

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE BASSIN DES GRANDS LACS : RÉSUMÉ DES TENDANCES ET DES RÉPERCUSSIONS



Remerciements

Ce rapport sommaire a été préparé par l'Ontario Climate Consortium (OCC) et l'Office de protection de la nature de Toronto et de la région (OPNTR) en partenariat avec Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) à l'appui de l'Annexe sur les répercussions des changements climatiques de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL). Les auteurs souhaitent souligner la contribution des personnes suivantes à l'élaboration du présent document :

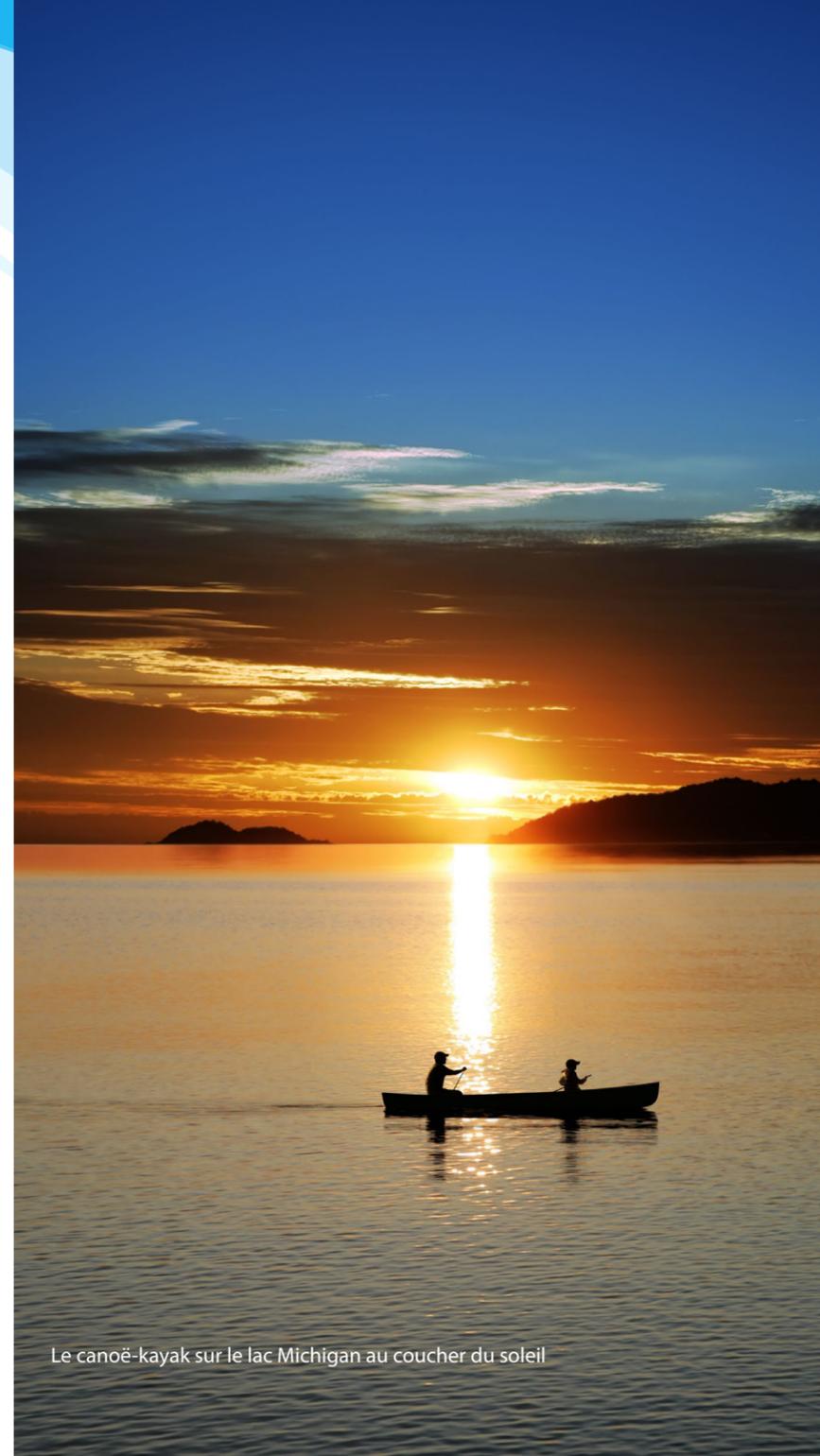
- Shaffina Kassam, Environnement et Changement climatique Canada
- Frances Delaney, Environnement et Changement climatique Canada
- Greg Mayne, Environnement et Changement climatique Canada
- Frank Seglenieks, Environnement et Changement climatique Canada
- Wendy Leger, Environnement et Changement climatique Canada
- André Guy Temgoua, Environnement et Changement climatique Canada
- Jennifer Day, Oceanic and Atmospheric Administration
- Meaghan Eastwood, Office de protection de la nature de Toronto et de la région
- Michael Bortolussi, Office de protection de la nature de Toronto et de la région
- Dana Lambert, Office de protection de la nature de Toronto et de la région
- Michael Notaro, Université du Wisconsin-Madison
- Beth Hall, Université Purdue

Référence recommandée

Lam, S. et Dokoska, K. 2022. Les changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs : Résumé des tendances et des répercussions. Toronto (Ontario), Office de protection de la nature de Toronto et de la région

AVERTISSEMENT

L'information utilisée dans la production de ce rapport représente la meilleure information disponible au moment où l'étude a été menée. Les données climatiques et hydrologiques utilisées pour interpréter les tendances et les répercussions futures peuvent changer à mesure que de nouvelles données climatiques et hydrologiques sont mises à jour ou deviennent disponibles. Ces renseignements ont été analysés à des fins de recherche seulement. Les résultats de cette étude ne représentent pas nécessairement l'opinion de l'Ontario Climate Consortium et de l'Office de protection de la nature de Toronto et de la région. De plus, l'Ontario Climate Consortium et l'Office de protection de la nature de Toronto et de la région ne garantissent pas l'exactitude ou l'intégralité des renseignements contenus dans le présent document et n'assument aucune responsabilité pour tout dommage causé à des personnes ou à des biens par suite d'une action ou d'une inaction fondée sur les renseignements contenus dans ce document.



Le canoë-kayak sur le lac Michigan au coucher du soleil

Table des matières

SOMMAIRE	4
1.0 INTRODUCTION	6
2.0 TENDANCES CLIMATIQUES HISTORIQUES ET FUTURES	10
2.1 Température de l'air au-dessus des terres (projections d'ECCC)	11
2.2 Précipitations au-dessus du lac (projections d'ECCC)	17
2.3 Niveaux des lacs (projections d'ECCC)	22
2.4 Couverture de glace (projections du CCR)	33
3.0 RÉPERCUSSIONS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	39
3.1 Répercussions des températures plus chaudes de l'eau	39
3.2 Répercussions de la réduction de la couverture de glace	41
3.3 Répercussions des inondations, de l'érosion et des tempêtes	42
3.4 Répercussions sur les industries et les moyens de subsistance	44
3.5 Répercussions sur les écosystèmes et la biodiversité	46
4.0 REGARD SUR L'AVENIR	47
RÉFÉRENCES	49
ANNEXE A: Description détaillée de la méthode utilisée par Environnement et Changement climatique Canada pour élaborer les projections du climat et des niveaux d'eau	54
ANNEXE B: Description détaillée de la méthode utilisée par le Nelson Institute Center for Climatic Research pour élaborer d projections de la couverture de glace	57



L'Ontario, Canada - la baie Georgienne, lac Huron

Sommaire

En vertu de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs entre le Canada et les États-Unis (AQEGL) de 2012, le sous-comité de l'annexe sur les répercussions des changements climatiques coordonne les efforts visant à déterminer, à quantifier, à comprendre et à prévoir les répercussions des changements climatiques sur les eaux des Grands Lacs, et il communique l'information dont les gestionnaires des ressources des Grands Lacs ont besoin pour aborder de façon proactive ces répercussions. Le présent rapport a pour but de caractériser les tendances climatiques historiques et futures dans le bassin des Grands Lacs et de résumer les répercussions que subissent déjà les collectivités dans l'ensemble du bassin. Ce rapport a été créé pour le sous-comité de l'annexe sur les répercussions des changements climatiques et vise à mieux comprendre les répercussions des changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs.

Ce rapport traduit les données climatiques et hydrologiques techniques en renseignements pratiques à l'intention des décideurs en fonction des projections du climat et des niveaux d'eau, élaborées par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), et des projections de la couverture de glace, élaborées par le Nelson Institute Center for Climatic Research (CCR). Les données historiques observées ont été extraites du Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Ce rapport vise également à améliorer la compréhension des répercussions des changements climatiques en se fondant sur un examen de la littérature grise et examinée par les pairs pour aider à éclairer les efforts d'adaptation et de renforcement de la résilience dans la région.

D'ici la fin du siècle, on prévoit des changements importants de la température de l'air au-dessus des terres, des précipitations au-dessus des lacs, des niveaux d'eau et de la couverture de glace dans l'ensemble des Grands Lacs dans le cadre de scénarios d'émissions modérées (RCP 4.5) et d'émissions élevées (RCP 8.5). Des tendances climatiques et hydrologiques semblables ont été observées pour tous les lacs, bien que chaque lac puisse subir ces changements différemment.

Les **températures de l'air au-dessus des terres** devraient augmenter considérablement dans le bassin par rapport à la période de 1961 à 2000. Les plus fortes augmentations de température sont prévues pour les saisons d'automne et d'hiver. Les changements des températures moyennes de l'air au-dessus des terres devraient entraîner des hivers plus chauds, une chaleur extrême plus intense, une saison de croissance plus longue, des précipitations plus abondantes et une couverture de glace moindre. Les plus fortes augmentations des températures de l'air au-dessus des terres sont prévues pour les lacs Supérieur et Michigan-Huron.

Les **précipitations au-dessus des lacs** devraient augmenter en toutes saisons et au cours de l'année selon les deux scénarios climatiques pour tous les lacs, bien que l'augmentation soit généralement moindre en été. Les variations saisonnières des précipitations au-dessus des lacs devraient varier selon le scénario de lac et de climat. Avec des hivers plus chauds, les chutes de neige devraient diminuer en moyenne, avec plus de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige. Les plus fortes augmentations des précipitations au-dessus des lacs sont prévues pour les lacs Supérieur et Ontario.

On s'attend à ce que les **niveaux des lacs** augmentent en variabilité à mesure que le climat change, et à ce que des valeurs plus élevées et plus basses deviennent possibles avec des changements plus importants des températures moyennes mondiales. Les projections du niveau des lacs indiquent des écarts importants par rapport aux moyennes à long terme propres à chaque lac (1918-2019) dans l'ensemble du bassin, avec une légère tendance à la hausse pour tous les lacs apparente dans la deuxième moitié du siècle. Le lac Michigan-Huron devrait connaître la plus grande variation du niveau des lacs et a toujours été le plus variable parmi les Grands Lacs (Wuebbles et coll., 2019). Les lacs Érié, Sainte-Claire et Ontario devraient également connaître des variations importantes du niveau des lacs.

La **couverture de glace** devrait diminuer dans tous les lacs, surtout en février et en mars, selon le scénario d'émissions élevées. À l'avenir, il pourrait y avoir plus d'années avec peu ou pas de couverture de glace et des saisons de glace plus courtes en hiver et au printemps. La couverture de glace moyenne au-dessus des lacs Supérieur et Érié affiche les plus fortes baisses prévues, suivies du lac Huron. La croissance de la glace peut également

atteindre un sommet plus tôt pour les lacs plus profonds comme les lacs Supérieur et Huron.

Les changements climatiques sur les Grands Lacs, les niveaux d'eau et la couverture de glace peuvent avoir de vastes répercussions environnementales, sociales et économiques sur les collectivités locales. Ces effets sont cumulatifs, composés et interactifs, ce qui peut entraîner des conséquences encore plus graves. Voici les principaux risques liés aux changements climatiques cernés pour le bassin des Grands Lacs d'après un examen de la documentation :

- niveaux d'eau extrêmement élevés et bas plus fréquents;
- augmentation des inondations et de l'érosion;
- précipitations plus variables et plus intenses;
- augmentation du ruissellement causé par les tempêtes qui transporte des éléments nutritifs et des contaminants dans les lacs;
- augmentation des débordements des égouts unitaires;
- augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes;
- augmentation des proliférations d'algues toxiques et non toxiques, des conditions de faible teneur en oxygène et des zones mortes;
- stress accru sur les infrastructures d'eau potable;
- augmentation des conditions de glace dangereuses pour les déplacements et les loisirs;
- augmentation de la remise en suspension des sédiments contaminés qui peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire aquatique;
- augmentation des espèces envahissantes, des ravageurs et des maladies;
- possibilité de réduction ou d'interruption du transport maritime et de la production d'hydroélectricité;
- perte d'habitat d'espèces de poissons en eau froide ou tempérée;
- perte d'habitat faunique (p. ex., reproduction, fraie et alevinage), y compris les habitats essentiels comme les milieux humides côtiers;
- perte du mode de vie traditionnel autochtone;
- perte du sentiment d'appartenance et d'identité;
- perte de moyens de subsistance et facteurs économiques locaux.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais vise plutôt à souligner les risques importants qui pourraient servir de point de départ à la prise de décisions éclairées en matière de planification de l'adaptation.



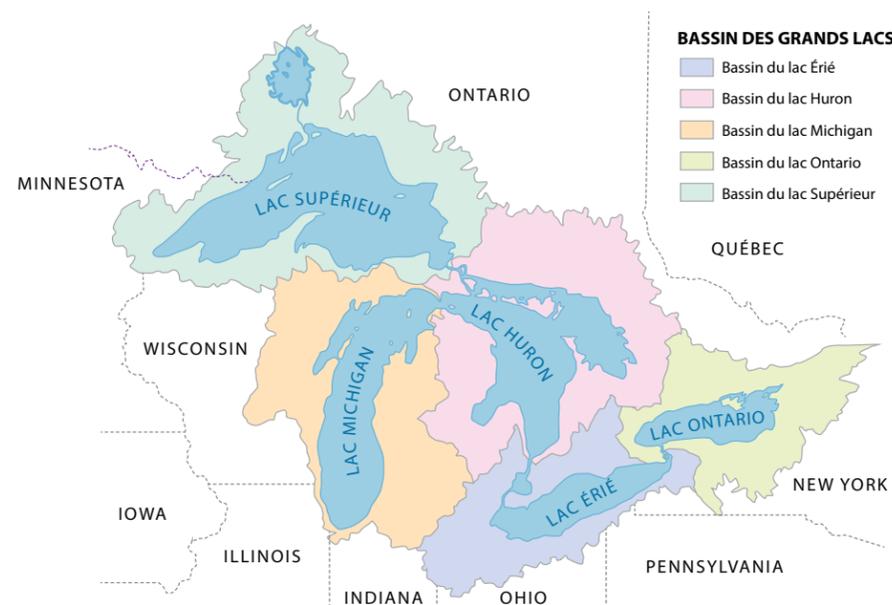
Point Pelee National Park, Lake Erie

1.0 Introduction

Les changements climatiques menacent la santé des Grands Lacs et les nombreux services écosystémiques qu'ils fournissent.

Les Grands Lacs contiennent un cinquième de l'eau douce de surface du monde (Commission des Grands Lacs, 2021). S'étendant sur deux nations et de nombreuses collectivités autochtones, les Grands Lacs fournissent de l'eau potable à 40 millions de personnes (voir la figure 1). Son vaste réseau de cours d'eau, de lacs, de milieux humides, de prairies et de forêts abrite plus de 3 500 espèces de plantes et d'animaux (Wuebbles et coll., 2019). Les Grands Lacs soutiennent également de nombreuses industries, y compris le transport maritime, l'hydroélectricité, l'agriculture, la pêche, le tourisme et les loisirs, et offrent d'importants liens culturels et spirituels aux gens. Si la région des Grands Lacs était un pays, elle aurait la troisième économie en importance au monde (Desjardins, 2017). Cependant, les changements climatiques menacent la santé des Grands Lacs et les nombreux services écosystémiques qu'ils fournissent, touchant les gens, les plantes et les animaux du bassin qui dépendent des Grands Lacs.

