 et 2069. On remarque que les deux scénarios futurs sont très similaires, d'où l'intérêt de n'en choisir qu'un seul, Chaud et sec, et de développer un deuxième scénario *What-if* contrasté.

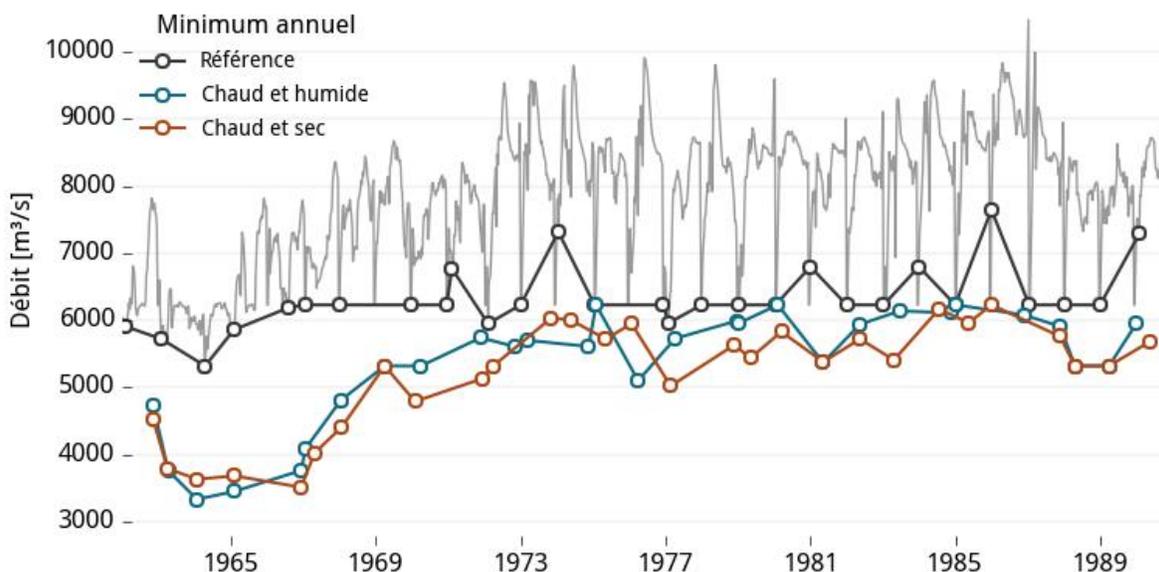


Figure 8 Illustration des scénarios de référence « base case », chaud et sec et chaud et humide préparés dans le cadre des travaux de la CMI. La courbe en gris représente le débit au quart de mois à la sortie du lac Ontario. Les cercles indiquent les minima annuels pour chacun des trois scénarios. Les années s'appliquent au scénario de référence, les scénarios futurs couvrent la période 2040-2069 en utilisant la même météo que le scénario de base auquel des deltas sur les températures et les précipitations ont été appliqués.

4.2.6 EXTENSION DU SCÉNARIO À LA PÉRIODE 2015-2039

Afin de simplifier et d'uniformiser la méthodologie des études économiques, le scénario n°1 doit couvrir la période 2015-2065. Le scénario original Chaud et sec ne couvrant toutefois que la période 2040-2069, des sections du scénario Chaud et sec et du scénario *base-case* sont extraites, corrigées et jointes afin de générer une série pour la période 2015-2039.

L'approche choisie consiste à sélectionner 10 années consécutives parmi le scénario *base-case*, et 15 années consécutives parmi le scénario Chaud et sec. Afin de reproduire la tendance à long terme, un facteur de correction est appliqué aux séries. Ce facteur de comparaison est une différence à l'échelle saisonnière entre les valeurs du scénario Chaud et sec et celles du *base-case* tenant compte de l'année ciblée. Plus précisément, pour chaque saison (s), on calcule le facteur de correction $\Delta^s = Q_{WD}^s - Q_{BC}^s$. Ce facteur de correction correspond à la différence simulée pour des variables séparées d'un intervalle de 78 ans (entre le milieu de la période *base-case*, 1977, et le milieu de la période future, 2055). Lorsqu'on applique ce facteur de correction à un horizon plus court, par exemple à l'année 2015, on doit l'appliquer proportionnellement au temps écoulé.

Les 10 années de la série *base-case* et les 15 années de la série Chaud & sec ont été sélectionnées de manière à minimiser les sauts entre les différentes sections, tenant compte de la correction appliquée. La **Figure 9** illustre les étapes de construction de l'extension du scénario à la période 2015-2039.

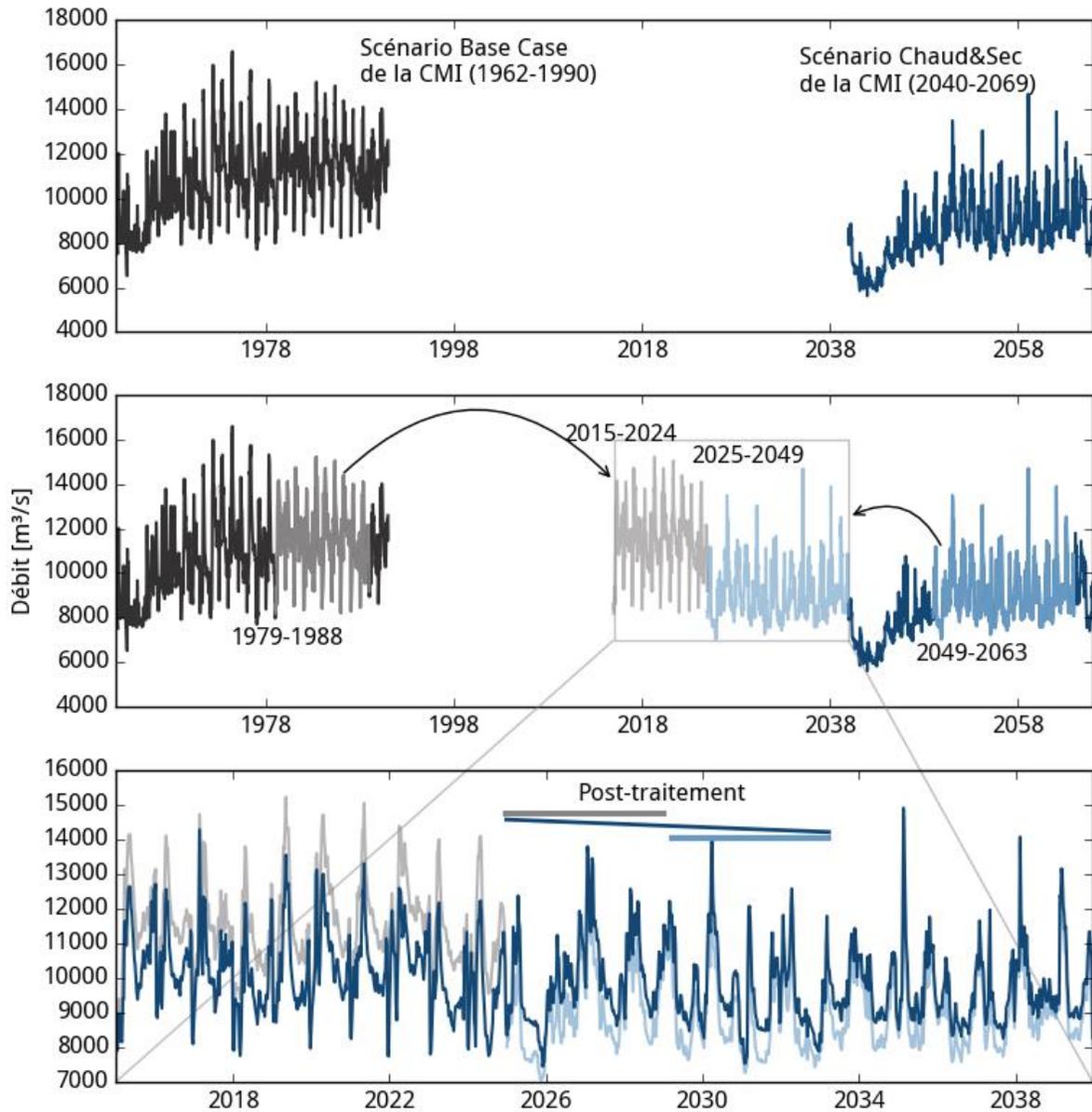


Figure 9 Le scénario n°1 original ne couvrant que la période 2040-2069, une extension à la période 2015-2039 a été complétée afin de faciliter les études économiques. Cette extension est composée de 10 années de la série *base-case*, et de 15 années du scénario Chaud et sec. Chacune de ces deux sections est ensuite corrigée pour appliquer progressivement la différence mesurée entre les scénarios Chaud et sec et *base-case*.