Figure 1 : Carte du bassin des Grands Lacs



Dans le cadre de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL) entre le Canada et les États-Unis de 2012, le Canada et les États-Unis ont reconnu la nécessité de renforcer les efforts visant à contrer les menaces nouvelles et continues à la qualité de l'eau des Grands Lacs, y compris les répercussions des changements climatiques. L'AQEGL de 2012 a incorporé une nouvelle annexe sur les répercussions des changements climatiques (annexe 9) pour faciliter la coordination des efforts visant à contrer les répercussions des changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs. L'annexe vise à cerner, à quantifier, à comprendre et à prédire les répercussions des changements climatiques sur la qualité des eaux des Grands Lacs, et elle vise à communiquer les informations dont les gestionnaires des ressources ont besoin pour atténuer ces répercussions. Afin de mettre en œuvre les engagements pris en vertu de l'annexe, le Canada et les États-Unis ont créé un sous-comité de l'annexe sur les répercussions des changements climatiques, codirigé par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), avec des membres des ministères fédéraux des États-Unis et du Canada, des gouvernements d'État et provinciaux, des administrations locales, des organisations tribales et autochtones, des organismes de gestion des bassins versants, des organisations non gouvernementales et des établissements et organisations universitaires.

Ce rapport sommaire a été préparé par l'Ontario Climate Consortium pour le sous-comité de l'annexe sur les répercussions des changements climatiques afin de caractériser les tendances climatiques historiques et futures dans le bassin des Grands Lacs et de résumer les répercussions qui touchent déjà les collectivités dans l'ensemble du bassin. Ce rapport vise à traduire les données climatiques et hydrologiques techniques en renseignements pratiques pour les décideurs et à améliorer la compréhension des répercussions des changements climatiques afin d'aider à éclairer les efforts d'adaptation et de renforcement de la résilience dans la région.

L'information présentée dans le présent rapport est fondée sur un examen de la documentation publiée (y compris les articles, les rapports et les articles de presse examinés par des pairs du Canada et des États-Unis), les projections de la couverture de glace élaborées par le Nelson Institute Center for Climatic Research (CCR), et les projections du climat et des niveaux d'eau

élaborées par ECCC dans le cadre d'une étude intitulée « Évaluation et renforcement de la résilience des milieux humides côtiers des Grands Lacs » appuyée par l'Initiative de protection des Grands Lacs (IPGL; 2017-2022). Les projections ont été élaborées jusqu'à la fin du siècle sur une base quotidienne ou mensuelle (voir l'encadré 1 pour de plus amples renseignements). Ce rapport résume plusieurs paramètres hydroclimatiques clés, y compris la température de l'air au-dessus des terres, les précipitations au-dessus du lac, les niveaux des lacs et la couverture de glace :

- la température de l'air au-dessus des terres fait référence à la température de l'air sur les terres entourant les Grands Lacs.
- les précipitations au-dessus des lacs désignent les précipitations qui tombent à la surface des lacs.
- le niveau des lacs fait référence au niveau des eaux de surface des Grands Lacs.
- la couverture de glace fait référence à la quantité de glace qui se forme à la surface des Grands Lacs.

La **section 2.0, Tendances climatiques historiques et futures**, examine comment la température de l'air au-dessus des terres, les précipitations au-dessus des lacs, les niveaux des lacs et la couverture de glace ont changé dans le bassin des Grands Lacs et comment ces changements devraient se poursuivre jusqu'à la fin du siècle selon deux scénarios de changements climatiques. Les tendances climatiques sont résumées par lac lorsque l'information est disponible.

La **section 3.0, Répercussions des changements climatiques**, traite de ce que ces changements climatiques et hydrologiques projetés signifient pour les collectivités du bassin des Grands Lacs et met en lumière certaines des principales répercussions que ressentent déjà les collectivités.

La **section 4.0, Regard vers l'avenir**, présente un résumé des principaux risques liés aux changements climatiques cernés pour le bassin des Grands Lacs qui doivent être abordés de façon proactive afin de réduire les répercussions négatives et de renforcer la résilience.

ENCADRÉ 1: À PROPOS DE LA MÉTHODE UTILISÉE POUR ÉLABORER LES PROJECTIONS HYDROCLIMATIQUES POUR LE BASSIN DES GRANDS LACS

Les projections utilisées dans le présent rapport ont été élaborées par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et le Nelson Institute Center for Climatic Research (CCR) de l'Université du Wisconsin-Madison. Les données historiques observées ont été extraites du [Great Lakes Environmental Research Laboratory \(GLERL\) de la NOAA](#).

Que sont les projections climatiques?

Les projections climatiques sont des simulations de ce à quoi le climat de la Terre pourrait ressembler à l'avenir en utilisant des modèles climatiques pour simuler différents processus atmosphériques, océaniques et terrestres qui influencent le climat. Ces simulations sont fondées sur des scénarios prospectifs plausibles des tendances des émissions provenant des activités humaines et des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère (habituellement jusqu'en 2100), connus sous le nom de profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). Il y a quatre principaux RCP, qui représentent des scénarios d'émissions élevées (RCP 8.5), d'émissions modérées (RCP 4.5 et 6.0) et de faibles émissions (RCP 2.6). Ces scénarios sont fondés sur différentes hypothèses des développements socioéconomiques et technologiques futurs, comme les changements dans la croissance de la population, la technologie, l'énergie et l'utilisation des terres.

Comment ECCC a-t-il élaboré les projections du climat et des niveaux d'eau utilisées dans ce rapport?

Ce ne sont pas tous les modèles climatiques qui peuvent saisir les Grands Lacs et leur dynamique. Afin d'obtenir des réponses simulées du climat futur dans le bassin des Grands Lacs, ECCC a utilisé les données de certains modèles climatiques qui capturent les Grands Lacs à une résolution suffisamment élevée, ainsi que pour simuler les processus lacustres, y compris l'évaporation des lacs. Les données modélisées de la phase 5 du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) étaient disponibles

après de [NA-CORDEX](#), le volet nord-américain de l'Étude coordonnée de recherche sur climat (International Coordinated Regional Downscaling Experiment) parrainée par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC).

Deux scénarios sur les changements climatiques ont été utilisés, dont les RCP 4.5 et 8.5, qui représentent les scénarios modélisés les plus courants. Selon le RCP 4.5, un scénario intermédiaire de changements climatiques, les températures moyennes mondiales pourraient augmenter de 1,7 à 3,2 °C (ou de 3,1 à 5,8 °F) par rapport à 1986-2005 d'ici les années 2090 (Gouvernement du Canada, 2018). Selon le RCP 8.5, le scénario des émissions élevées, les températures moyennes mondiales pourraient augmenter de 3,2 à 5,4 °C (ou de 5,8 à 9,7 °F) par rapport à 1986-2005 d'ici les années 2090.

Le RCP 8.5 a été simulé par sept simulations de modèle, tandis que le RCP 4.5 a été simulé par six simulations de modèle. Les données modélisées ont des résolutions allant d'environ 25 km sur 25 km à environ 45 km sur 45 km.

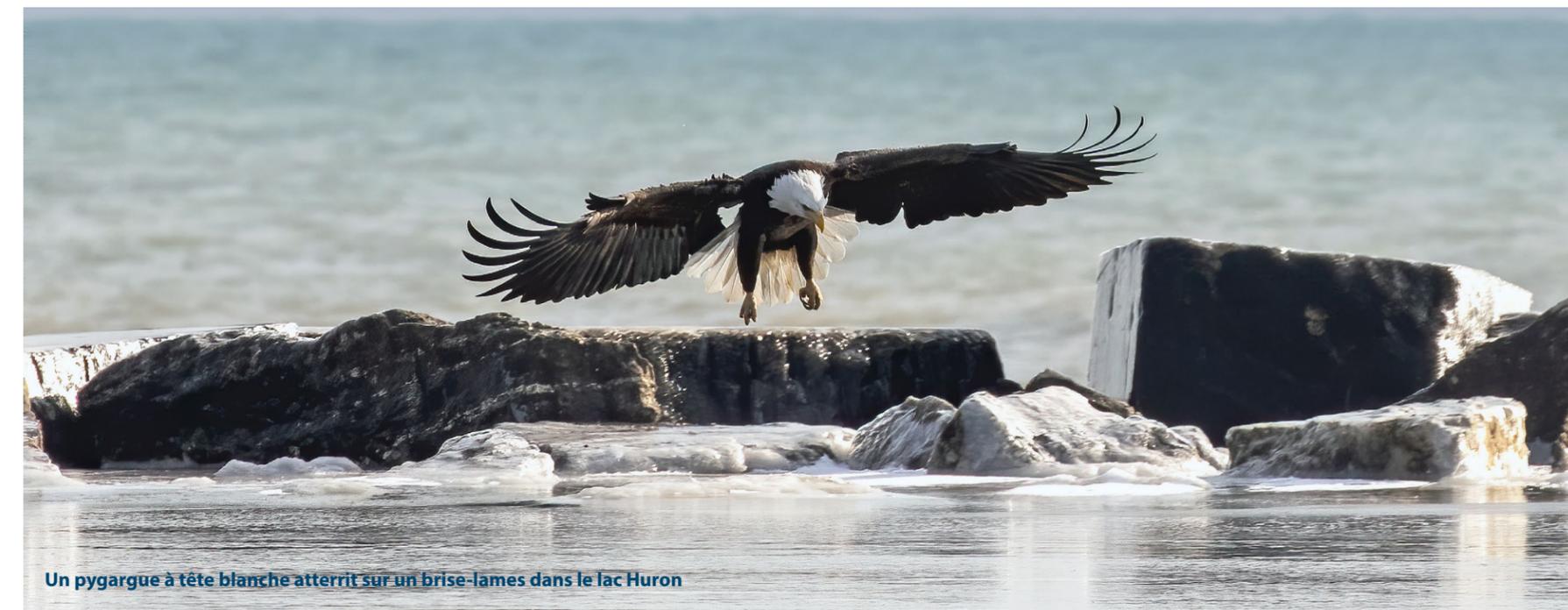
Les projections du niveau des lacs ont été établies en fonction des précipitations au-dessus des lacs, du ruissellement dans le lac, de l'évaporation au-dessus des lacs, du débit d'eau et des plans de régularisation qui contrôlent les débits sortants du lac Supérieur et du lac Ontario. Les précipitations au-dessus du lac et l'évaporation au-dessus du lac ont été tirées directement des données modélisées de NA-CORDEX. Un modèle hydrologique appelé WATFLOOD a été utilisé pour calculer le ruissellement de surface et le débit des rivières dans chacun des lacs.

Des projections mensuelles ont été élaborées jusqu'à la fin du siècle pour divers paramètres climatiques clés et niveaux d'eau afin d'éclairer l'évaluation de la vulnérabilité des milieux humides côtiers aux changements climatiques dans le cadre du projet « Évaluation et renforcement de la résilience des milieux humides côtiers des Grands Lacs ». Le présent rapport résume plusieurs de ces paramètres hydroclimatiques clés.

Comment le CCR a-t-il élaboré les projections de la couverture de glace utilisées dans ce rapport?

Contrairement aux projections du climat et du niveau de l'eau, les projections de la couverture de glace ne sont disponibles que pour le RCP 8.5. Les projections de la couverture de glace ont été simulées par six simulations de modèles et ont une résolution d'environ 25 km sur 25 km. Ces simulations comprennent également une représentation des Grands Lacs et de leur thermodynamique. Des projections ont été élaborées quotidiennement jusqu'à la fin du siècle.

Pour obtenir de plus amples renseignements sur la méthode utilisée par ECCC pour établir les projections du climat et des niveaux d'eau et corriger les biais, veuillez consulter l'annexe A. Pour obtenir des renseignements sur la méthode utilisée par le CCR pour établir les projections de la couverture de glace et corriger les biais, veuillez consulter l'annexe B.



Un pygargue à tête blanche atterrit sur un brise-lames dans le lac Huron

2.0 Tendances climatiques historiques et futures

« *Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, les océans et les terres.* » – Sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2021)

Au cours des sept dernières années (2014-2020), les températures de surface moyennes à l'échelle mondiale ont été les plus chaudes jamais enregistrées, et 2020, à égalité avec 2016, a été l'année la plus chaude (The Earth Observatory, 2021). À mesure que les activités humaines continueront d'avoir une incidence sur le climat, nous continuerons probablement d'observer des températures record à l'avenir. On estime que les activités humaines ont entraîné une augmentation des températures moyennes mondiales d'environ 1 °C (ou 1,8 °F) au-dessus des niveaux préindustriels (GIEC, 2018). Aux États-Unis, les régions limitrophes des Grands Lacs se réchauffent plus rapidement que le reste du pays (Hayhoe et coll., 2018; Wuebbles et coll., 2019). Entre-temps, au Canada, les températures de surface moyennes se réchauffent deux fois plus rapidement que dans le reste du monde, et le Nord du Canada se réchauffe encore plus rapidement (Gouvernement du Canada, 2019a).

À mesure que les changements climatiques mondiaux et le réchauffement des Grands Lacs se poursuivent, nous pouvons nous attendre à voir d'autres changements climatiques dans l'ensemble du bassin au cours des prochaines décennies. Les sous-sections suivantes présentent un résumé de la façon dont la température de l'air au-dessus des terres, les précipitations au-dessus des lacs, les niveaux des lacs et la couverture de glace ont changé dans le bassin et de la façon dont ces changements devraient se poursuivre jusqu'à la fin du siècle. Afin de se préparer aux répercussions des changements climatiques sur les collectivités et les écosystèmes du bassin, il est important de comprendre à quoi pourrait ressembler le climat futur.

Les données historiques sur le climat et l'hydrologie utilisées dans le présent rapport ont été extraites du [NOAA-Great Lakes Environmental Research Laboratory](#) (GLERL) de la NOAA.

Pour les projections du climat et des niveaux d'eau, les données historiques et futures modélisées sont comparées sur 30 années consécutives (c.-à-d. 1961-2000, 2006-2035, 2036-2065 et 2066-2095). Entre temps, pour les projections de la couverture de glace, les données ne sont disponibles que pour 20 années consécutives (c.-à-d. 1980-1999, 2040-2059 et 2080-2099). Il est important d'utiliser des données de plusieurs décennies pour s'assurer que les tendances climatiques ne sont pas dictées par des extrêmes occasionnels.

Dans certains cas, les graphiques affichent les données historiques observées jusqu'à l'année la plus récente avec les données disponibles afin de saisir l'ampleur de la variation historique ou d'éviter une pause dans le calendrier lorsque les données sont affichées sous forme de séries chronologiques continues. Les données climatiques historiques sont actuellement disponibles jusqu'en 2019 pour les précipitations au-dessus des lacs, les niveaux des lacs et la couverture de glace, tandis que les données climatiques historiques pour la température de l'air au-dessus des terres sont disponibles jusqu'en 2014.

Les projections sont présentées pour chaque lac, dans la mesure du possible (voir le tableau 1). Pour la plupart des paramètres (à l'exception de la couverture de glace), les lacs Michigan et Huron sont présentés comme une seule unité, car ils sont hydrologiquement un seul plan d'eau. La baie Georgienne fait partie du lac Huron, et les intervenants qui s'intéressent aux projections pour cette région devraient utiliser les projections disponibles pour le lac Michigan-Huron. Les projections pour le lac Sainte-Claire ne sont disponibles que pour le niveau des lacs. Pour ceux qui s'intéressent aux projections de la température de l'air au-dessus des terres et des précipitations au-dessus du lac Sainte-Claire, nous suggérons de tenir compte des projections disponibles pour le lac Érié

Tableau 1 : Aperçu des projections climatiques et hydrologiques disponibles par lac dans cette étude.

LAC	TEMPÉRATURE DE L'AIR AU-DESSUS DES TERRES	PRÉCIPITATIONS AU DESSUS DU LAC	NIVEAUX DES LACS	COUVERTURE DE GLACE
Supérieur	✓	✓	✓	✓
Michigan et Huron	✓	✓	✓	(présentés comme deux lacs)
Lac Érié	✓	✓	✓	✓
Sainte-Claire			✓	
Ontario	✓	✓	✓	✓

2.1 Température de l'air au-dessus des terres (projections d'ECCL)

PRINCIPALES OBSERVATIONS:

- Les projections climatiques indiquent des augmentations importantes de la température annuelle moyenne de l'air au-dessus des terres dans le bassin comparativement à la période historique (1961-2000).
- Les plus fortes augmentations de température sont prévues pour les saisons d'automne et d'hiver.
- Les changements dans les températures moyennes de l'air au-dessus des terres devraient entraîner des hivers plus chauds, une chaleur extrême, une saison de croissance plus longue, des précipitations plus abondantes et une réduction de la couverture de glace.
- Les températures moyennes de l'air au-dessus des terres sur le bassin du lac Supérieur affichent le réchauffement futur le plus important, suivi du lac Michigan-Huron.

La **température de l'air au-dessus des terres** désigne la température de l'air au-dessus des terres entourant les Grands Lacs. Dans le bassin des Grands Lacs, les résidents ont bénéficié de l'influence des lacs sur les conditions météorologiques régionales. Tout au long de l'année, les Grands Lacs contribuent à modérer les températures, à refroidir les terres

avoisinentes en été et à les réchauffer en hiver, ce qui soutient l'agriculture et d'autres industries (Wuebbles et coll., 2019). Selon les deux scénarios climatiques, les températures moyennes de l'air au-dessus des terres devraient augmenter en toutes saisons et au cours de l'année.

La figure 2 présente une série de graphiques montrant les températures historiques et projetées de l'air au-dessus des terres pour chaque bassin de lac selon les deux scénarios climatiques, calculés en moyenne par mois et par période. Ces graphiques illustrent les changements prévus des températures de l'air au-dessus des terres à court (2030), à moyen (2050) et à long terme (2080) par rapport aux données historiques mesurées (1961-2014) dans les deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et 8.5). Les valeurs des 5^e et 95^e centiles pour l'ensemble des simulations du modèle sont présentées pour mettre en évidence la plage de températures possibles de l'air au-dessus des terres dans les bassins lacustres pour chaque mois (voir l'encadré 2 pour de l'information sur les centiles). Les tableaux 2 et 3 présentent les valeurs de température en degrés Celsius pour le RCP 4.5 et RCP 8.5, respectivement.

ENCADRÉ 2 : QU'EST-CE QUE LES 5^E ET 95^E CENTILES ET POURQUOI LES UTILISE-T-ON?

Le 5^e centile représente la valeur en dessous de laquelle se situent 5 % des données. Le 95^e centile représente la valeur en dessous de laquelle se situent 95 % des données, et 5 % sont au-dessus de cette valeur. Ensemble, ils représentent 90 % de tous les points de données. Cette plage est utile pour comprendre où la plupart des données projetées sur le climat, le niveau de l'eau et la couverture de glace tombent et élimine les valeurs extrêmes qui se produisent 5 % du temps à chaque extrémité de la distribution, ce qui peut fausser les comparaisons.

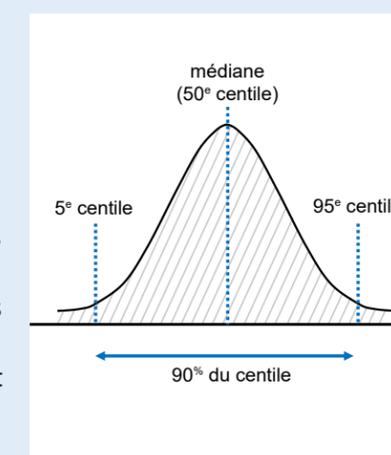
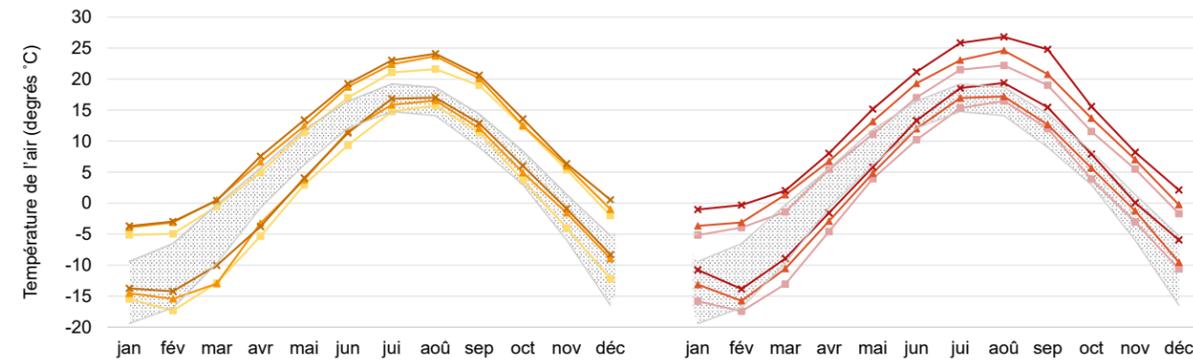


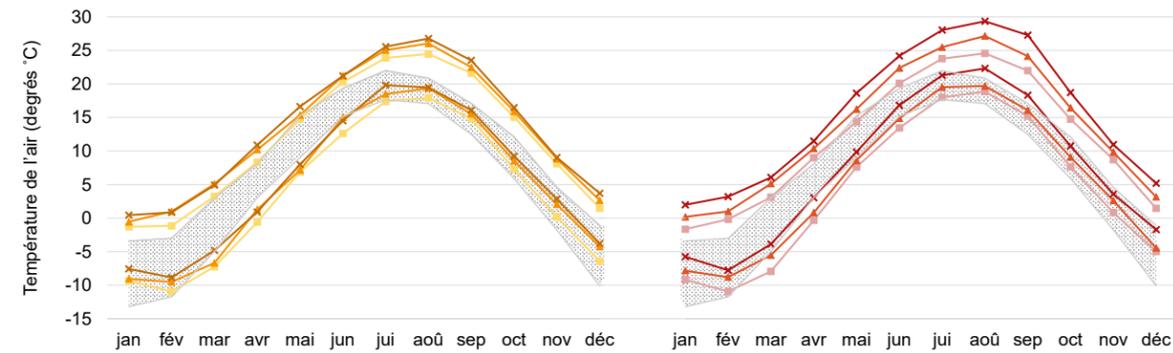
Figure 2 : Températures moyennes historiques et projetées de l'air au-dessus des terres selon les RCP 4.5 et 8.5 par mois et par période pour

a) le lac Supérieur, b) le lac Michigan-Huron, c) le lac Érié et d) le lac Ontario. Les températures projetées de l'air au-dessus des terres dans le cadre des deux scénarios de changements climatiques sont présentées côte à côte avec le RCP 4.5 à gauche et le RCP 8.5 à droite. La zone grise en pointillés montre les températures historiques de l'air au-dessus des terres, moyennes par mois entre 1961 et 2014, qui se situent entre les 5e et 95e centiles. Les températures futures de l'air sont prévues pour trois périodes : 2030, 2050 et 2080, chacun étant représenté par une couleur et un motif différents. Les lignes du haut représentent le 95e centile des valeurs projetées pour six simulations de modèle RCP 4.5 et sept simulations de modèle RCP 8.5, respectivement, et les lignes du bas représentent le 5e centile.

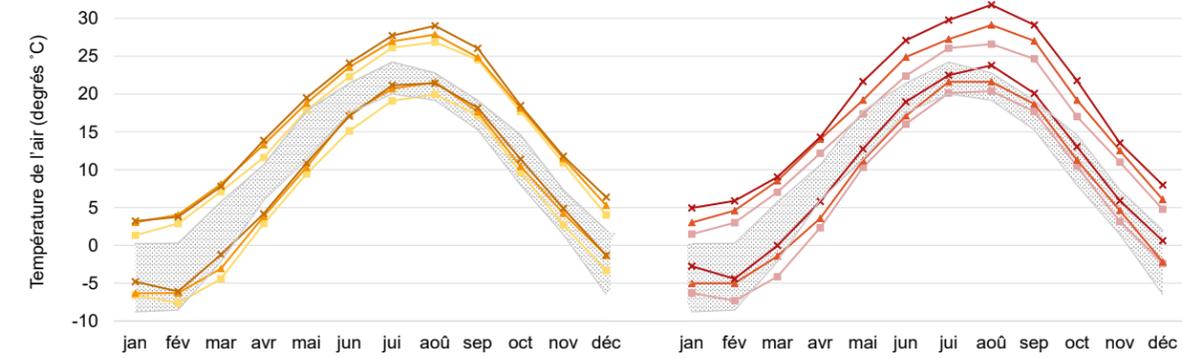
a) Lac Supérieur



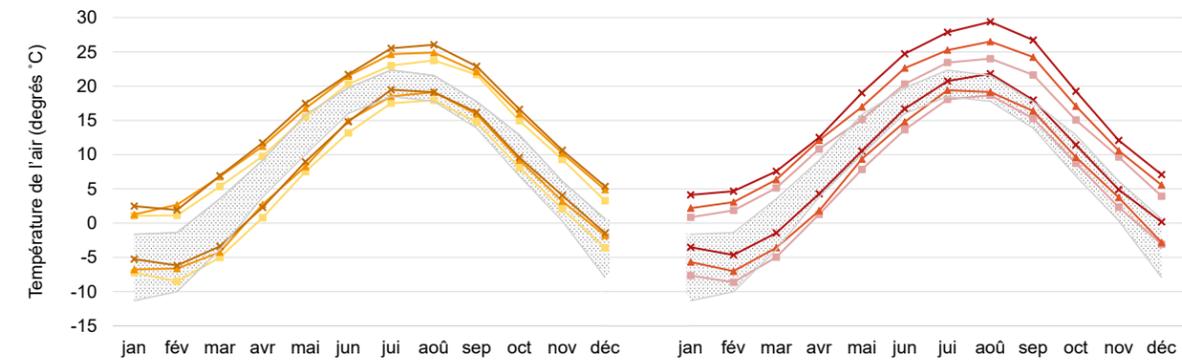
b) Lac Michigan-Huron



c) Lac Érié



d) Lac Ontario



mesurées (1961-2014), 5^e et 95^e centile
 RCP 4.5 (2030s), 5^e et 95^e centile
 RCP 4.5 (2050s), 5^e et 95^e centile
 RCP 4.5 (2080s), 5^e et 95^e centile
 RCP 8.5 (2030s), 5^e et 95^e centile
 RCP 8.5 (2050s), 5^e et 95^e centile
 RCP 8.5 (2080s), 5^e et 95^e centile

Tableau 2 : Températures annuelles et saisonnières moyennes historiques et projetées de l'air au-dessus des terres selon le RCP 4.5 par période.

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées selon le RCP 4.5 (°C)					Différence par rapport aux valeurs correspondantes de 1961 à 2000 (°C)				
	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)
LAC SUPÉRIEUR										
Historique (1961-2000)	2,4	1,8	15,8	4,7	-12,7	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	3,9	0,5	16,6	7,9	-9,2	1,5	-1,3	0,8	3,2	3,5
Années 2050 (2036-2065)	5,2	1,6	17,9	8,8	-7,3	2,8	-0,2	2,0	4,1	5,4
Années 2080 (2066-2095)	5,9	2,3	18,5	9,5	-6,6	3,5	0,6	2,7	4,8	6,1
LAC MICHIGAN-HURON										
Historique (1961-2000)	6,2	5,3	18,7	8,2	-7,2	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	7,6	4,6	19,5	11,0	-4,5	1,4	-0,8	0,8	2,9	2,7
Années 2050 (2036-2065)	8,9	5,6	20,7	12,0	-2,8	2,6	0,3	2,0	3,9	4,4
Années 2080 (2066-2095)	9,5	6,3	21,2	12,7	-2,3	3,2	1,0	2,6	4,5	4,9
LAC ÉRIÉ										
Historique (1961-2000)	9,1	8,2	20,8	10,8	-3,4	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	10,4	7,8	21,6	13,4	-1,3	1,3	-0,4	0,9	2,7	2,1
Années 2050 (2036-2065)	11,6	8,8	22,8	14,4	0,1	2,5	0,6	2,1	3,7	3,5
Années 2080 (2066-2095)	21,1	9,4	23,3	15,1	0,5	3,0	1,2	2,6	4,3	3,9
LAC ONTARIO										
Historique (1961-2000)	7,3	6,2	19,3	9,2	-5,5	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	8,6	6,0	19,4	11,5	-2,3	1,3	-0,2	0,1	2,3	3,2
Années 2050 (2036-2065)	9,8	7,0	20,5	12,6	-0,9	2,5	0,8	1,2	3,3	4,6
Années 2080 (2066-2095)	10,3	7,6	21,0	13,2	-0,5	3,0	1,4	1,7	4,0	5,0

Tableau 3 : Températures annuelles et saisonnières moyennes historiques et projetées de l'air au-dessus des terres selon le RCP 8.5 par période.

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées selon le RCP 4.5 (°C)					Différence par rapport aux valeurs correspondantes de 1961 à 2000 (°C)				
	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)
LAC SUPÉRIEUR										
Historique (1961-2000)	2,4	1,8	15,8	4,7	-12,7	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	4,2	0,5	16,9	8,1	-8,9	1,8	-1,3	1,1	3,4	3,8
Années 2050 (2036-2065)	5,9	2,2	18,7	9,6	-6,8	3,5	0,4	2,9	4,9	5,9
Années 2080 (2066-2095)	8,0	4,0	20,7	11,7	-4,2	5,6	2,2	4,9	7,0	8,5
LAC MICHIGAN-HURON										
Historique (1961-2000)	6,2	5,3	18,7	8,2	-7,2	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	7,9	4,6	19,7	11,3	-4,1	1,7	-0,7	1,1	3,2	3,1
Années 2050 (2036-2065)	9,5	6,2	21,6	12,8	-2,5	3,3	0,9	2,9	4,6	4,7
Années 2080 (2066-2095)	11,4	7,8	23,4	14,8	-0,4	5,2	2,5	4,8	6,6	6,8
LAC ÉRIÉ										
Historique (1961-2000)	9,1	8,2	20,8	10,8	-3,4	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	10,7	7,9	21,9	13,7	-1,0	1,6	-0,3	1,2	3,0	2,5
Années 2050 (2036-2065)	12,2	9,3	23,7	15,2	0,5	3,1	1,1	2,9	4,4	3,9
Années 2080 (2066-2095)	13,9	10,6	25,5	17,1	2,3	4,8	2,5	4,7	6,3	5,7
LAC ONTARIO										
Historique (1961-2000)	7,3	6,2	19,3	9,2	-5,5	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	8,9	6,0	19,6	11,9	-2,0	1,6	-0,2	0,3	2,6	3,5
Années 2050 (2036-2065)	10,4	7,4	21,4	13,3	-0,6	3,1	1,2	2,1	4,0	5,0
Années 2080 (2066-2095)	12,2	8,9	23,3	15,2	1,3	4,9	2,7	3,9	6,0	6,9



Des cabanes de glace sur le lac Supérieur

Comme le montre la figure 2, les températures de l'air au-dessus des terres devraient augmenter tout au long de l'année dans tous les lacs, surtout pendant les mois de janvier et de février, et entre juillet et décembre selon les deux scénarios climatiques. Ces changements dans les températures moyennes de l'air au-dessus des terres devraient entraîner des hivers plus chauds, une chaleur extrême et une saison de croissance plus longue (voir la section 3.0 pour les répercussions de ces changements).