4.3 SCÉNARIO N°2: CYCLE SAISONNIER AMPLIFIÉ 2015-2065

4.3.1 VUE D'ENSEMBLE

Le deuxième scénario *What-if* prend une approche complètement différente du scénario n°1. Plutôt que de tenter de passer par toute la chaîne de modélisation hydrologique, on s'appuie sur les apports nets aux bassins (Net Basin Supply, NBS) pour identifier une relation entre ces NBS et les débits du fleuve. L'approche est considérablement moins rigoureuse que la première, mais permet d'arriver rapidement à un scénario contrasté du premier.

4.3.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES

Les calculs de NBS ont été effectués par Biljana Music, climatologue à Ouranos. Les 10 simulations analysées pour ce travail sont identifiées dans le **Tableau 4**. Pour chacune des simulations, les précipitations, l'évaporation et le ruissellement ont été extraits afin de calculer les NBS pour chacun des bassins composant les Grands Lacs. Le NBS de l'ensemble des Grands Lacs est ensuite calculé en faisant la moyenne pondérée par la superficie des bassins.

Tableau 4 Simulations climatiques régionales analysées.

Pilote	Scénario SRES	Alias référence	Alias futur
CGCM3.1	A2	aey	afb
		aez	afc
		afa	afd
		aet	aeu
		aev	aew
ECHAM5	A2	agx	agz
		ahi	ahk
		ahj	ahw
CGCM2.3	A2	afp	afq
CNRM-CM3	A1B	agw	ahb

Le cycle annuel des NBS est présenté à la **Figure 10** dans le panneau supérieur. Chaque courbe de couleur représente une simulation et la courbe en noir correspond aux observations. Le panneau inférieur illustre la différence entre les NBS en climat futur et en climat de référence. On constate d'abord que les modèles exagèrent le cycle annuel par rapport aux observations, et que les changements climatiques semblent amplifier cet effet. Enfin, à l'échelle annuelle, environ la moitié des modèles projettent une augmentation d'apports et l'autre moitié projette une diminution. Autrement dit, il ne semble pas y avoir de consensus clair parmi les modèles sur la tendance des apports nets.

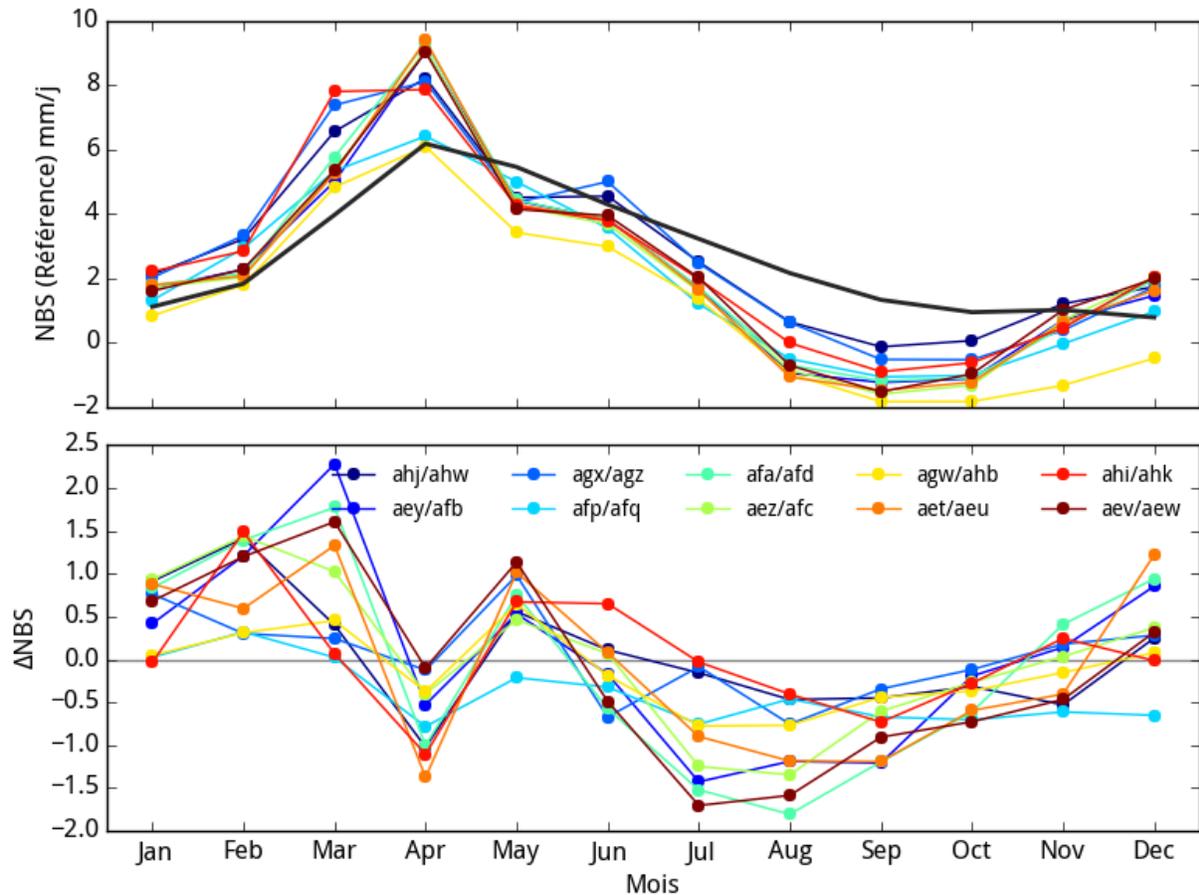


Figure 10 Cycle annuel des apports nets aux bassins des Grands Lacs simulés par les modèles climatiques et observés (noir). Le panneau inférieur présente la variation de NBS en climat futur.

4.3.3 CONSTRUCTION DU SCÉNARIO N°2

Le scénario n°2 est construit à partir de la simulation montrant le changement de NBS en climat futur le plus accentué, soit afa/afd. Cette simulation projette une augmentation marquée des apports hivernaux et une diminution des apports estivaux. Pour construire le scénario n°2, on assume qu'il existe un lien entre le cycle annuel du NBS et le cycle annuel des débits du fleuve, tel qu'illustré à la **Figure 11**. Le débit du fleuve est celui du scénario de référence, soit le débit à Sorel entre 1958 et 2008². Spécifiquement, le delta de débit mensuel est calculé en multipliant le delta de NBS par le rapport de l'amplitude du cycle de débit sur l'amplitude du cycle de NBS :

$$\Delta Q_m = \Delta NBS_m \frac{\max \bar{Q} - \min \bar{Q}}{\max \bar{NBS} - \min \bar{NBS}} \quad (1)$$

² Dans une version antérieure, le scénario #2 couvrait la période 2010-2069, se basant sur le scénario de référence entre 1953 et 2012. Afin de standardiser les paramètres des études économiques, la période des scénarios futurs a été restreinte à 2015-2065. Pour minimiser les surprises, le scénario original a été tronqué plutôt que translaté, faisant en sorte que le scénario futur sur 2015-2065 est bâti sur le scénario de référence 1958-2008.

où l'indice m réfère au quart de mois, \bar{Q} au vecteur de débits quart de mois moyens et \overline{NBS} au vecteur de NBS mensuels moyens. Les NBS au quart de mois sont interpolés linéairement des NBS mensuels. Autrement dit, on assume qu'une variation de 10% du NBS par rapport à l'amplitude du cycle annuel correspond à une variation de 10% du débit par rapport au cycle annuel du débit. Le ΔQ est appliqué progressivement en fonction du temps. C'est-à-dire qu'on assume que la condition de référence correspond à 1975, et les conditions futures à 2065; pour les autres années, le ΔQ est interpolé ou extrapolé linéairement. Les débits de 2020 sont donc perturbés par 50% du ΔQ .