Les températures moyennes de l'air au-dessus des terres dans le bassin du lac Supérieur sont les plus élevées comparativement aux autres bassins lacustres selon les deux scénarios climatiques, suivis du bassin du lac

Michigan-Huron. Les températures moyennes annuelles de l'air au-dessus des terres ont historiquement (1961-2000) varié de 2,4 °C (ou 36,3 °F) dans le bassin du lac Supérieur, le lac le plus au nord, à 9 °C (ou 48,2 °F) dans le bassin du lac Érié, le lac le plus au sud. Selon le RCP 4.5, les températures moyennes annuelles de l'air au-dessus des terres pourraient augmenter d'environ 3,5 °C (ou 6,3 °F) dans le bassin du lac Supérieur et de 3 °C (ou 5,4 °F) dans le bassin du lac Érié d'ici la fin du siècle. Selon le RCP 8.5, les températures moyennes annuelles de l'air au-dessus des terres devraient augmenter encore davantage de 5,6 °C (ou 10 °F) dans le bassin du lac Supérieur et de 4,8 °C (ou 8,6 °F) dans le bassin du lac Érié d'ici la fin du siècle. Ces projections indiquent une augmentation importante de la température annuelle moyenne de l'air au-dessus des terres dans le bassin des Grands Lacs.

Les plus fortes augmentations de température sont prévues pour les saisons d'automne et d'hiver comparativement aux valeurs saisonnières moyennes entre 1961 et 2000, ce qui correspond aux tendances déjà observées. Selon le RCP 4.5, les températures moyennes de l'air au-dessus des terres en hiver pourraient augmenter de 3,4 à 5 °C (ou de 6,1 à 9 °F) d'ici la fin du siècle dans les terres du bassin. Selon le RCP 8.5, les températures moyennes de l'air au-dessus des terres en hiver pourraient augmenter encore davantage de 5 à 7,2 °C (ou de 9 à 13 °F) d'ici la fin du siècle. Avec des hivers plus chauds, on peut s'attendre à une diminution moyenne de la couverture de glace sur les Grands Lacs, qui est déjà en déclin (voir la section 2.4 pour connaître les tendances historiques et projetées de la couverture de glace). De plus, comme l'air plus chaud peut retenir plus d'humidité, on peut s'attendre à ce que les précipitations plus abondantes, qui sont déjà à la hausse, augmentent davantage dans la région à mesure qu'il y a plus d'humidité disponible pour produire des tempêtes plus lourdes.

2.2 Précipitations au-dessus du lac (projections d'ECCC)

PRINCIPALES OBSERVATIONS :

- Les précipitations totales moyennes au-dessus des lacs devraient augmenter en toutes saisons et au cours de l'année selon les deux scénarios climatiques pour tous les lacs.
- Les variations saisonnières des précipitations au dessus des lacs devraient varier selon le scénario de lac et de climat.
- Avec des hivers plus chauds, les chutes de neige devraient diminuer en moyenne, avec plus de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige.
- Le lac Supérieur devrait connaître la plus forte augmentation des précipitations au dessus du lac, suivi du lac Ontario.

Les précipitations au-dessus du lac désignent les précipitations qui tombent à la surface du lac et qui peuvent varier d'une année à l'autre. Ce phénomène est généralement semblable aux précipitations qui tombent sur les terres entourant les Grands Lacs, mais des différences peuvent être observées en fonction de la configuration des vents et de la topographie locale (Seglenieks et Temgoua, 2021). Les répercussions des Grands Lacs sur la stabilité atmosphérique peuvent également entraîner une augmentation des précipitations au-dessus des terres en été et une augmentation des précipitations au dessus des lacs en hiver (M. Notaro, communication personnelle, 16 octobre 2021).

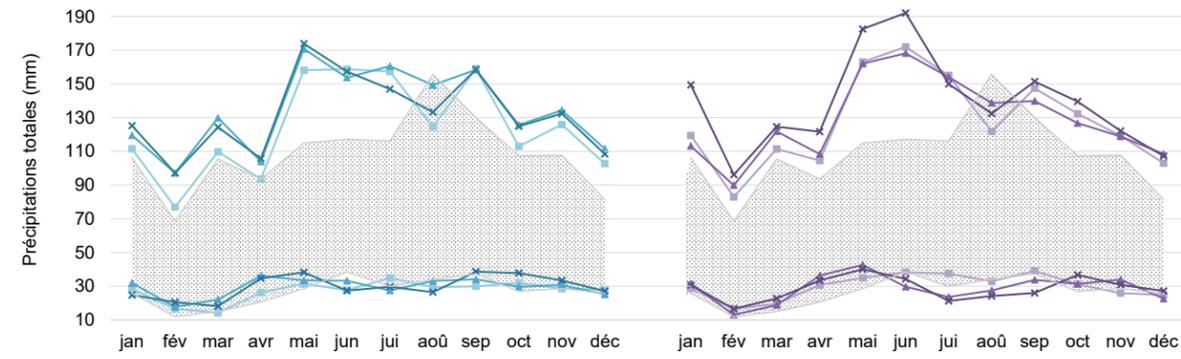
La figure 3 présente un ensemble de graphiques montrant les précipitations historiques et projetées sur chaque lac selon les deux scénarios climatiques, calculés en moyenne par mois et par période. Ces graphiques illustrent les changements prévus dans la moyenne des précipitations totales au-dessus des lacs à court (2030), à moyen (2050) et à long terme (2080) par rapport aux données historiques mesurées (1961-2019) dans les deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et 8.5). Les valeurs du 5e et du 95e centile pour l'ensemble des simulations du modèle sont présentées pour mettre en évidence la fourchette des précipitations totales possibles qui tombent au-dessus des lacs pour chaque mois (voir l'encadré 2 pour de l'information sur les centiles). Les tableaux 4 et 5 présentent les valeurs moyennes des précipitations totales au-dessus des lacs en millimètres et les différences en pourcentage par rapport aux valeurs historiques pour le RCP 4.5 et le RCP 8.5, respectivement.

Figure 3 : Précipitations historiques et projetées totales au-dessus du lac selon les RCP 4.5 et 8.5 par mois et par période pour

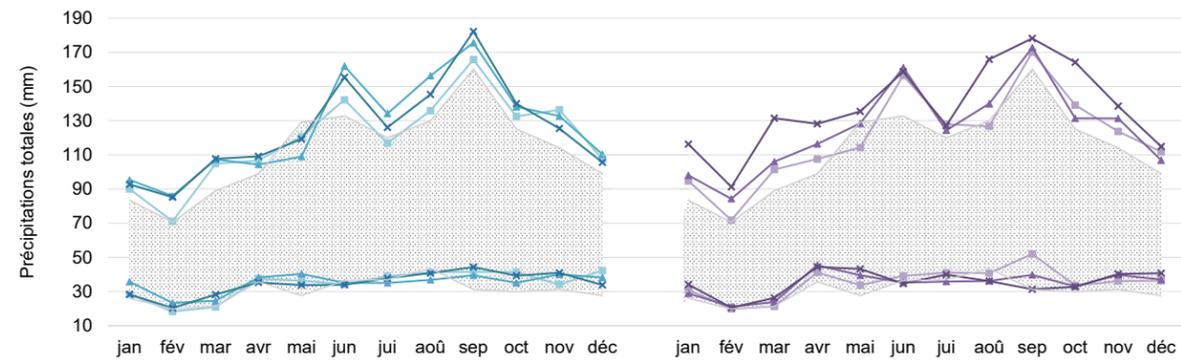
a) le lac Supérieur, b) le lac Michigan-Huron, c) le lac Érié et d) le lac Ontario. Les projections des précipitations au-dessus du lac dans les deux scénarios de changements climatiques sont présentées côte à côte avec le RCP 4.5 à gauche et le RCP 8.5 à droite. La zone grise en pointillés montre les précipitations historiques au-dessus du lac, moyennes par mois entre 1961 et 2019, qui se situent entre les 5e et 95e centiles. Les précipitations futures au-dessus des lacs sont prévues pour trois périodes : les années 2030, années 2050 et années 2080, chaque période étant représentée par une couleur et un motif différents. Les lignes du haut représentent le 95e centile des valeurs projetées pour six simulations de modèle RCP 4.5 et sept simulations de modèle RCP 8.5, respectivement, et les lignes du bas représentent le 5e centile.

- mesurées (1961-2019), 5° et 95° centile
- RCP 4.5 (2030s), 5° et 95° centile
- RCP 4.5 (2050s), 5° et 95° centile
- RCP 4.5 (2080s), 5° et 95° centile
- RCP 8.5 (2030s), 5° et 95° centile
- RCP 8.5 (2050s), 5° et 95° centile
- RCP 8.5 (2080s), 5° et 95° centile

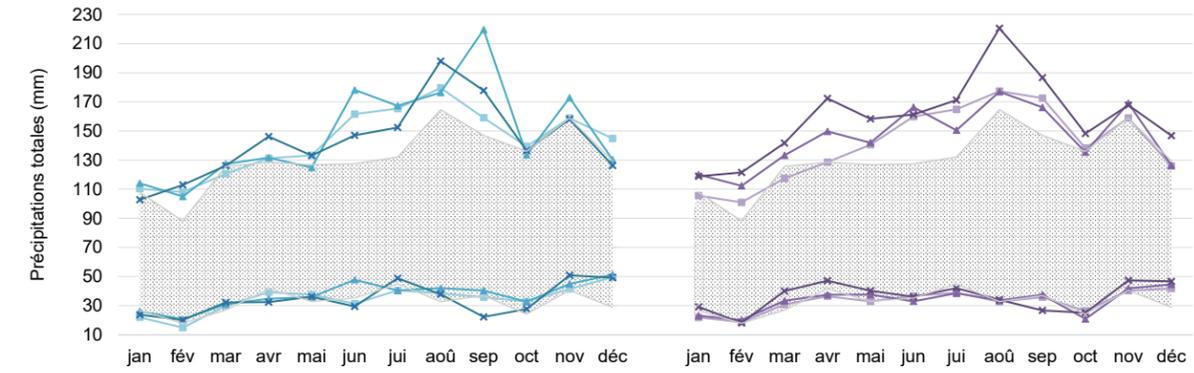
a) Lake Superior



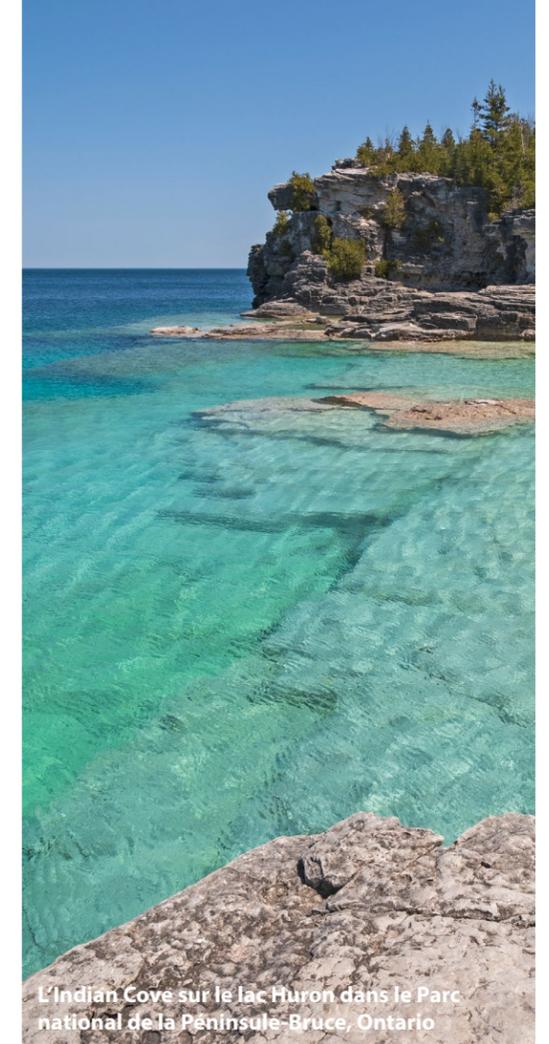
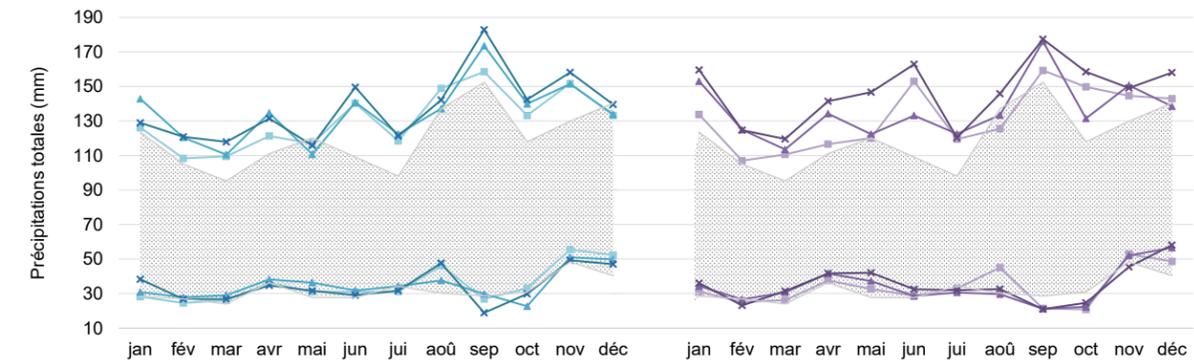
b) Lake Michigan-Huron



c) Lake Erie



d) Lake Ontario



L'Indian Cove sur le lac Huron dans le Parc national de la Péninsule-Bruce, Ontario

Tableau 4 : Moyenne annuelle et saisonnière historique et projetée des précipitations totales au-dessus du lac selon le RCP 4.5 pour la période.

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées selon le RCP 4.5 (mm)					Différence en pourcentage par rapport aux valeurs correspondantes de 1961 à 2000 (%)				
	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)
LAC SUPÉRIEUR										
Historique (1961-2000)	755,1	163,5	231,3	213,8	146,5	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	857,4	203,8	250,1	230,8	172,6	14 %	25 %	8 %	8 %	18 %
Années 2050 (2036-2065)	898,3	219,9	255,3	242,3	180,8	19 %	34 %	10 %	13 %	23 %
Années 2080 (2066-2095)	908,7	233,3	246,6	245,5	183,3	20 %	43 %	7 %	15 %	25 %
LAC MICHIGAN-HURON										
Historique (1961-2000)	808,3	188,5	228,2	229,5	162,2	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	873,0	193,0	245,0	257,2	177,8	8 %	2 %	7 %	12 %	10 %
Années 2050 (2036-2065)	915,3	201,8	255,7	265,9	191,9	13 %	7 %	12 %	16 %	18 %
Années 2080 (2066-2095)	910,5	207,0	247,2	266,4	189,9	13 %	10 %	8 %	16 %	17 %
LAC ÉRIÉ										
Historique (1961-2000)	909,6	228,8	252,0	239,8	189,0	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	960,6	221,3	275,4	267,4	196,4	6 %	-3 %	9 %	12 %	4 %
Années 2050 (2036-2065)	1002,2	228,3	283,5	283,0	207,4	10 %	0 %	13 %	18 %	10 %
Années 2080 (2066-2095)	991,8	230,2	279,0	276,8	205,8	9 %	1 %	11 %	15 %	9 %
LAC ONTARIO										
Historique (1961-2000)	846,6	203,2	213,5	235,1	194,9	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	938,8	210,7	240,5	276,1	211,6	11 %	4 %	13 %	17 %	9 %
Années 2050 (2036-2065)	970,9	220,5	247,8	278,3	224,3	15 %	9 %	16 %	18 %	15 %
Années 2080 (2066-2095)	970,5	218,5	245,4	280,7	225,9	15 %	8 %	15 %	19 %	16 %

Tableau 5 : Moyenne annuelle et saisonnière historique et projetée des précipitations totales au-dessus du lac selon le RCP 8.5 pour la période.