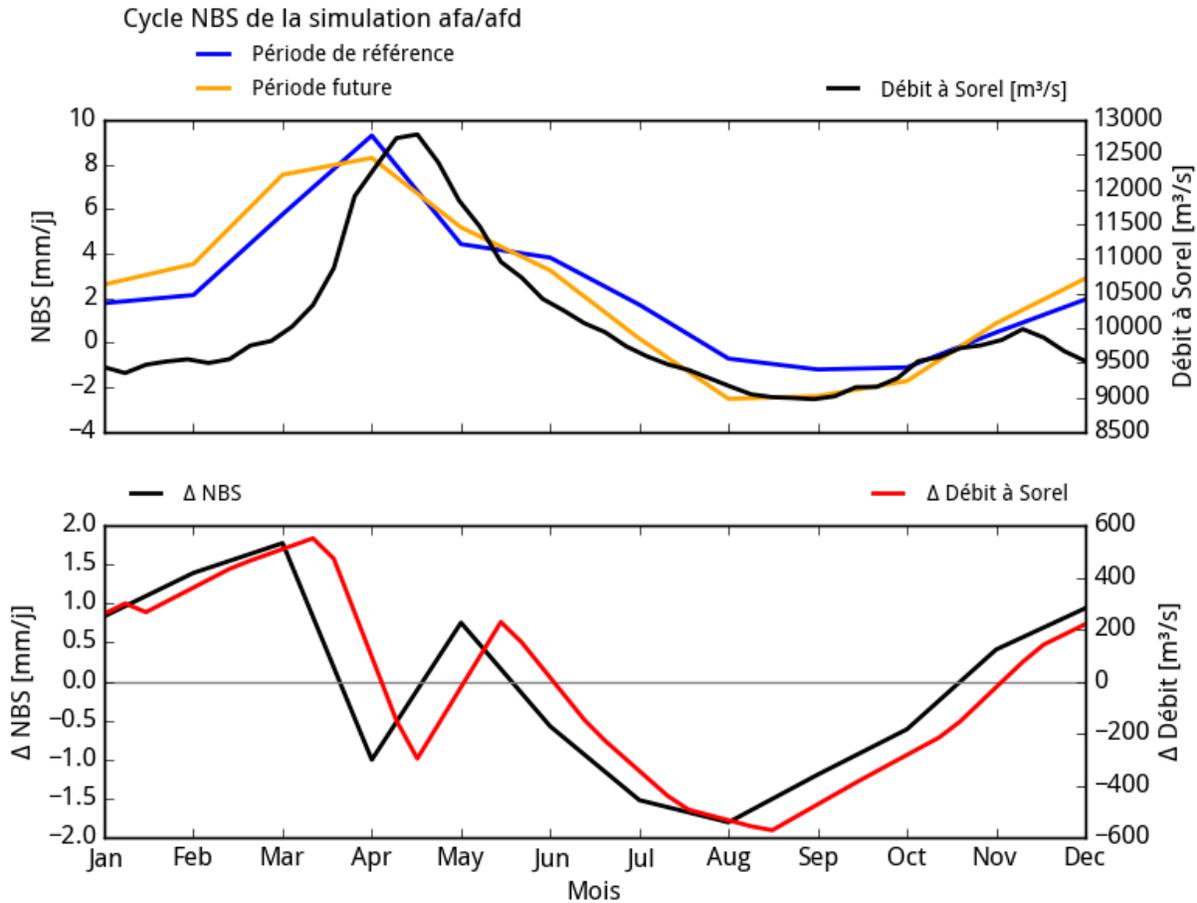


Figure 11 Le scénario n°2 est construit en faisant un lien entre les NBS des Grands Lacs et le débit du fleuve à Sorel (panneau supérieur). Les différences de NBS en climat futur sont converties en différences de débit (panneau inférieur) via une relation de proportionnalité. Le cycle annuel des débits est calculé à partir de la série de débits reconstitués à Sorel au cours de la période 1953-2012.

4.3.4 DONNÉES UTILISÉES

Les données requises pour la construction du scénario n°2 incluent les NBS simulés par l'ensemble de simulations climatiques régionales fournies par Biljana Music, les aires des bassins tels que définies dans le modèle régional, également fournies par B. Music, ainsi que la série de débits reconstitués à Sorel, fournie par l'équipe d'Alain Bouchard de la section

hydrologie et écohydraulique du Service météorologique du Canada. Pour le calcul des niveaux, on utilise également les huit scénarios stationnaires hydrodynamiques d'EC.

4.3.5 RÉSULTATS

La **Figure 13** présente le scénario n°2 (en rouge) ainsi que la série de débits reconstitués à Sorel (en noir) à partir de laquelle le scénario a été construit. Malgré l'absence de forte tendance à long terme, l'amplification du cycle annuel fait en sorte que le scénario n°2 présente des bas niveaux pendant l'été plus faibles que durant la période historique. Pour ce qui est des crues, le scénario n°2 présente peu de changements par rapport à la série de référence.

4.4 COMPARAISON DES SCÉNARIOS

Le **Tableau 5** résume les scénarios choisis pour l'étude économique ainsi que les alias utilisés pour identifier les fichiers.

Tableau 5 Description des scénarios proposés pour l'étude économique. Les alias sont utilisés pour identifier les fichiers contenant les scénarios.

Nom	Alias	Méthodologie	Description
Scénario de référence	REF	Débits reconstitués à Sorel (1953-2012) à partir d'observations.	Scénario reflétant les conditions historiques du fleuve, incluant sa variabilité naturelle.
Scénario n°1: Chaud et sec 2015-2065	W11	Scénario « Chaud et sec » de la CMI (2015-2065) utilisant les projections du modèle CGCM2 avec le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A21.	Scénario de baisse progressive des débits et niveaux se superposant à la variabilité naturelle.
Scénario n°2: Cycle saisonnier amplifié 2015-2065	W12	Perturbation des débits reconstitués à Sorel par une amplification du cycle annuel calculée à partir de la simulation afa/afd du MRCC.	Scénario illustrant une amplification du cycle annuel, soit plus d'eau en crue et moins d'eau en étiage, sans changement notable à la moyenne annuelle.

Les trois scénarios choisis sont illustrés et comparés à la **Figure 12** et la **Figure 14**. Dans le scénario n°1, des niveaux très bas sont atteints à Sorel dès les années 2040, puis la situation revient à la normale avant de retourner vers des niveaux bas vers 2070. Dans le scénario n°2, des niveaux bas sont atteints dès 2020 avant de retourner vers des valeurs élevées en 2030. Les niveaux baissent graduellement pour atteindre des minima encore plus faibles que dans le premier scénario. On note que la baisse de niveau observée dans les années 1960 se retrouve dans les scénarios futurs à différents moments, soit 2040 dans le scénario n°1 et 2020 dans le scénario n°2. Ce positionnement est volontaire et devrait permettre de mieux mesurer la sensibilité des impacts économiques à l'occurrence des extrêmes de bas niveau.

Pour ce qui est du cycle annuel, la **Figure 12** montre que le scénario n°2 projette des débits hivernaux plus élevés ainsi que des débits estivaux plus bas que le scénario de référence. Bien que le niveau moyen du scénario n°1 soit plus faible que celui du scénario n°2, la plus grande

variabilité interannuelle de ce dernier fait en sorte que les extrêmes de bas niveau sont plus sévères. Les **Tableau 8** Niveaux des conditions limites des huit scénarios stationnaires d'EC. et **Tableau 7** présentent les valeurs numériques des niveaux et débits moyens mensuels de chacun des scénarios.

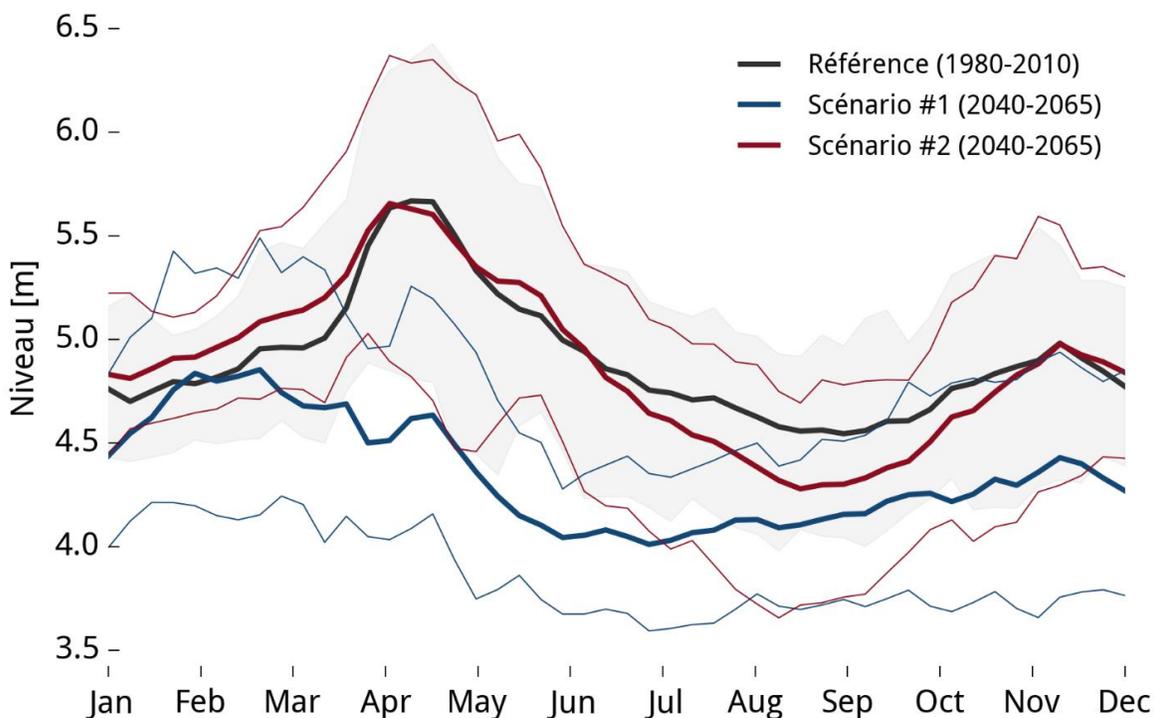


Figure 12 Cycle annuel moyen des scénarios de référence (1980-2010), n°1 (2040-2065) et n°2 (2040-2065) à Sorel. La zone ombragée et les lignes fines indiquent l'intervalle couvert par les 10^e et 90^e percentiles.

Tableau 6 Moyennes mensuelles des niveaux des scénarios de référence (1980-2010), n°1 (2040-2065) et n°2 (2040-2065) à Sorel.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
Référence	4.8	4.9	5.0	5.6	5.3	5.0	4.8	4.6	4.6	4.7	4.8	4.9	4.9
Scénario n°1	4.6	4.8	4.7	4.6	4.3	4.1	4.0	4.1	4.1	4.2	4.3	4.4	4.4
Scénario n°2	4.9	5.0	5.2	5.6	5.3	5.0	4.6	4.4	4.3	4.5	4.8	4.9	4.9

Tableau 7 Moyennes mensuelles des débits des scénarios de référence (1980-2010), n°1 (2040-2065) et n°2 (2040-2065) à Sorel.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
Réf	9659	9981	10554	12538	11542	10453	9737	9366	9093	9404	10023	10102	10204
Sn° 1	8779	9345	9365	9013	8335	8008	7862	7836	7983	8316	8668	8791	8525
Sn°	9968	10439	11138	12535	11678	10546	9365	8703	8391	8888	9819	10204	10139

2														
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

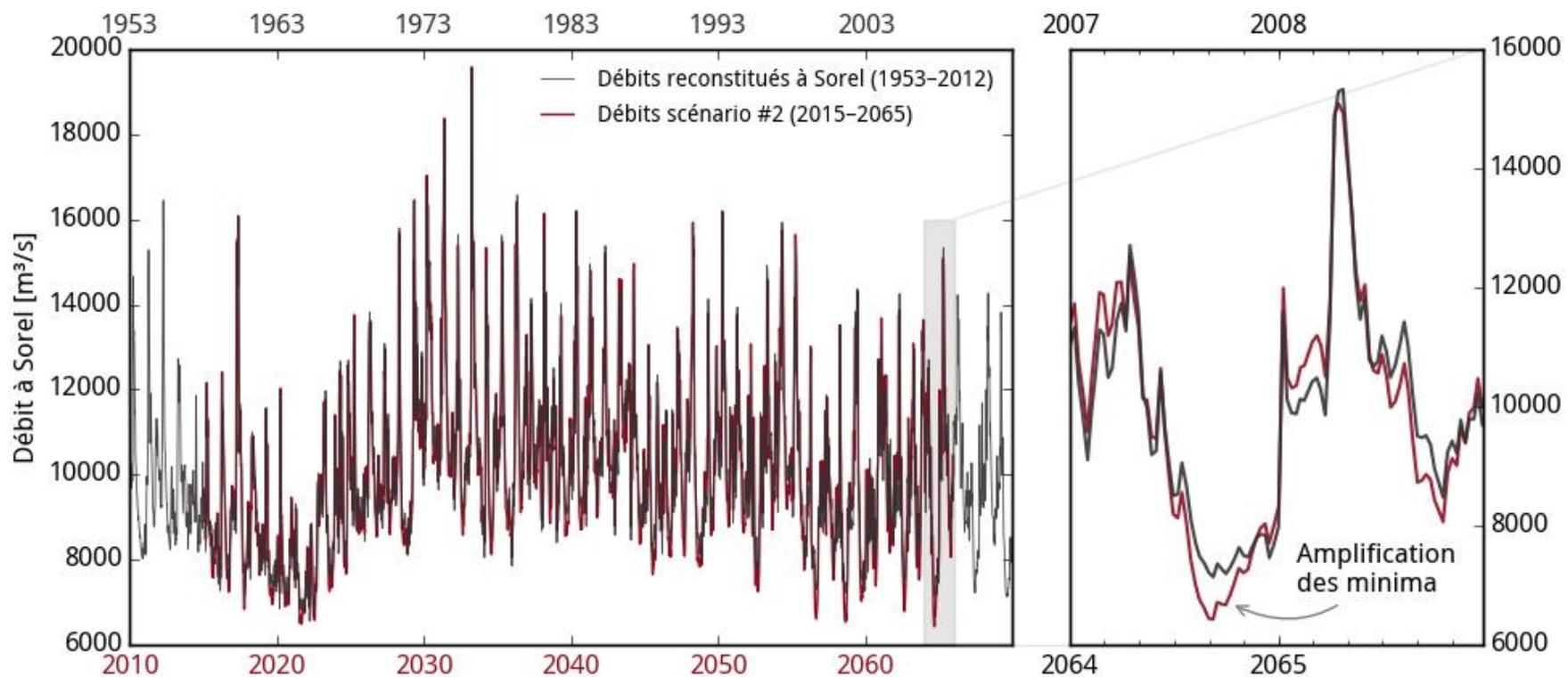


Figure 13 Scénario What-If n°2 (rouge) comparé aux débits reconstitués à Sorel (noir). Dans le scénario n°2, le signal de changement climatique amplifie le cycle annuel en augmentant les débits hivernaux et en diminuant les débits estivaux.