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées selon le RCP 8.5 (mm)					Différence en pourcentage par rapport aux valeurs correspondantes de 1961 à 2000 (%)				
	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)	Annuel	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Hiver (DJF)
LAC SUPÉRIEUR										
Historique (1961-2000)	755,1	163,5	231,3	213,8	146,5	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	861,7	210,9	248,2	227,8	174,8	14 %	29 %	7 %	7 %	19 %
Années 2050 (2036-2065)	892,5	223,5	250,6	236,4	182,0	18 %	37 %	8 %	11 %	24 %
Années 2080 (2066-2095)	936,9	250,2	249,1	243,7	193,8	24 %	53 %	8 %	14 %	32 %
LAC MICHIGAN-HURON										
Historique (1961-2000)	808,3	188,5	228,2	229,5	162,2	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	879,2	199,9	244,5	254,5	180,3	9 %	6 %	7 %	11 %	11 %
Années 2050 (2036-2065)	907,5	208,4	248,3	259,7	191,1	12 %	11 %	9 %	13 %	18 %
Années 2080 (2066-2095)	965,3	235,5	258,1	267,0	204,7	19 %	25 %	13 %	16 %	26 %
LAC ÉRIÉ										
Historique (1961-2000)	909,6	228,8	252,0	239,8	189,0	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	955,1	227,5	273,2	260,9	193,6	5 %	-1 %	8 %	9 %	2 %
Années 2050 (2036-2065)	1001,4	240,1	279,0	273,5	208,8	10 %	5 %	11 %	14 %	10 %
Années 2080 (2066-2095)	1076,5	273,8	295,6	284,6	222,5	18 %	20 %	17 %	19 %	18 %
LAC ONTARIO										
Historique (1961-2000)	846,6	203,2	213,5	235,1	194,9	-	-	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	923,4	213,0	236,0	263,1	211,3	9 %	5 %	11 %	12 %	8 %
Années 2050 (2036-2065)	969,8	227,6	241,1	270,0	231,0	15 %	12 %	13 %	15 %	19 %
Années 2080 (2066-2095)	1033,1	257,2	254,4	276,7	244,7	22 %	27 %	19 %	18 %	26 %

Selon les deux scénarios climatiques, les précipitations totales moyennes au-dessus des lacs devraient augmenter au cours de toutes les saisons et annuellement au cours du prochain siècle, bien que la quantité puisse varier d'une année à l'autre. Comme le montre la figure 3, les plus fortes variations des précipitations totales au-dessus des lacs sont prévues parmi les valeurs projetées qui se situent dans le 95e centile dans tous les lacs. Entre-temps, les valeurs projetées qui se situent dans le 5e centile devraient demeurer relativement semblables aux données historiques mesurées (1961 à 2019), certains mois affichant une augmentation.

Dans l'ensemble, les variations des précipitations mensuelles totales au-dessus des lacs au 95e centile ne sont pas uniformes d'un lac à l'autre. Pour certains lacs, les projections indiquent des régimes de précipitations qui varient considérablement par rapport aux données historiques mesurées. Pour le lac Supérieur, les plus grands changements dans le 95e centile des précipitations totales au-dessus du lac sont prévus pour les mois de mai, juin, juillet et septembre selon les deux scénarios climatiques. Pour le lac Michigan-Huron, les plus grands changements sont prévus pour les mois de mars et de juin dans les deux scénarios climatiques. Pour le lac Érié, les plus grands changements sont prévus pour les mois d'avril, juin, août et septembre. Entre-temps, pour le lac Ontario, on prévoit une augmentation des précipitations totales au-dessus du lac pendant la plupart des mois de l'année. Si l'on ajoute à cela les augmentations projetées des températures de l'air au-dessus des terres (comme nous l'avons vu à la section 2.1), on peut s'attendre à des précipitations extrêmes au dessus des Grands Lacs, car l'air plus chaud peut contenir plus d'humidité pour produire des tempêtes plus fortes.

La plus forte augmentation des précipitations totales au-dessus des lacs est prévue pour le lac Supérieur selon les deux scénarios climatiques, suivi du lac Ontario. Les précipitations annuelles totales au-dessus des lacs ont historiquement (1961-2000) varié de 755 mm (ou 29,7 pouces) au-dessus du lac Supérieur à 909 mm (ou 35,8 pouces) au-dessus du lac Érié. Selon le RCP 4.5, les précipitations annuelles totales au dessus des lacs pourraient augmenter de 20 % au-dessus du lac Supérieur et de 9 % au-dessus du lac Érié d'ici la fin du siècle. Selon le RCP 8.5, les précipitations annuelles totales au-dessus des lacs devraient augmenter encore de 24 % au-dessus

du lac Supérieur et de 18 % au-dessus du lac Érié d'ici la fin du siècle. Ces projections indiquent une augmentation importante des précipitations annuelles totales dans le bassin.

On prévoit que les variations de la moyenne saisonnière des précipitations totales au-dessus du lac varieront selon le lac. Selon le RCP 4.5, les plus fortes augmentations des précipitations d'ici la fin du siècle sont généralement prévues pour l'automne et l'hiver, à l'exception du lac Supérieur, où le printemps affiche la plus forte augmentation (augmentation de 43 % par rapport aux totaux moyens du printemps entre 1961 et 2000), et du lac Ontario où l'été affiche des augmentations semblables à celles de l'hiver (augmentation de 15 % par rapport aux totaux estivaux moyens entre 1961 et 2000). Entre temps, selon le RCP 8.5, les augmentations les plus importantes sont généralement prévues pour le printemps et l'hiver, à l'exception du lac Érié, où l'automne affiche des augmentations semblables à celles du printemps d'ici la fin du siècle (augmentation de 19 et de 20 %, respectivement, comparativement aux totaux saisonniers moyens entre 1961 et 2000). Avec des hivers plus chauds, les chutes de neige devraient diminuer en moyenne, avec plus de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige.

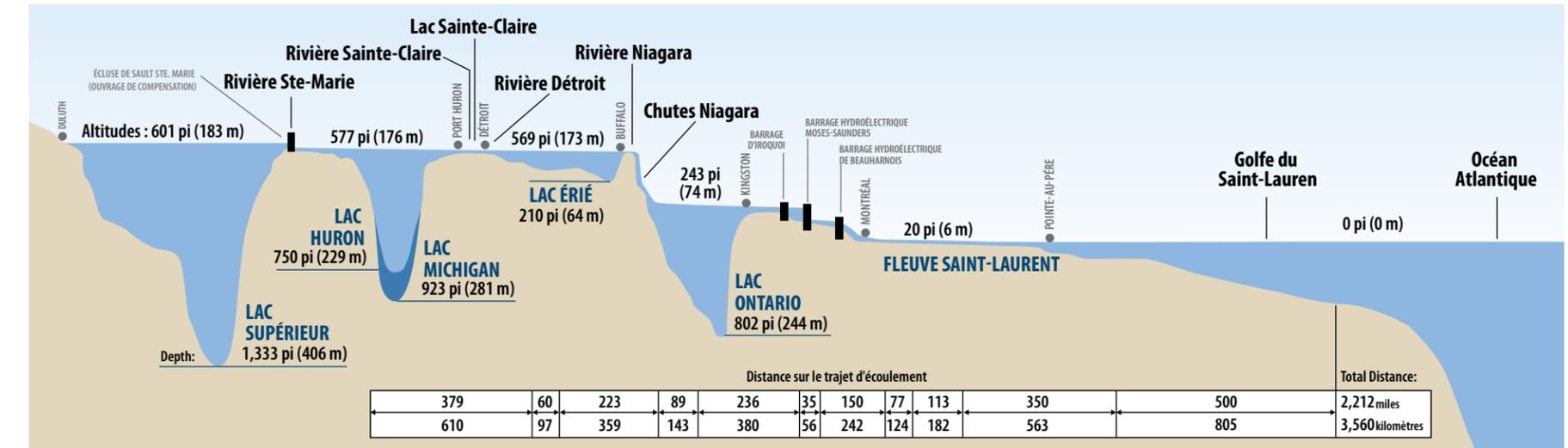
2.3 Niveaux des lacs (projections d'ECCC)

PRINCIPALES OBSERVATIONS:

- Les projections du niveau des lacs indiquent des écarts importants par rapport aux moyennes à long terme propres à chaque lac (1918-2019) dans l'ensemble du bassin, avec une légère tendance à la hausse apparente pour tous les lacs dans la deuxième moitié du siècle à venir.
- Les projections indiquent la possibilité de niveaux d'eau extrêmement élevés et extrêmement bas plus fréquents et plus graves.
- La plus grande variation des niveaux des lacs est prévue pour les lacs Michigan-Huron, Érié, Sainte-Claire et Ontario.

Le **niveau des lacs** renvoie au niveau des eaux de surface des Grands Lacs (voir la figure 4). À l'heure actuelle, les niveaux des lacs sont basés sur le Système de référence international des Grands Lacs de 1985 (SRIGL85) [voir l'encadré 3 pour de plus amples renseignements].

Figure 4: Illustration des élévations et des profondeurs du niveau des eaux de surface des Grands Lacs (adaptée à partir de l'illustration du Michigan Sea Grant)



ENCADRÉ 3 : QU'EST-CE QUE LE SRIGL85?

Le SRIGL85, ou Système de référence international des Grands Lacs de 1985, est un système de référence altimétrique commun qui est utilisé pour mesurer les niveaux d'eau des Grands Lacs (Contrôle vertical — Sous-comité sur les contrôles verticaux des niveaux d'eau, 2017). Ce système de référence est constitué d'élévations mesurées au moyen du nivellement géométrique (une forme de relevé), qui a été effectué à partir de l'océan Atlantique (niveau de la mer), à l'intérieur des terres jusqu'au fleuve Saint-Laurent, puis jusqu'à chaque lac le long des voies interlacustres (rivières Niagara, Detroit, Sainte-Claire et St. Marys). (Comité de coordination des données hydrologiques et hydrauliques de base des Grands Lacs, 1992). Un nouveau système de référence doit être établi environ tous les 25 à 30 ans pour tenir compte du mouvement différentiel de la croûte terrestre dans la région des Grands Lacs (Gouvernement du Canada, 2019c). Le SRIGL85 a été mis en place en janvier 1992 pour remplacer l'ancien système, le SRIGL55. À l'heure actuelle, le Comité de coordination des données hydrauliques et hydrologiques de base des Grands Lacs prépare la prochaine mise à jour du SRIGL (Contrôle vertical — Sous-comité sur les contrôles verticaux des niveaux d'eau, 2017).

Grâce à un partenariat binational, les niveaux d'eau des Grands Lacs sont continuellement surveillés par les organismes fédéraux américains et canadiens au moyen d'un réseau de stations de surveillance des niveaux d'eau dans la région (NOAA, 2021a). Cet ensemble de données représente l'un des plus longs ensembles de mesures hydrométéorologiques directes pour tous les systèmes aquatiques du monde, s'étendant sur plus de 150 ans (Lofgren et coll., 2002; Allan et coll., 2013; Gronewold et coll., 2018). Au cours de cette période, les niveaux des lacs ont varié à moins de 2 mètres (ou 6,6 pi) de la moyenne mensuelle maximale enregistrée et de la moyenne mensuelle minimale. Cependant, au cours des trois dernières décennies, on a observé une plus grande fluctuation par rapport à l'intervalle de 2 mètres.

Les niveaux d'eau des Grands Lacs sont influencés par un certain nombre de facteurs, notamment les précipitations au-dessus du lac, le ruissellement du bassin versant, l'évaporation de la surface du lac, les apports des lacs en amont, les débits sortants vers les lacs en aval, les dérivations d'eau des lacs, l'utilisation de l'eau et les plans de régularisation qui contrôlent les débits sortants du lac Supérieur et du lac Ontario (Gouvernement du Canada, 2019b). L'eau des lacs s'écoule du lac Supérieur jusqu'au lac Michigan-Huron, puis se déplace vers le sud par les voies interlacustres,

y compris le lac Sainte-Claire jusqu'au lac Érié, puis emprunte la rivière Niagara et les chutes Niagara jusqu'au lac Ontario, avant d'emprunter le fleuve Saint-Laurent et l'océan Atlantique (voir la figure 4). Comme il a été mentionné précédemment, les lacs Michigan et Huron sont mesurés comme un seul plan d'eau parce qu'ils partagent la même altitude de surface au-dessus du niveau de la mer et sont reliés dans le détroit de Mackinac (NOAA, 2021c). Les débits sortants du lac Supérieur et du lac Ontario sont surveillés par des conseils de régularisation binationaux et régularisés par des barrages et des structures de contrôle qui peuvent influencer, mais non contrôler, les niveaux d'eau dans les lacs (Commission mixte internationale [CMI], 2020). Les débits sortants des lacs Michigan-Huron, Érié et Sainte-Claire n'ont aucune forme de contrôle (US Army Corps of Engineers, 2021). Il est important de noter que la capacité de modifier les niveaux des lacs au moyen du plan de régularisation est limitée et dominée par les changements dans l'approvisionnement en eau, qui sont déterminés par les conditions météorologiques (Gouvernement du Canada, 2019b).

Les projections du niveau des lacs incluses dans le présent rapport ont été déterminées en fonction de la plupart (mais pas tous) des facteurs susmentionnés qui peuvent modifier les niveaux d'eau, y compris les précipitations au-dessus du lac, le ruissellement dans le lac, l'évaporation, le débit d'eau et la régularisation des débits sortants des lacs Supérieur et Ontario. Il est important de noter que ces projections ne prévoient pas exactement les niveaux d'eau futurs pour une année donnée. Elles représentent plutôt une plage de valeurs possibles d'où les valeurs réelles proviendront probablement à l'avenir.

Certaines projections pour le lac Ontario selon deux modèles RCP 8,5 ont donné des valeurs extrêmement élevées en raison de la surévaluation possible de l'accumulation d'eau de tous les Grands Lacs se déversant dans le lac Ontario à l'avenir et ont donc été exclues de notre analyse. Ces valeurs extrêmes ont été exclues parce qu'il est impossible de prévoir les changements qui pourraient être apportés au plan de régularisation et qui modifieraient les débits du réseau si des débits d'entrée extrêmement élevés devaient se produire dans le lac Ontario à l'avenir. Il est important de se rappeler que les projections des paramètres climatiques et des niveaux des lacs sont fondées sur la compréhension actuelle du système climatique et les hypothèses formulées au sujet du comportement futur

de la société, ce qui entraînera la quantité de gaz à effet de serre qui sera rejetée dans l'atmosphère. Il y a de nombreuses incertitudes et hypothèses inhérentes à ces projections et, par conséquent, les projections sont les plus utiles pour montrer les tendances générales de ce qui pourrait se produire à l'avenir.

La figure 5 présente une série de graphiques montrant les niveaux historiques et projetés des lacs, calculés en moyenne sur dix ans pour chaque lac selon les deux scénarios climatiques. Veuillez noter que certaines périodes sont calculées en moyenne sur moins de dix ans (c.-à-d. 2011-2019, 2025-2030 et 2091-2095). Les niveaux historiques des lacs sont affichés de 1961 à 2019, tandis que les projections des deux scénarios climatiques sont affichées de 2025 à 2095. Des moyennes à long terme pour l'ensemble du lac (1918-2019) sont présentées pour chaque lac, qui sont des points de repère utilisés dans les modèles de prévision et la surveillance du bilan hydrique des Grands Lacs (NOAA, 2021a). Ces graphiques visent à montrer la variation à long terme des niveaux d'eau, à l'aide de tracés en boîte et de diagramme de quartiles pour montrer les quartiles minimums, maximums, moyens et différents pour chaque période (voir l'encadré 4 pour savoir comment interpréter les tracés en boîte et les diagrammes de quartiles).

ENCADRÉ 4 : COMMENT LIRE LES TRACÉS EN BOÎTE ET LES DIAGRAMMES DE QUARTILES

Les tracés en boîte et les diagrammes de quartiles sont une forme de graphique qui présente une ventilation des données par quartiles (ou incréments de 25 %). Le diagramme du bas commence par la valeur minimale et représente la fourchette du premier quartile. La ligne du milieu de l'encadré représente la médiane (ou le deuxième quartile). De la médiane au haut du rectangle se trouve le troisième quartile. Le diagramme supérieur indique la plage du quatrième quartile, qui se termine par la valeur maximale. La moyenne peut également être affichée, qui est représentée par un symbole « x » dans ce rapport.