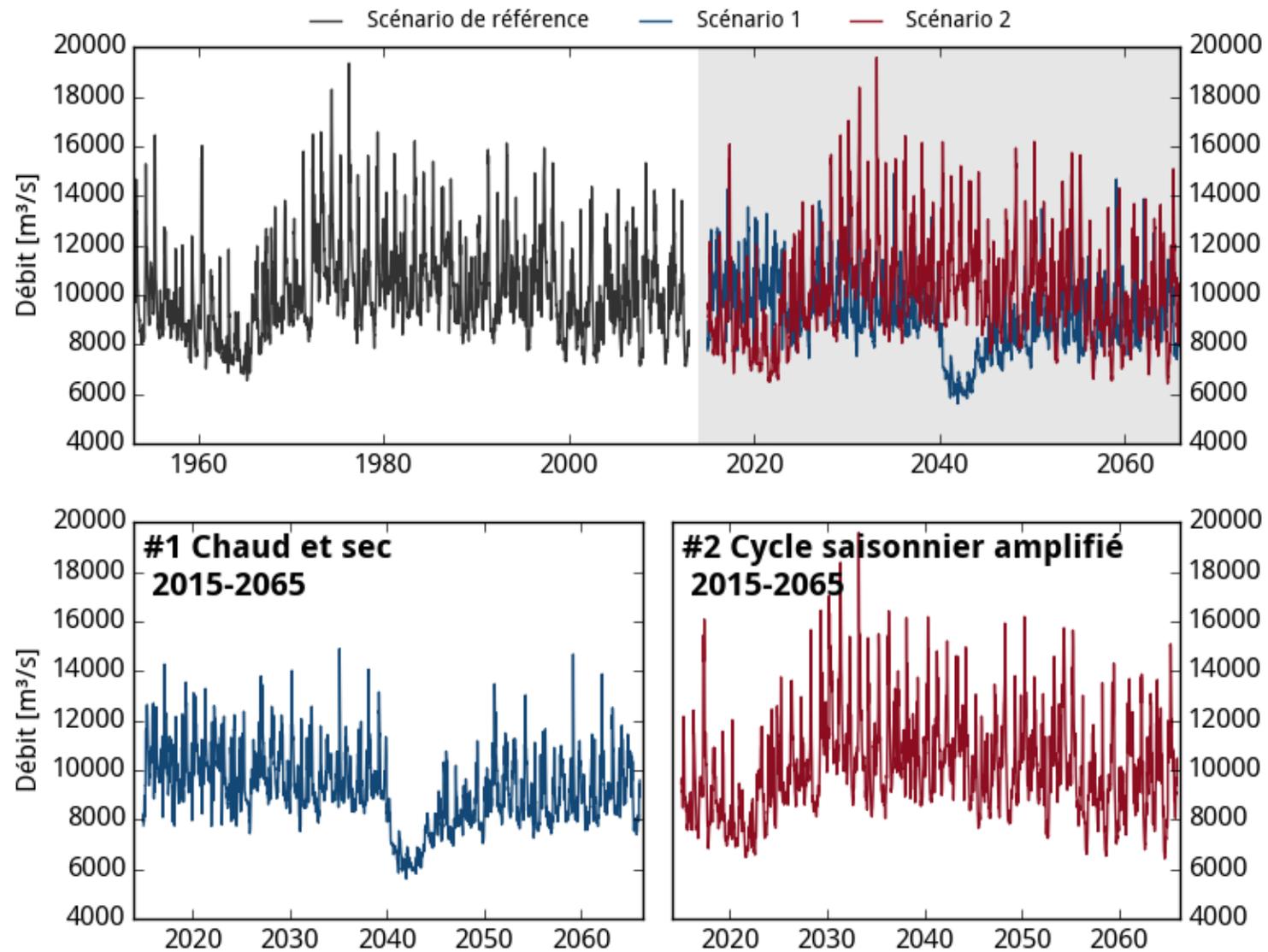


Figure 14 Niveau d'eau du Saint-Laurent à la station de Sorel selon le scénario de référence et les scénarios n°1 et n°2.

5. DÉTAIL DES SCÉNARIOS PRÉPARÉS POUR LES GROUPES DE TRAVAIL

5.1 ÉCOSYSTÈMES

Les scénarios de niveaux décrivent le niveau du fleuve à la station 02OC016 Lac St-Pierre au Curb No. 2. Le débit pour le scénario n°1 provient de la série de F&F pour le Lac St-Pierre (lsp). Le débit du scénario n°2 est interpolé des débits à Trois-Rivières.

5.2 EAUX MUNICIPALES

Dans un premier temps, des scénarios de niveaux à la station Pointe-Claire (02OA039) ont été transmis. Le niveau du scénario n°1 est calculé à partir de la formule $H = 16.57 + \frac{(F_g Q)^{.58}}{604}$, où F_g est le facteur de glace et Q le débit à la sortie du Lac St-Louis. Ce débit du scénario n°1 provient de la série F&F pour le Lac St-Louis (stl). Le débit du scénario n°2 est interpolé à partir des débits à LaSalle.

Les niveaux des scénarios de référence et n°2 sont calculés par une approche différente de celle utilisée pour les autres volets et visant à mimer la méthodologie utilisée dans le rapport de Carrière et Barbeau (2003). Plutôt que d'interpoler linéairement entre les valeurs des huit scénarios par une ligne brisée, une fonction de type $h(q) = aq^b$ est calibrée sur les huit valeurs de débits et de niveaux associés provenant du modèle hydrodynamique à la station Pointe-Claire. Cette calibration par moindres carrés permet d'identifier les paramètres a, b et par la suite de calculer les niveaux correspondant à un débit donné. Cette approche permet de reproduire les relations niveaux-débits utilisés par Carrière et Barbeaux au centimètre près.

Dans un deuxième temps, des scénarios de niveaux pour les stations d'eau potable et de débits pour les stations d'eaux usées ont été transmis. On note que les débits correspondent au débit total du fleuve, et non aux débits des tronçons spécifiques dans lesquels se jettent les rejets des usines de traitement des eaux.

5.3 TOURISME

Les scénarios décrivent le niveau du fleuve à sept sites nautiques du tronçon Montréal-Trois-Rivières : YC Royal Saint-Laurent, Port de plaisance de la Ronde, Port de plaisance Réal-Bouvier, Marina de Repentigny, Marina de Saurel (Parc nautique fédéral), Halte des 103 Iles, Club nautique de la Batture. Les niveaux du scénario n°1 et n°2 sont interpolés selon la méthodologie décrite dans la section précédente.

Afin d'illustrer les épisodes de bas niveau, des graphiques ont été préparés montrant les occurrences de niveaux inférieurs à 10 cm au-dessus du zéro des cartes (**Figure 15**).

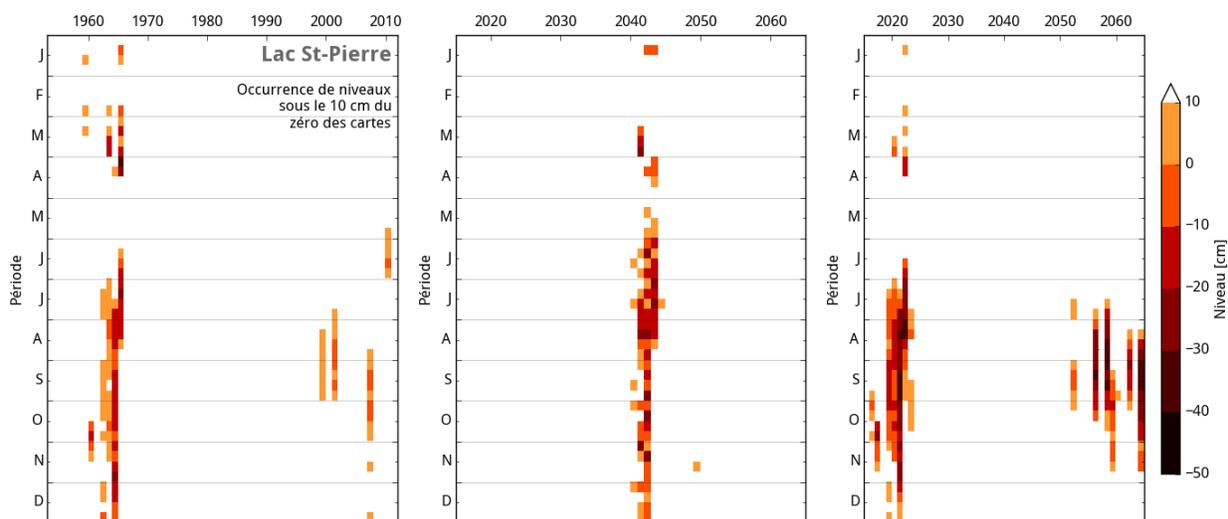


Figure 15 Occurrence de niveaux inférieurs à 10 cm au-dessus du zéro des cartes au lac Saint-Pierre pour les scénarios de référence, n°1 et n°2. Chaque rectangle correspond à un quart de mois, dont la couleur indique le niveau par rapport au zéro des cartes. Les régions en blanc sont celles pour lesquelles les niveaux se maintiennent au-dessus de la barre du 10 cm.

5.4 VALEURS FONCIÈRES

Les valeurs foncières étant fonction de la proximité des propriétés à la rive, un algorithme a été utilisé pour tracer pour chacune des 8 simulations stationnaires d'EC les contours de niveau égal à 0. Les polygones résultants ont été sauvegardés en format MapInfo. La **Erreur ! Source du envoi introuvable.** présente un exemple de tels polygones dans la région du lac St-Louis.

5.5 PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE

Les scénarios décrivent les débits cumulés aux centrales Beauharnois et Les Cèdres.

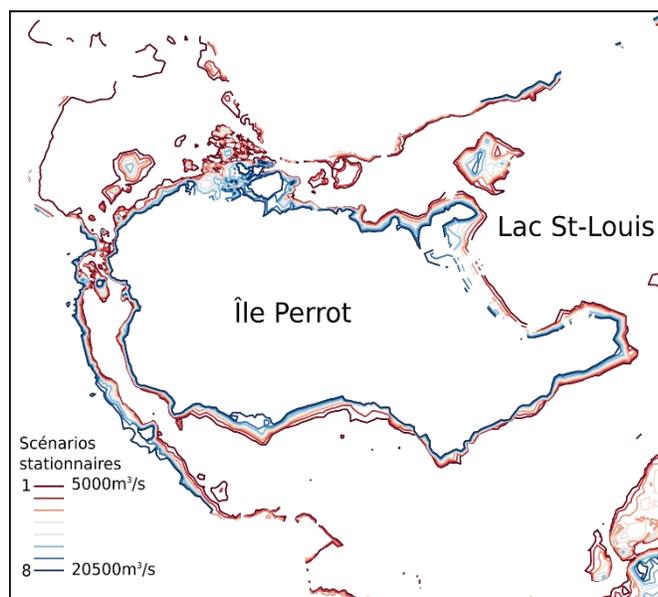


Figure 16 Lignes de contour traçant la rive pour chacun des huit scénarios stationnaires dans la région du Lac St-Louis.

Les débits sont interpolés de la série des débits à Sorel utilisant les valeurs de correspondance du **Tableau 3**³. La **Figure 17** présente les séries des scénarios. On remarque pour le scénario n°1 une série de minima dans les premières 10 années en diminution constante. Cette forme de peigne se retrouve dans la série *base-case* et est due à la régulation du fleuve Saint-Laurent, spécifiant des débits maxima de 6230m³/s lors de la formation de la glace sur le fleuve. La correction appliquée au scénario *base-case* pour créer l'extension 2015-2039 du scénario n°1 modifie artificiellement cette valeur. Puisque ce sont des débits hivernaux, l'influence sur l'étude économique est supposée faible.

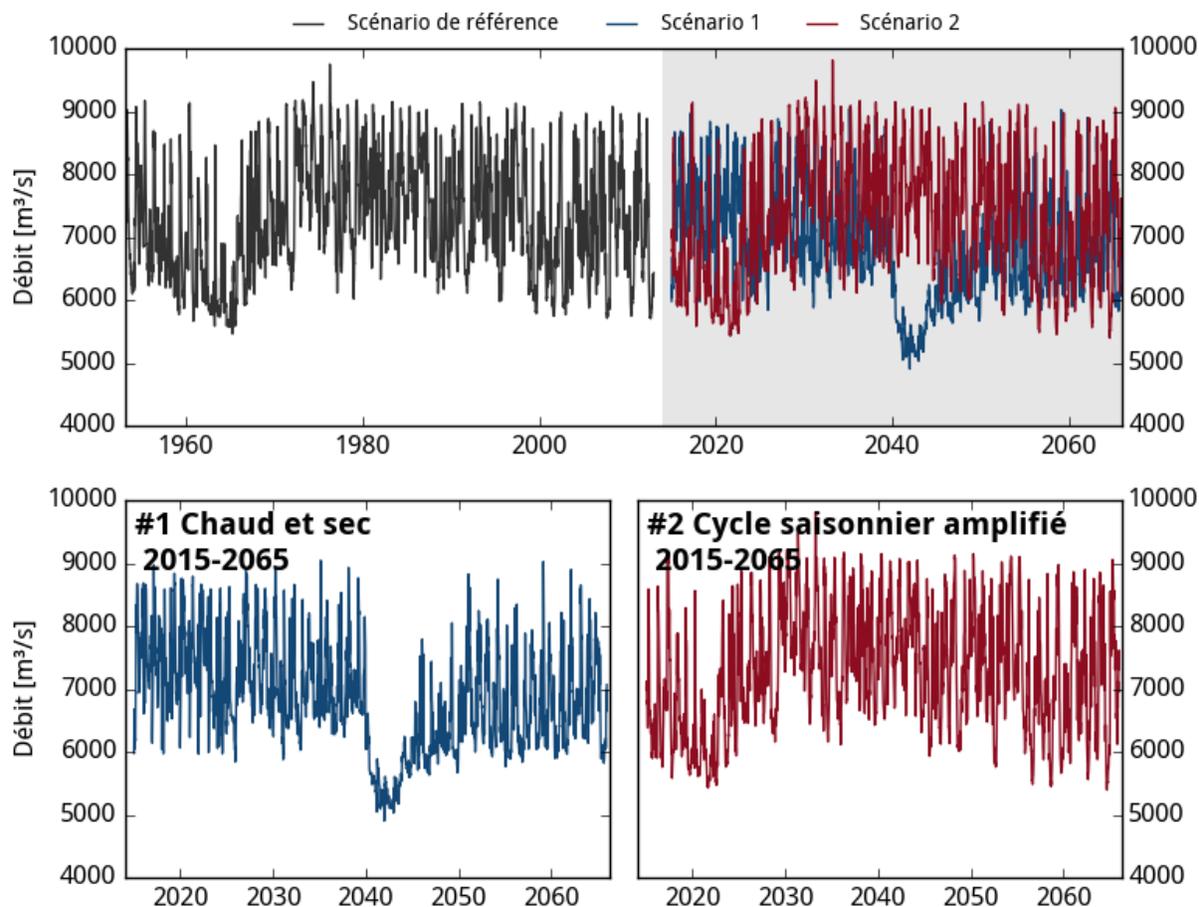


Figure 17 Scénarios de débits à la sortie du lac Ontario.

5.6 TRANSPORT MARITIME

Les scénarios décrivent le niveau du fleuve à la Jetée n°1 du port de Montréal. Le niveau du scénario n°1 est calculé à partir des relations de F&F au site Montréal, situé à la bouée de la

³ Bien qu'il eut été possible pour le scénario #1 d'utiliser les débits de F&F à l'exutoire du lac Ontario, par souci d'uniformité il a été décidé d'utiliser la même méthode d'interpolation que pour les autres scénarios. Aussi, l'extension à partir de la série *base-case* et son post-traitement donne une apparence artificielle à la série de F&F à la sortie du Lac Ontario.

Jetée n°1. Le niveau du scénario n°2 est interpolé à partir des valeurs du **Tableau 8**. Les valeurs fournies sont des niveaux par rapport au zéro des cartes, situé 5.56m plus bas que les niveaux calculés par rapport à la référence IGLD85. Un enjeu majeur pour le transport maritime est la fréquence d'occurrence de bas niveau limitant la capacité de chargement des navires. La **Figure 18** compare la distribution du scénario de référence avec celui des observations à la station sur la période 1980-2010. Il ne semble pas y avoir d'erreur ou de biais important sur cette période, validant l'approche d'interpolation des niveaux utilisée dans le travail. On note toutefois que des différences plus significatives existent pour la période antérieure à 1980 (voir **Figure 19**).