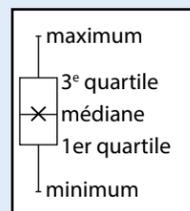
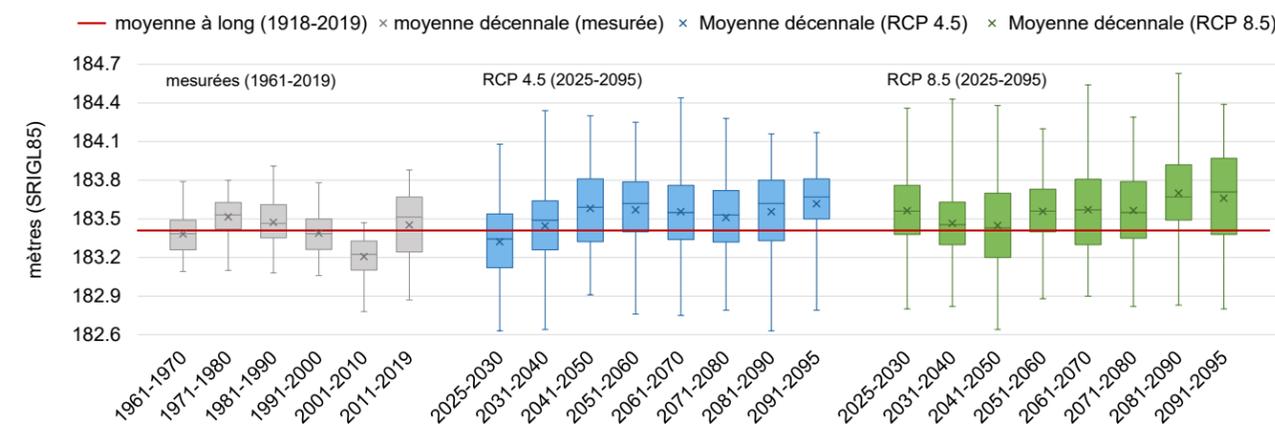


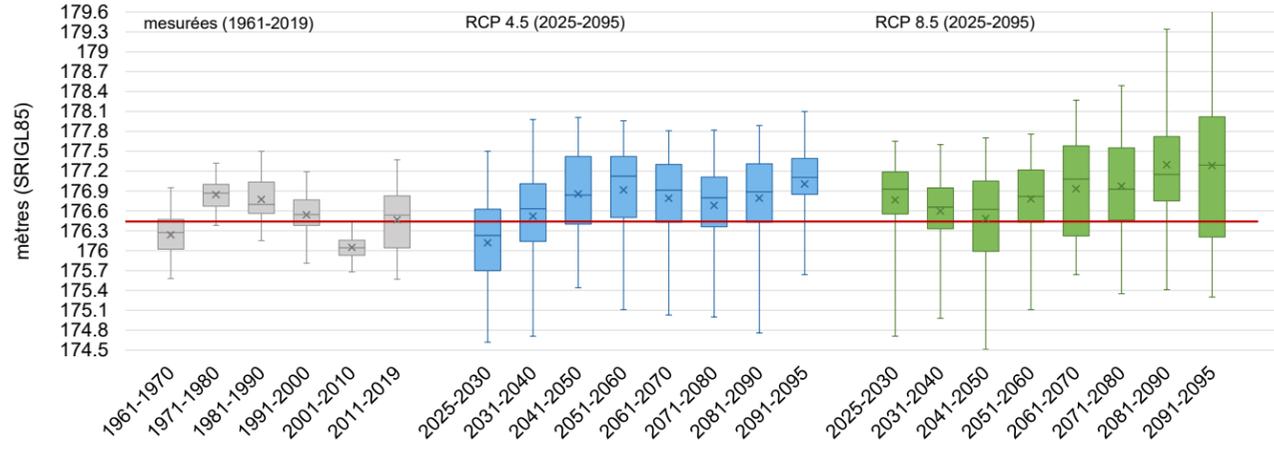
Figure 5: Les niveaux d'eau moyens décennaux historiques et projetés des lacs selon les RCP 4.5 et 8.5 pour

a) le lac Supérieur, b) le lac Michigan-Huron, c) le lac Érié, d) le lac Sainte-Claire et e) le lac Ontario. Chaque décennie est représentée par un tracé en boîte et un diagramme de quartiles. Les niveaux projetés des lacs selon les deux scénarios de changements climatiques sont présentés côte à côte avec le RCP 4.5 en bleu et le RCP 8.5 en vert. Les niveaux historiques des lacs sont présentés en gris entre 1961 et 2019. La ligne rouge montre la moyenne à long terme déclarée pour chaque lac entre 1918 et 2019 comme point de référence. Les niveaux futurs des lacs sont prévus pour la période allant de 2025 à 2095. Les projections sous six simulations de modèle RCP 4.5 sont présentées en bleu et les projections sous sept simulations de modèle RCP 8.5 sont présentées en vert. Il est à noter que certaines projections pour le lac Ontario selon deux modèles RCP 8.5 ont donné des valeurs extrêmes et ont donc été exclues.

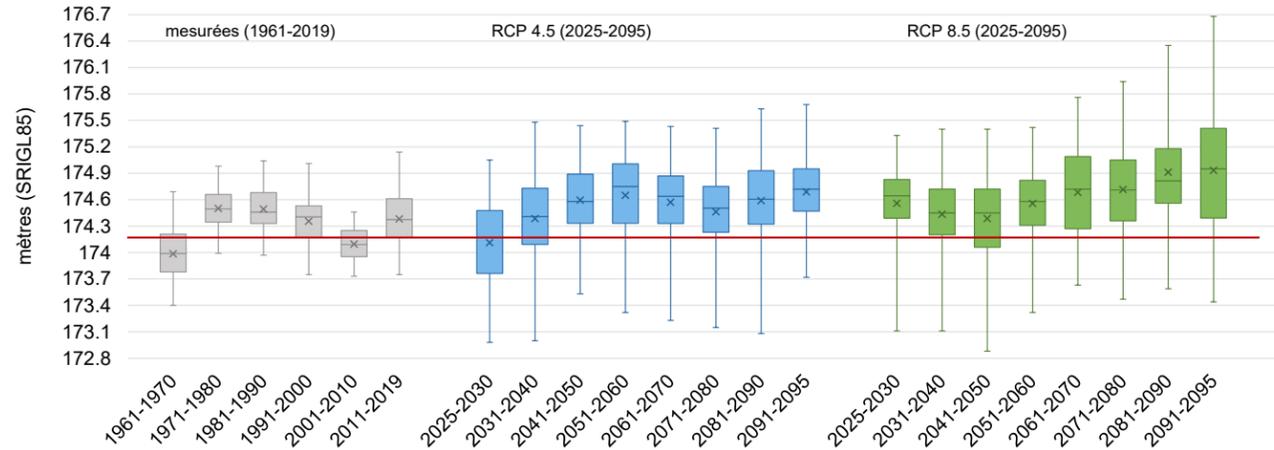
a) Lac Supérieur



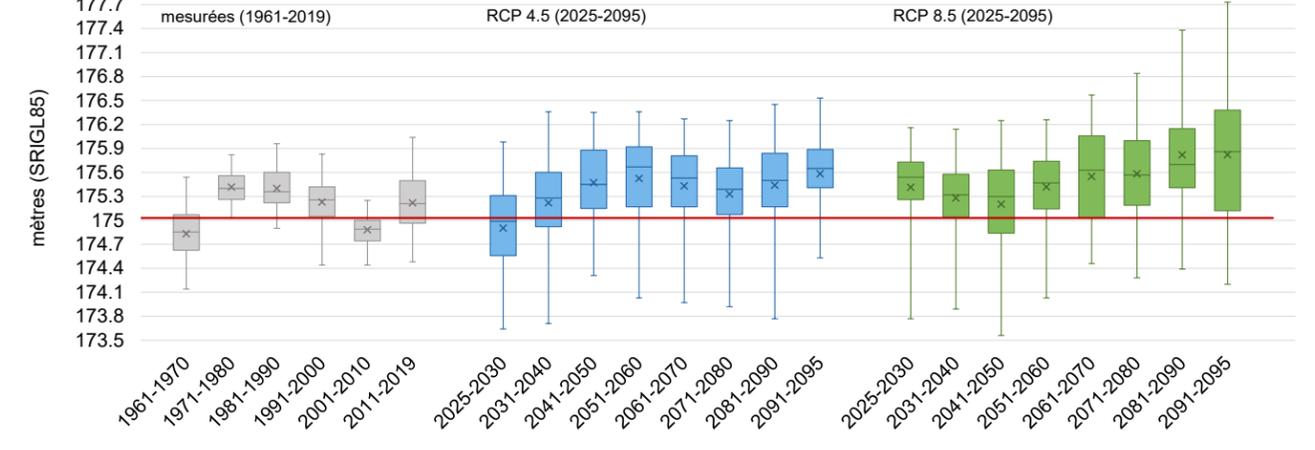
b) Lac Michigan-Huron



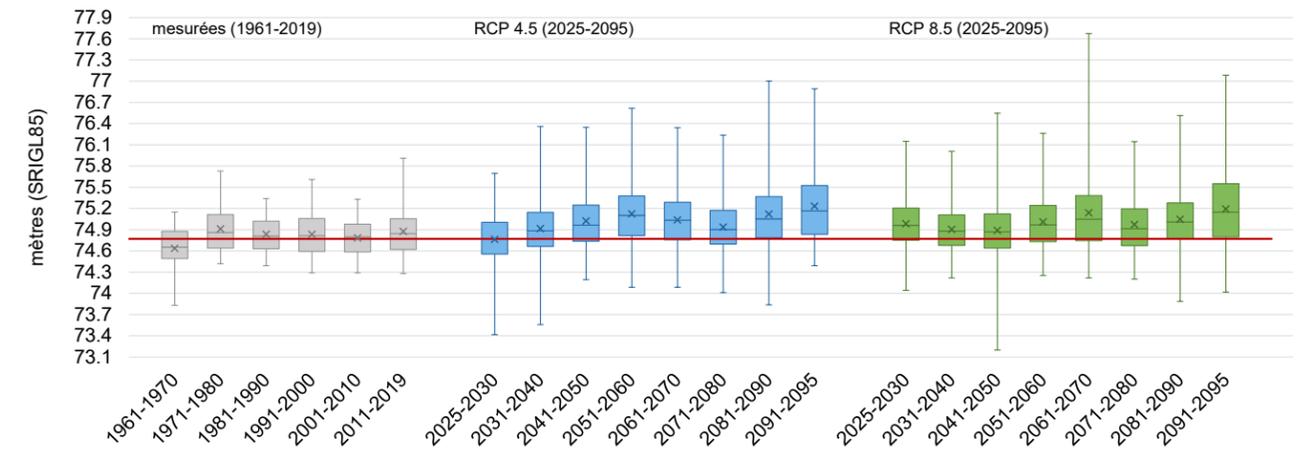
c) Lac Érié



d) Lac Sainte-Claire



e) Lac Ontario



Ces graphiques illustrent la nature cyclique des fluctuations du niveau d'eau des Grands Lacs, avec certaines périodes de haut niveau et d'autres de bas niveau. Les valeurs minimales et maximales projetées dans les deux scénarios climatiques montrent l'éventail complet des niveaux possibles des lacs qui pourraient être observés au cours de chaque période, y compris les valeurs extrêmes. La figure 5 illustre un degré élevé de variation au cours de chaque période, ce qui indique la possibilité de niveaux d'eau extrêmement élevés et extrêmement bas plus fréquents au cours des prochaines décennies. Les lacs qui ne sont pas régularisés (c.-à-d. les lacs Michigan-Huron, Érié et Sainte-Claire) présentent une grande variation des niveaux futurs des lacs. Les projections pour le lac Ontario indiquent également un grand degré de variation. Bien que les débits sortants du lac Ontario soient régularisés, les apports d'eau ne sont pas contrôlés (McNeil, 2019). Il y a aussi des limites au débit sortant du lac Ontario en raison de la capacité d'écoulement du fleuve Saint-Laurent.

La figure 6 présente un autre ensemble de graphiques montrant les niveaux historiques et projetés de chaque lac selon les deux scénarios climatiques, calculés en moyenne par mois et par période (données historiques, années 2030, années 2050 et années 2080). Ces graphiques illustrent les changements prévus des niveaux des lacs calculés en moyenne à court, à moyen et à long terme comparativement aux données historiques mesurées (1961-2019)

pour les deux scénarios climatiques. Les valeurs des 5e et 95e centiles sont présentées pour mettre en évidence la fourchette des niveaux moyens possibles des lacs pour chaque mois. On s'attend à ce que ces aires de répartition augmentent au cours des prochaines décennies (c.-à-d. qu'il y aura probablement des hauts et des bas plus élevés), ce qui indique encore une fois qu'on peut s'attendre à des niveaux d'eau plus élevés, extrêmes, plus sévères et plus fréquents dans tous les lacs à l'avenir. On prévoit des augmentations importantes des niveaux d'eau des lacs du 95e centile selon le RCP 8.5, tandis que des augmentations importantes des niveaux d'eau des lacs du 95e centile sont également prévues selon le RCP 4.5 pour les lacs Supérieur et Ontario.

La variation saisonnière des niveaux d'eau des Grands Lacs est bien définie, avec des niveaux d'eau relativement bas en hiver, une hausse des niveaux d'eau au printemps et en été, et une diminution des niveaux d'eau à la fin de l'été et au début de l'automne, avec moins de précipitations et une augmentation de l'évaporation des lacs (Quinn, 2002; Gronewold et Stow, 2014). Cette variation saisonnière semble persister dans les deux scénarios climatiques au cours des prochaines décennies.

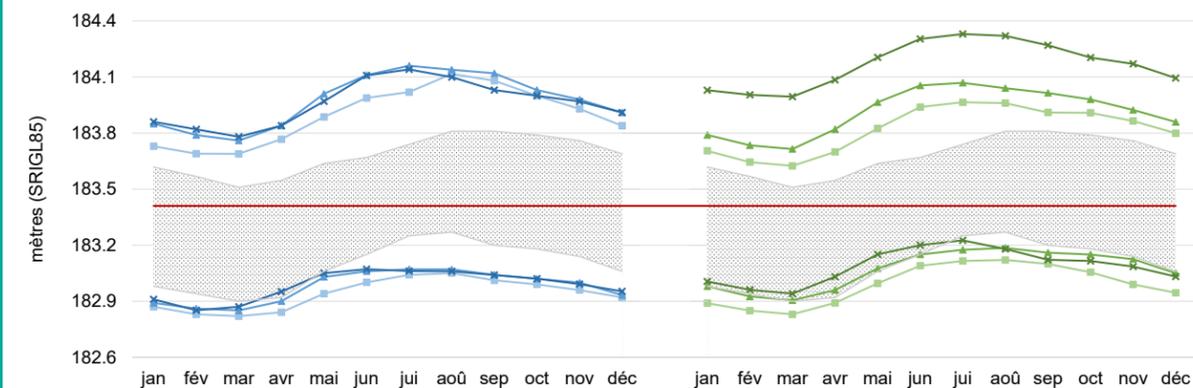
Les tableaux 6 et 7 présentent les valeurs moyennes du niveau des lacs en mètres (SRIGL85) et les écarts par rapport aux moyennes à long terme pour l'ensemble du lac (1918-2019) pour chaque lac.

Figure 6: Niveaux d'eau moyens historiques et projetés des lacs selon les RCP 4.5 et 8.5 par mois et par période pour

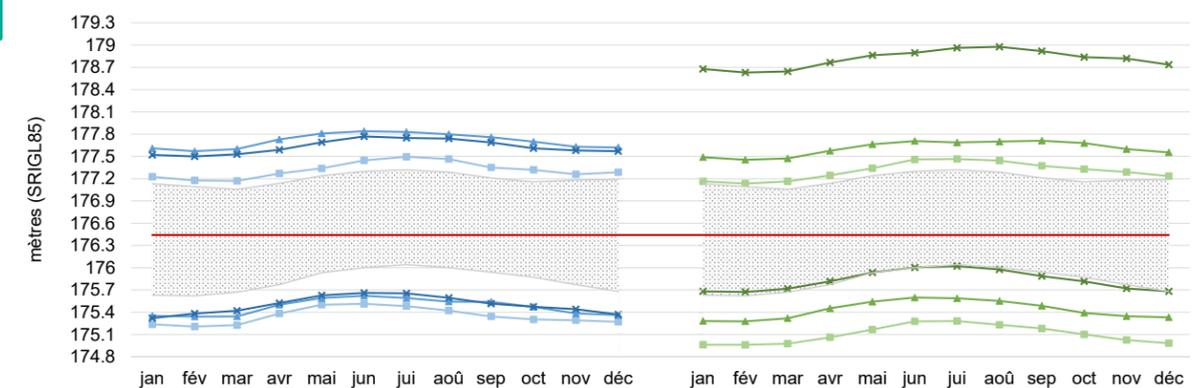
a) le lac Supérieur, b) le lac Michigan-Huron, c) le lac Érié, d) le lac Sainte-Claire et e) le lac Ontario. Les niveaux projetés des lacs selon les deux scénarios de changements climatiques sont présentés côte à côte avec le RCP 4.5 à gauche et le RCP 8.5 à droite. La zone grise en pointillés montre les niveaux historiques des lacs moyens par mois entre 1961 et 2019, qui se situent entre les 5e et 95e centiles. La ligne rouge montre la moyenne à long terme déclarée pour chaque lac entre 1918 et 2019 comme point de référence. Les niveaux futurs des lacs sont prévus pour trois périodes : les années 2030, années 2050 et années 2080, chaque période étant représentée par une couleur et un motif différents. Les lignes du haut représentent le 95e centile des valeurs projetées pour six simulations de modèle RCP 4.5 et sept simulations de modèle RCP 8.5, respectivement, et les lignes du bas représentent le 5e percentile.

- mesurées (1961-2019), 5^e et 95^e centile
- moyenne à long terme (1918-2019)
- RCP 4.5 (2030s), 5^e et 95^e centile
- RCP 4.5 (2050s), 5^e et 95^e centile
- RCP 4.5 (2080s), 5^e et 95^e centile
- RCP 8.5 (2030s), 5^e et 95^e centile
- RCP 8.5 (2050s), 5^e et 95^e centile
- RCP 8.5 (2080s), 5^e et 95^e centile

a) Lac Supérieur



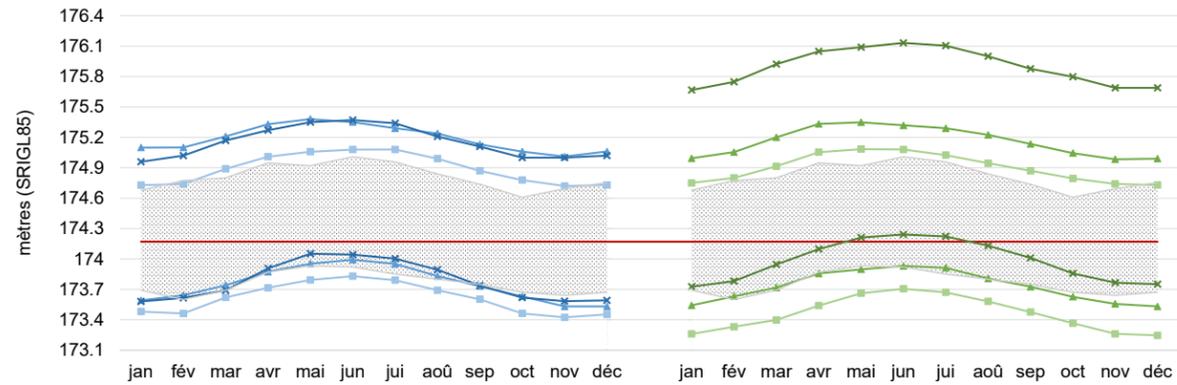
b) Lac Michigan-Huron



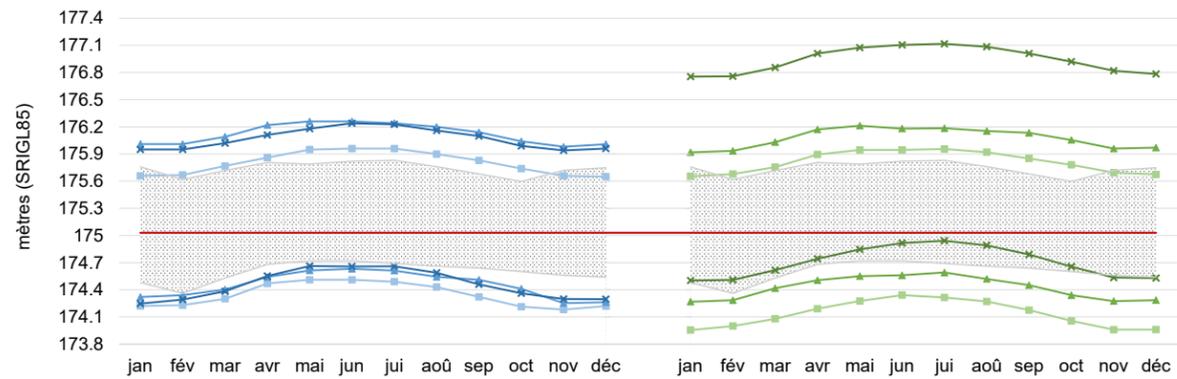


Un héron sur le lac Érié

c) Lac Érié



d) Lac Sainte-Claire



e) Lac Ontario

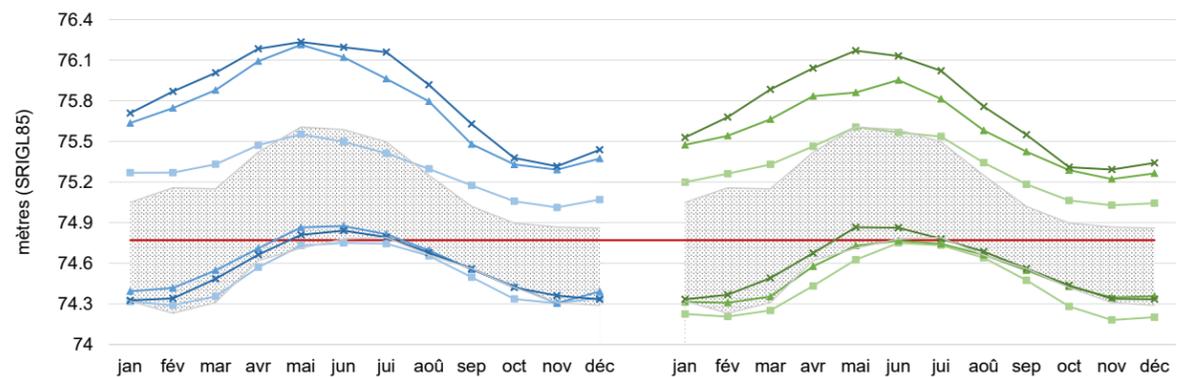


Tableau 6 : Niveaux d'eau annuels moyens historiques et projetés des lacs selon le RCP 4.5 pour la période.

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées selon le RCP 4.5 (m SRIGL85)			Différence par rapport aux valeurs correspondantes entre 1961 et 2000 (m SRIGL85)		
	5e	Moyenne	95e	5e	Moyenne	95e
LAC SUPÉRIEUR						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 183,41 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	183,2	183,4	183,7	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	182,9	183,4	184,1	-0,3	0	0,4
Années 2050 (2036-2065)	182,9	183,5	184,2	-0,3	0,1	0,5
Années 2080 (2066-2095)	182,9	183,6	184,1	-0,3	0,2	0,4
LAC MICHIGAN-HURON						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 176,44 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	175,9	176,6	177,2	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	175,0	176,4	177,5	-0,9	-0,2	0,3
Années 2050 (2036-2065)	175,4	176,8	177,8	-0,5	0,2	0,6
Années 2080 (2066-2095)	175,2	176,8	177,7	-0,7	0,2	0,5
LAC ÉRIÉ						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 174,17 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	173,8	174,3	174,8	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	173,3	174,3	175,1	-0,5	0	0,3
Années 2050 (2036-2065)	173,6	174,6	175,4	-0,2	0,3	0,6
Années 2080 (2066-2095)	173,5	174,6	175,4	-0,3	0,3	0,6
LAC SAINTE-CLAIRE						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 175,03 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	174,6	175,2	175,8	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	174,0	175,1	176,0	-0,6	-0,1	0,2
Années 2050 (2036-2065)	174,3	175,4	176,3	-0,3	0,2	0,5
Années 2080 (2066-2095)	174,2	175,4	176,2	-0,4	0,2	0,4
LAC ONTARIO						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 74,77 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	74,4	74,8	75,3	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	74,1	74,9	75,6	-0,3	0,1	0,3
Années 2050 (2036-2065)	74,3	75,1	76,2	-0,1	0,3	0,9
Années 2080 (2066-2095)	74,3	75,1	76,3	-0,1	0,3	1,0

Tableau 7 : Niveaux d'eau annuels moyens historiques et projetés des lacs selon le RCP 8.5 par période.

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées selon le RCP 4.5 (m SRIGL85)			Différence par rapport aux valeurs correspondantes entre 1961 et 2000 (m SRIGL85)		
	5e	Moyenne	95e	5e	Moyenne	95e
LAC SUPÉRIEUR						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 183,41 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	183,2	183,4	183,7	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	182,9	183,4	184,1	-0,3	0,0	0,4
Années 2050 (2036-2065)	182,9	183,5	184,1	-0,3	0,1	0,4
Années 2080 (2066-2095)	182,9	183,6	184,3	-0,3	0,2	0,6
LAC MICHIGAN-HURON						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 176,44 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	175,9	176,6	177,2	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	175,0	176,4	177,5	-0,9	-0,2	0,3
Années 2050 (2036-2065)	175,0	176,7	177,9	-0,9	0,1	0,7
Années 2080 (2066-2095)	175,6	177,1	179,1	-0,3	0,5	1,9
LAC ÉRIÉ						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 174,17 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	173,8	174,3	174,8	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	173,3	174,3	175,1	-0,5	0,0	0,3
Années 2050 (2036-2065)	173,4	174,5	175,4	-0,4	0,2	0,6
Années 2080 (2066-2095)	173,7	174,8	176,1	-0,1	0,5	1,3
LAC SAINTE-CLAIRE						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 175,03 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	174,6	175,2	175,8	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	174,0	175,1	176,0	-0,6	-0,1	0,2
Années 2050 (2036-2065)	174,1	175,3	176,3	-0,5	0,1	0,5
Années 2080 (2066-2095)	174,4	175,7	177,2	-0,2	0,5	1,4
LAC ONTARIO						
MOYENNE À LONG TERME (1918-2019) 74,77 M SRIGL85						
Historique (1961-2000)	74,4	74,8	75,3	-	-	-
Années 2030 (2006-2035)	74,1	74,8	75,6	-0,3	0,0	0,3
Années 2050 (2036-2065)	74,2	75,0	76,2	-0,2	0,2	0,9
Années 2080 (2066-2095)	74,4	75,1	76,3	0,0	0,3	1,0

Dans l'ensemble, les projections annuelles du niveau moyen des lacs indiquent des variations par rapport aux niveaux historiques des lacs (1961-2000) pour tous les lacs. Selon les deux scénarios climatiques, le lac Michigan-Huron devrait connaître la plus grande variation possible des niveaux moyens annuels des lacs à l'avenir, ce qui correspond aux observations historiques (Wuebbles et coll., 2019).

2.4 Couverture de glace (projections du CCR)

PRINCIPALES OBSERVATIONS:

- Les projections de la couverture de glace indiquent une diminution importante de la couverture de glace dans l'ensemble des lacs, surtout au cours des mois de février et de mars selon le scénario d'émissions élevées.
- Les projections indiquent la possibilité d'un plus grand nombre d'années avec peu ou pas de couverture de glace et des saisons de glace plus courtes. Pour les lacs plus profonds comme les lacs Supérieur et Huron, la croissance de la glace peut également atteindre un sommet plus tôt (en février plutôt qu'en mars).
- La couverture de glace moyenne sur les lacs Supérieur et Érié affiche les déclinés les plus importants, suivie du lac Huron.
- Le lac Michigan devrait connaître la plus forte baisse de la durée moyenne de la saison des glaces entre décembre et mai, suivi des lacs Érié et Ontario.

La **couverture de glace** fait référence à la quantité de glace qui se forme à la surface des Grands Lacs. Les mesures courantes de la couverture de glace comprennent la superficie ou le pourcentage de la surface du lac qui est couverte de glace, la durée pendant laquelle le lac reste gelé, la couverture de glace annuelle maximale et l'épaisseur de la glace qui se forme sur la surface du lac.

Historiquement, des sections des Grands Lacs gèlent habituellement chaque hiver, bien que la couverture de glace et la durée de la saison des glaces varient d'une année à l'autre (NOAA, 2021b; US Environmental Protection Agency [US EPA], 2021a). Le GLERL de la NOAA surveille et analyse la couverture de glace des Grands Lacs depuis le début des années 1970, en utilisant les produits des glaces mis au point par le National Ice Center des États-Unis et le Service canadien des glaces (NOAA, 2021b). Les données sur la couverture de glace de chaque lac sont disponibles depuis 1973 (US EPA, 2021a).

La formation et la fonte de la couverture de glace peuvent se caractériser par trois étapes : la prise de la glace, la croissance de la glace et la débâcle (Brown et Duguay, 2010). En général, la glace commence à se former sur les lacs au début de décembre et peut croître jusqu'à la mi-février ou au début de mars (Wang et coll., 2018). De la fin avril à la fin mai, la glace fond généralement complètement. Dans la présentation de la couverture de glace historique et future de cette section, la période de décembre à mai est considérée comme faisant partie de la même année (ou saison des glaces).

L'étendue et la durée de la couverture de glace peuvent varier en raison des différences de latitude, d'orientation, de profondeur (et donc de stockage de chaleur) et de turbidité (qui peuvent influencer sur la quantité de lumière réfléchie à la surface du lac, connue sous le nom d'albédo) [Wang et coll., 2018]. Comparativement aux lacs plus profonds, les lacs peu profonds comme les lacs Sainte-Claire et Érié stockent moins de chaleur et ont habituellement une plus grande couverture de glace et connaissent une saison de glace plus hâtive (c.-à-d. gel et dégel plus précoces) [US EPA, 2021b; Wang et coll., 2018]. En plus de la morphométrie des lacs, la couverture de glace peut également être influencée par la température de l'air, les précipitations, le vent et le rayonnement solaire, ainsi que par des régimes climatiques pluriannuels et décennaux comme El Niño, l'oscillation australe et l'oscillation de l'Atlantique Nord, et l'oscillation atlantique multidécennale et l'oscillation décennale du Pacifique (US EPA, 2021b; Wang et coll., 2018).

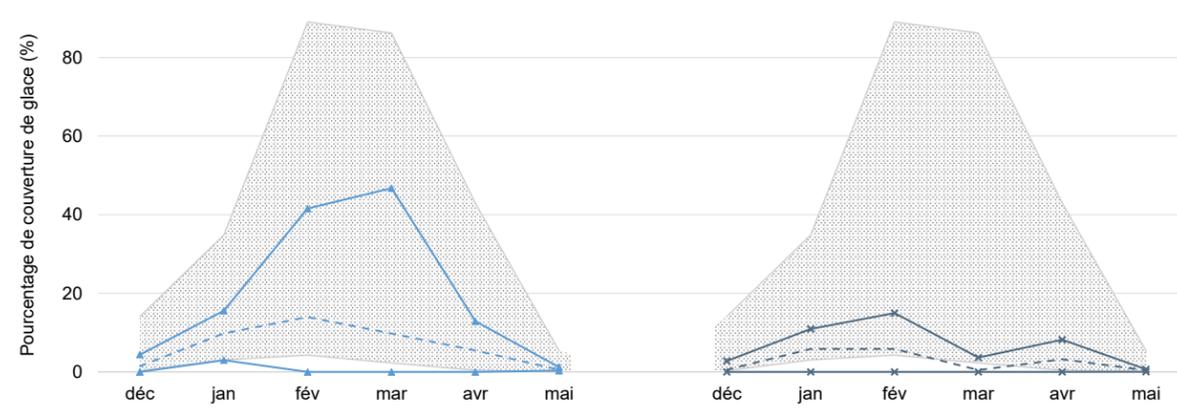
Dans l'ensemble, la couverture de glace des Grands Lacs diminue rapidement depuis les années 1970. Des chercheurs de la NOAA ont constaté qu'en moyenne, la couverture de glace annuelle maximale diminuait de 5 % par décennie (NOAA, 2018). Le présent rapport met l'accent sur les changements de la couverture de glace moyenne annuelle et de la durée de la saison des glaces entre décembre et mai.