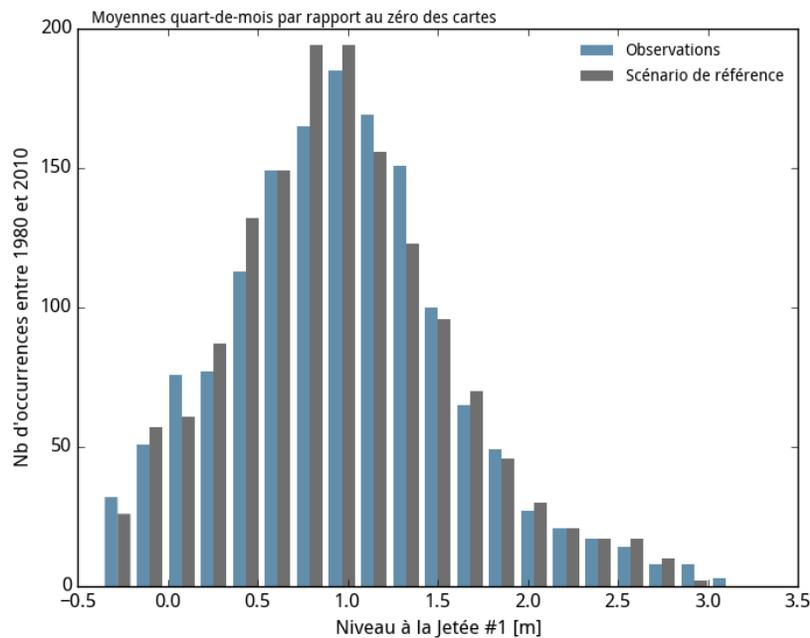


Figure 18 Distribution des niveaux observés à la Jetée n°1 avec ceux du scénario de référence (1980-2010), interpolés à partir des valeurs du **Tableau 8**. Les niveaux sont donnés par rapport au zéro des cartes.

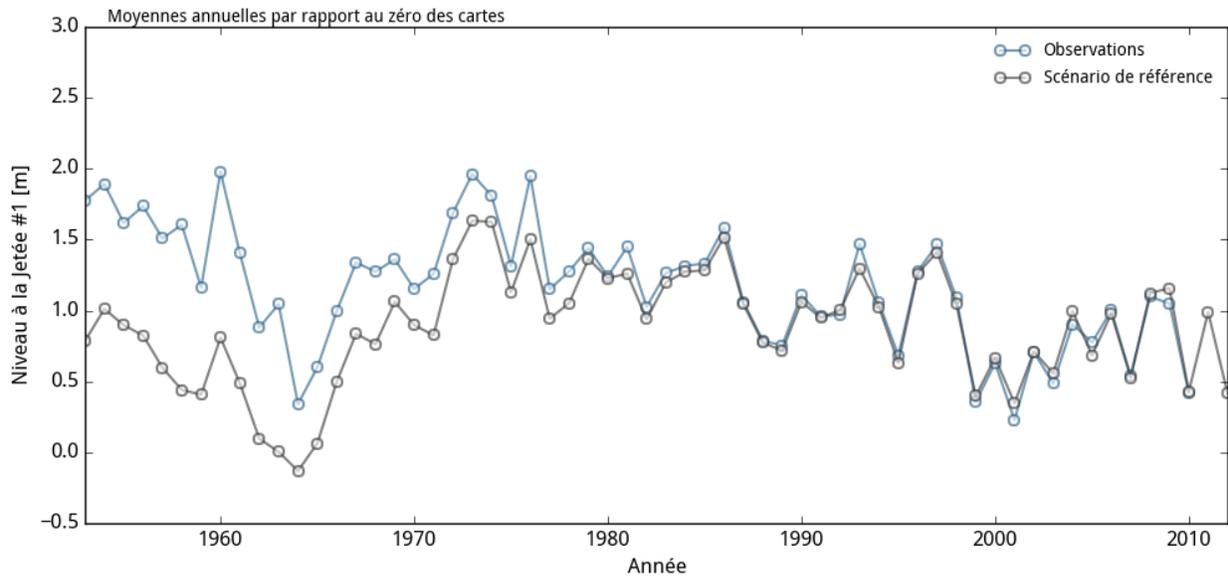


Figure 19 Moyennes annuelles des niveaux observés et du scénario de référence à la Jetée n°1. On note la présence de biais importants jusqu'en 1980.

Tableau 8 Niveaux des conditions limites des huit scénarios stationnaires d'EC.

Scénario	Hiver				Printemps				Été			
	Jetée #1	Varenes	Sorel	Trois-Rivières	Jetée #1	Varenes	Sorel	Trois-Rivières	Jetée #1	Varenes	Sorel	Trois-Rivières
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942
8					9.82	9.06	8.01	7.24				
7					8.80	7.98	6.92	6.16				
6					7.99	7.20	6.22	5.53				
5	7.29	6.33	5.40	4.55	7.19	6.37	5.42	4.69	7.24	6.31	5.22	4.34
4	6.71	5.99	5.04	3.99	6.30	5.57	4.74	4.06	6.34	5.47	4.60	3.70
3	8.71	6.32	4.86	3.84	5.61	4.95	4.17	3.55	5.84	5.06	4.24	3.32
2	5.50	4.99	4.26	3.40	4.95	4.20	3.56	2.75	5.21	4.42	3.60	2.65
1					4.29	3.48	2.96	2.52	4.48	3.93	2.97	2.29

Tirée de *Morin et Bouchard (2001)*

6. NOTES ET RECOMMANDATIONS SUR L'UTILISATION DES SCÉNARIOS

Cette section présente les détails techniques permettant de faire une utilisation rigoureuse des scénarios préparés.

6.1 QUART DE MOIS

La fréquence temporelle utilisée par les gestionnaires des débits du fleuve est le quart de mois, représentant un nombre de jours variables selon le mois. Le **Tableau 9** décrit les règles de construction de ces quart-de-mois.

Tableau 9 Jours inclus dans chaque quart de mois selon le nombre de jours dans le mois.

Quart	Mois de 28 ou 29 jours	Mois de 30 et 31 jours
1	1-7	1-8
2	8-14	9-15
3	15-21	16-23
4	22-	24-

6.2 COMPARAISON AVEC LES SCÉNARIOS UTILISÉS PAR LE MOWAT

L'étude du MOWAT sur les impacts économiques des changements climatiques sur les Grands Lacs utilisent deux scénarios basés sur un modèle, le CGCM2, un modèle de climat global développé par le Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma). Les deux scénarios représentent deux horizons, soit 2021-2040 et 2041-2060. Le scénario de gaz à effet de serre utilisé, IS92a, stipule une augmentation constante de 1% des émissions à partir des valeurs de 1990. Comparé aux scénarios SRES du quatrième rapport du GIEC, le scénario IS92a mène, en moyenne, à des hausses moins importantes de température jusqu'en 2070 (voir **Figure 20**). Toutefois, les simulations du CGCM2 semblent réagir différemment de l'ensemble des modèles du GIEC, tel qu'illustré à la **Figure 21**. En effet, les variations de température globales des scénarios IS92a et A2 sont presque identiques. Bref, il est difficile de cerner les répercussions du choix d'une simulation utilisant le scénario IS92a dans ce cas précis.

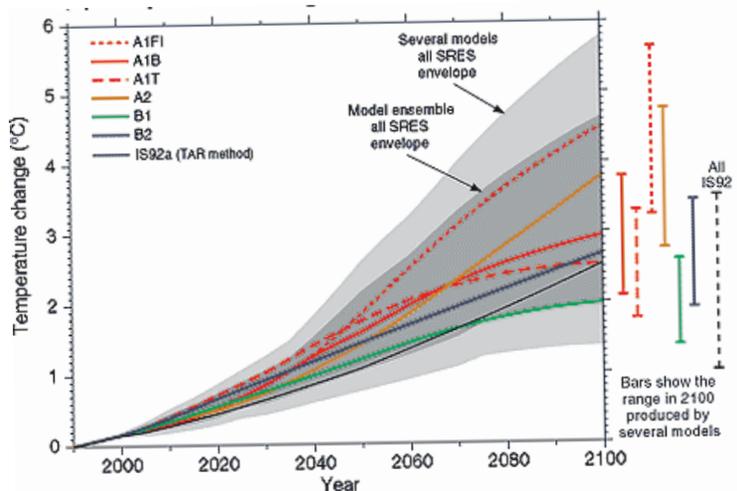


Figure 20 Changements de température projetés par un ensemble de modèles climatiques globaux selon les différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Tiré du quatrième rapport du GIEC.

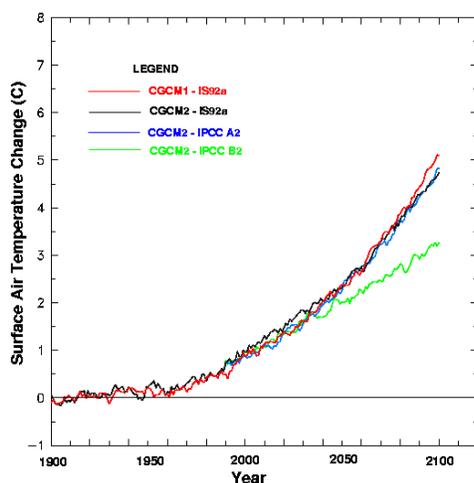


Figure 21 Changements de températures globales simulées par différentes versions du CGCM et les scénarios d'émissions de GES IS92a, A2 et B2. Tiré des archives du site du CCCma.

6.3 SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE DE « UPPER GREAT LAKES STUDY »

Suite aux discussions avec Laura Fagherazzi, hydrologue à Hydro-Québec ayant participé aux travaux de la CMI sur l'impact des changements climatiques sur les débits en provenance des Grands Lacs, une comparaison a été effectuée entre le scénario de base de l'UGLS et le scénario de base utilisé dans cette étude. La **Figure 22** illustre les différences entre le cycle annuel selon différentes approches de production de scénario. On peut considérer le scénario d'EC (Niveaux reconstitués à Sorel), comme étant le plus proche des observations. Les

différences de niveaux moyens oscillent de 0 à 20 cm entre le scénario choisi ici et celui de l'UGLS.

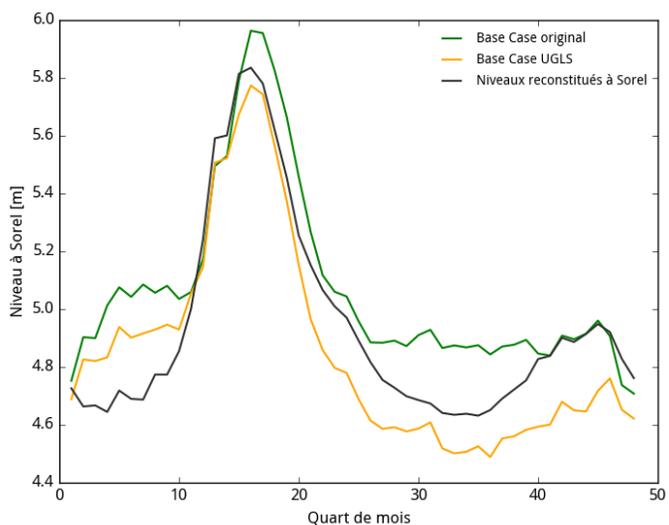


Figure 22 Moyenne des niveaux d'eau à Sorel calculés à partir de trois scénarios de base (base case), soit celui de la CMI, celui de l'UGLS et les débits reconstitués par EC. Les moyennes sont calculées sur la période allant de 1962 à 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- Angel, James R., et Kenneth E. Kunkel. 2010. "The Response of Great Lakes Water Levels to Future Climate Scenarios with an Emphasis on Lake Michigan-Huron." *Journal of Great Lakes Research* 36 (January): 51–58.
- Bouchard, André, et Jean Morin. 2000. "Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1932 et 1998."
- Carrière, Annie, et Benoit Barbeau. 2003. "Impacts of Level Fluctuations in the St. Lawrence River on Water Treatment Plant Operation."
- Croley II, Thomas E. 1990. "Laurentian Great Lakes Double-CO₂ Climate Change Hydrological Impacts." *Climatic Change* 17: 27–47.
- . 2003. "GREAT LAKES CLIMATE CHANGE HYDROLOGIC IMPACT ASSESSMENT I.J.C. LAKE ONTARIO-ST. LAWRENCE RIVER REGULATION STUDY."
- D'Arcy, P., J.-F. Bibeault, et R. Raffa. 2005. "Changements climatiques et transport maritime sur le Saint-Laurent: Étude exploratoire d'options d'adaptation."
- Ehsanzadeh, E, H M Saley, T.B.M.J. Ouarda, D.H. Burn, A. Pietroniro, O. Seidou, C. Charron, et D. Lee. 2013. "Analysis of Changes in the Great Lakes Hydro-Climatic Variables." *Journal of Great Lakes Research* 39 (3): 383–394.
- Fan, Yin, et David Fay. 2002. "Development of Empirical Relationships to Estimate Water Levels of the St. Lawrence River from Montreal to Trois Rivières."
- . 2003a. "Estimation of Flows from St. Lawrence River Tributaries Under Climate Change Scenarios."
- . 2003b. "Estimation of Winter Water Levels at St Lawrence River Gauge Sites from Montréal to Batiscan."
- . 2003c. "Level - Flow Relationships at St Lawrence River Gauge Sites from Montreal to Batiscan Formulated with K Factor ." Vol. 2003.
- . 2003d. "Updated Relationship between the Outflow from Lac St . Louis and the Level at the Pointe Claire Gauge."
- Gronewold, Andrew D., et Craig A Stow. 2013. "Unprecedented Seasonal Water Level Dynamics on One of the Earth's Largest Lakes." *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Hartmann, Holly C. 1990. "Climate Change Impacts on Laurentian Great Lakes Levels." *Climatic Change* 17: 49–67.
- Lenters, John D. 2001. "Long-Term Trends in the Seasonal Cycle of Great Lakes Water Levels." *Journal of Great Lakes Research* 27 (3): 342–353.

- Lofgren, Brent M, Timothy S Hunter, et Jessica Wilbarger. 2011. "Effects of Using Air Temperature as a Proxy for Potential Evapotranspiration in Climate Change Scenarios of Great Lakes Basin Hydrology." *Journal of Great Lakes Research* 37 (4): 744–752.
- Manabe, S, R T Wetherald, P C D Milly, T L Delworth, et R J Stouffer. 2004. "Century-Scale Change in Water Availability: CO₂-Quadrupling Experiment." *Climatic Change* 64: 59–76.
- Marie-Andrée Tougas-Tellier, Jean Morin, Daniel Hatin, et Claude Lavoie. 2013. "Impacts des changements climatiques sur l'expansion du roseau envahisseur dans les frayères du fleuve Saint-Laurent."
- Milly, P C D, K a Dunne, et a V Vecchia. 2005. "Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate." *Nature* 438 (7066) (November 17): 347–50.
- Morin, Jean, et André Bouchard. 2001. "Les bases de la modélisation du tronçon Montréal / Trois-Rivières". RS-100. Rapport scientifique SMC Québec - Section Hydrologie.
- Morin, Jean, Olivier Champoux, André Bouchard, et Daniel Rioux. 2003. "High Resolution 2D Hydrodynamic Modelling of Lake Saint-Louis: Definition of Scenarios , Simulation and Validation / Calibration". RT-125. MSC Québec – Hydrology.
- Morin, Jean, Olivier Champoux, et Sylvain Martin. 2009. "Analyse de l'impact des changements climatiques et de travaux de maintient du niveau d'eau sur les indicateurs biotiques du fleuve Saint-Laurent". RS-109. Service Météorologique Du Canada–Hydrologie.
- Mortsch, Linda D, Marianne Alden, et Joan Klaassen. 2005. "Development of Climate Change Scenarios for Impact and Adaptation Studies in the Great Lakes – St. Lawrence Basin". 05-01. Adaptation and Impacts Research Group Research Report.
- 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.
- Ouarda, T B M J, E Ehsanzadeh, H M Saley, N Khaliq, O Seidou, C Charron, A. Pietroniro, et D. Lee. 2009. "Analysis of Changes in the Great Lakes Net Basin Supply (NBS) Components and Explanatory Variables."
- Stakhiv, Eugene, Frank Sciremammano, James Snyder, Lynn Cleary, et Marcel Lussier. 2006. "Options en matière de gestion des niveaux et des débits du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent."



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

Tel : 514-282-6464

Fax : 514-282-7131

www.ouranos.ca

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