La figure 7 présente une série de graphiques montrant la couverture de glace historique et projetée pour chaque lac selon le scénario d'émissions élevées, calculée en moyenne par mois et par période. Ces graphiques illustrent les changements prévus de la couverture de glace à moyen (2040-2059; à gauche) et à long terme (2080-2099; à droite) selon le RCP 8.5 comparativement aux données historiques observées (1980-2019). Les valeurs du 5e et du 95e centile pour l'ensemble des simulations du modèle sont présentées pour mettre en évidence l'étendue possible de la couverture de glace sur les lacs pour chaque mois. Le tableau 8 présente les valeurs projetées du pourcentage de la couverture de glace selon le RCP 8.5.

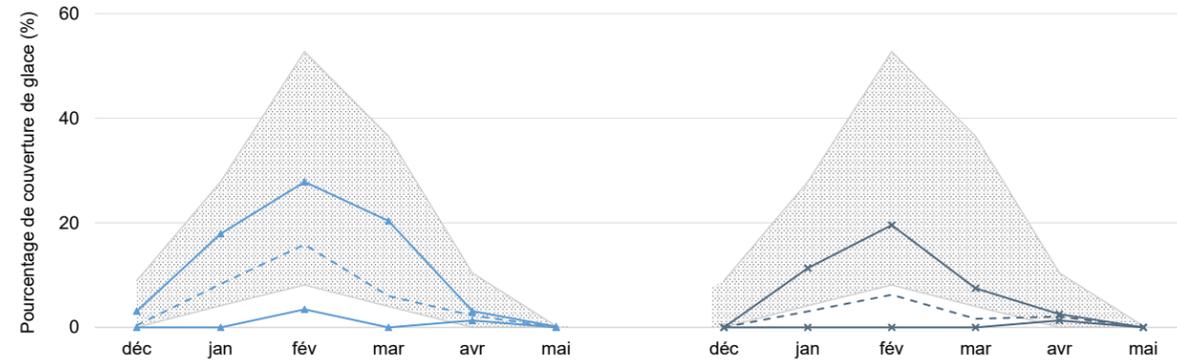
Figure 7: Couverture de glace moyenne historique et projetée selon le RCP 8.5 par mois et par période pour

a) le lac Supérieur, b) le lac Michigan, c) le lac Huron, d) le lac Érié et e) le lac Ontario. La couverture de glace projetée dans le scénario d'émissions élevées est présentée. La zone grise en pointillés montre la couverture de glace historique moyenne par mois entre 1980 et 2019 qui se situe entre le 5e et le 95e centile. La couverture de glace future est prévue pour deux périodes : 2040-2059 (à gauche) et 2080-2099 (à droite), chaque couleur étant représentée côte à côte. Les lignes du haut représentent le 95e centile des valeurs projetées pour six simulations du modèle de RCP 8.5, et les lignes du bas représentent le 5e centile.

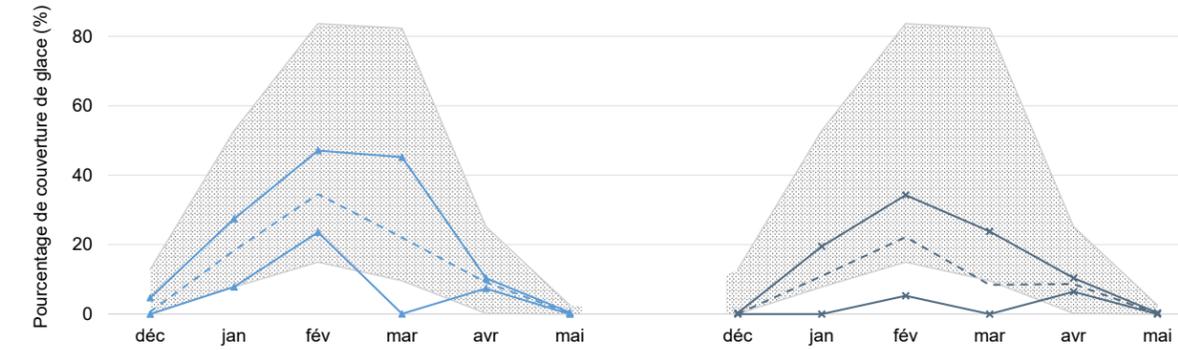
a) Lac Supérieur



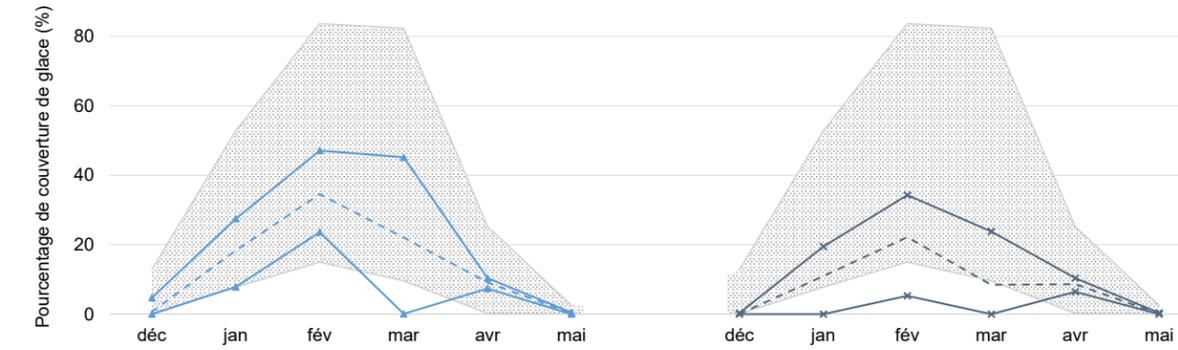
b) Lac Michigan



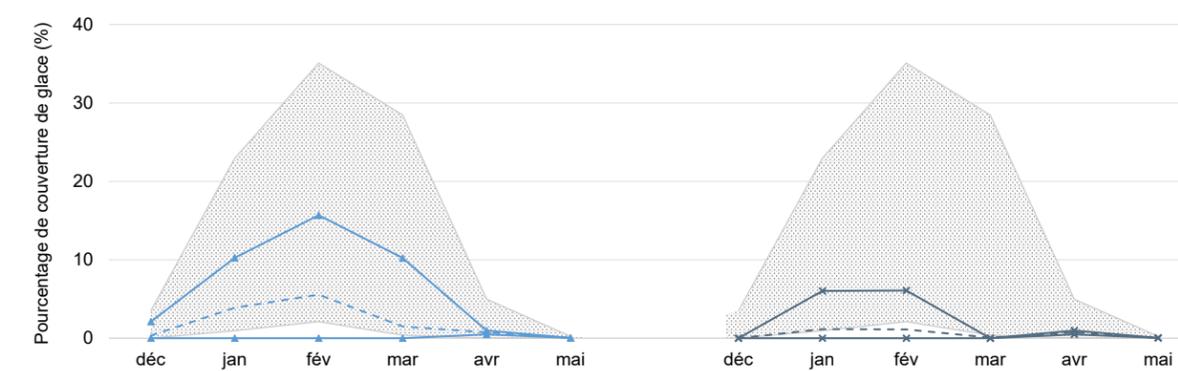
c) Lac Huron



d) Lac Érié



e) Lac Ontario



mesurées (1961-2019), 5° et 95° centile
 RCP 8.5 (2080-2099), 5° et 95° centile
 RCP 8.5 (2080-2099), moyenne mensuelle
 RCP 8.5 (2040-2059), 5° et 95° centile
 RCP 8.5 (2040-2059), moyenne mensuelle

Tableau 8 : Couverture de glace moyenne historique et projetée par saison de glace (de décembre à mai) et saison selon le RCP 8.5 par période

LAC ET PÉRIODE	Valeurs historiques et projetées du RCP 8.5 (%)			Différence par rapport aux valeurs correspondantes de 1980-1999 (%)		
	Saison des glaces	Hiver (DJF)	Printemps (MAM)	Saison des glaces	Hiver (DJF)	Printemps (MAM)
LAC SUPÉRIEUR						
Historique (1980-1999)	20,6	22,0	19,3	-	-	-
2040-2059	6,9	8,5	5,3	-14 %	-13 %	-14 %
2080-2099	2,7	4,1	1,4	-18 %	-18 %	-18 %
LAC MICHIGAN						
Historical (1980-1999)	10,8	21,1	6,7	-	-	-
2040-2059	5,5	8,3	2,8	-5 %	-7 %	-4 %
2080-2099	2,2	3,2	1,2	-9 %	-12 %	-5 %
LAC HURON						
Historique (1980-1999)	22,3	38,0	17,8	-	-	-
2040-2059	14,3	18,1	10,5	-8 %	-9 %	-7 %
2080-2099	8,4	11,2	5,7	-14 %	-16 %	-12 %
LAC ÉRIÉ						
Historique (1980-1999)	25,3	50,9	14,8	-	-	-
2040-2059	13,0	17,1	8,9	-12 %	-19 %	-6 %
2080-2099	6,2	5,8	6,6	-19 %	-30 %	-8 %
LAC ONTARIO						
Historique (1980-1999)	6,1	12,6	3,5	-	-	-
2040-2059	2,0	3,3	0,8	-4 %	-6 %	-3 %
2080-2099	0,5	0,8	0,3	-6 %	-8 %	-3 %

Comme le montre la figure 7, la couverture de glace moyenne devrait diminuer pendant l'hiver et le printemps dans tous les lacs, surtout en février et en mars, selon le scénario d'émissions élevées. Ces changements donnent à penser que la couverture de glace pourrait être moindre sur les Grands Lacs, qu'il pourrait y avoir plus d'années avec peu ou pas de couverture de glace, et que la croissance de la glace pourrait atteindre un sommet plus tôt, surtout dans les lacs plus profonds comme les lacs Supérieur et Huron (voir la section 3.0 pour les répercussions de ces changements). La couverture de glace moyenne sur les lacs Supérieur et Érié affiche les déclinés les plus importants, suivie du lac Huron.

Historiquement (1980-1999), la couverture de glace moyenne pendant l'hiver et le printemps a varié de 25,3 % sur le lac Érié à 6,1 % sur le lac Ontario. Selon le RCP 8.5, la couverture de glace moyenne durant l'hiver et le printemps pourrait diminuer de 19 % sur le lac Érié et de 6 % sur le lac Ontario d'ici la fin du siècle, comparativement à la période historique (1980-1999). Ces projections indiquent une diminution importante de la couverture de glace moyenne dans le bassin des Grands Lacs.

Les plus fortes baisses de la couverture de glace moyenne sont prévues pour les mois d'hiver comparativement aux valeurs saisonnières moyennes entre 1980 et 1999. Selon le RCP 8.5, la couverture de glace moyenne en hiver pourrait diminuer de 8 à 30 % d'ici la fin du siècle dans l'ensemble des Grands Lacs. La couverture de glace moyenne au printemps pourrait diminuer de 3 à 18 % d'ici la fin du siècle dans l'ensemble des Grands Lacs.

Le tableau 9 présente la durée historique et prévue de la saison des glaces entre décembre et mai pour chaque lac en jours. Les valeurs des 5e et 95e centiles sont incluses pour mettre en évidence l'éventail des possibilités pour la durée de la saison des glaces, qui peut varier d'une année à l'autre. En moyenne, la saison des glaces a duré de 106 à 139 jours dans les Grands Lacs entre 1981 et 1999 (1980 a été exclue parce que les données de décembre 1979 n'ont pas été analysées). Selon le RCP 8.5, la durée moyenne de la saison des glaces pourrait varier de 47 à 124 jours dans les Grands

Lacs d'ici la fin du siècle. Dans la plupart des cas, le nombre de jours où les lacs sont couverts de glace devrait diminuer à l'avenir, bien que certaines années pourraient encore connaître une augmentation par rapport à la période historique.

D'ici la fin du siècle, le lac Michigan devrait connaître la plus forte diminution de la durée moyenne de la saison des glaces, soit 72 jours de moins qu'en 1981-1999. Viennent ensuite le lac Érié et le lac Ontario, qui pourraient connaître une diminution de 66 et de 50 jours, respectivement, d'ici la fin du siècle par rapport à 1981-1999. Ces projections indiquent une réduction importante de la saison moyenne des glaces dans le bassin des Grands Lacs pendant l'hiver et le printemps.

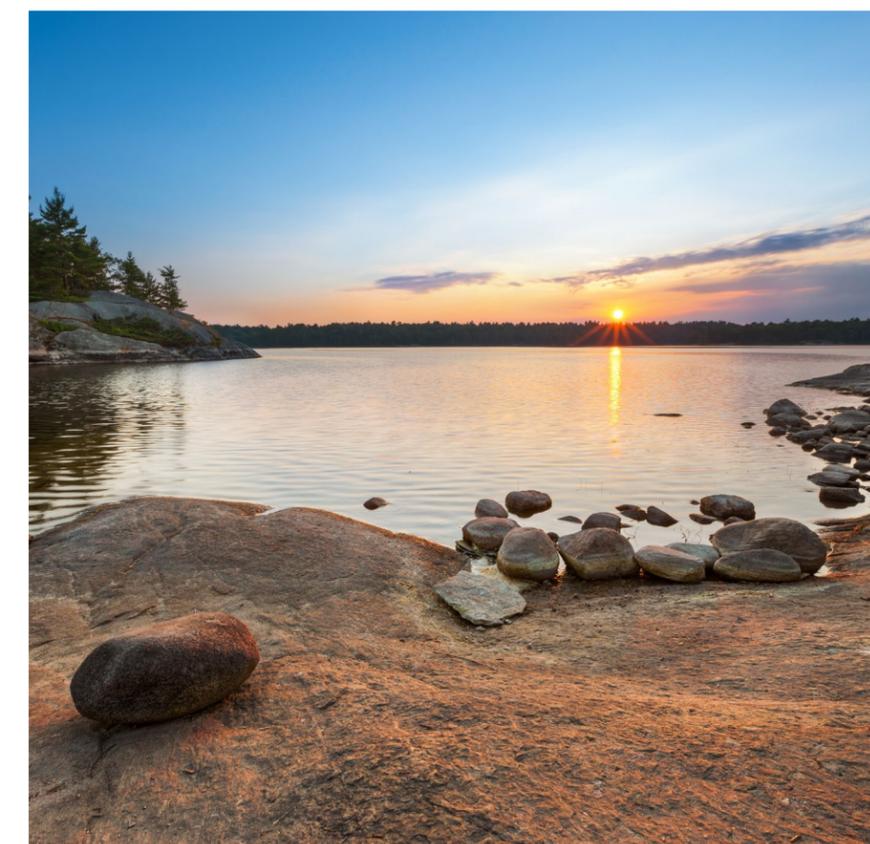


Tableau 9 : Durée historique et prévue de la saison des glaces entre décembre et mai selon le RCP 8.5 par période

LAC ET PÉRIODE	Durée historique et prévue de la saison des glaces en hiver et au printemps selon le RCP 8.5 (jours)			Différence par rapport aux valeurs correspondantes de 1981 à 1999 (jours)		
	5e	Moyenne	95e	5e	Moyenne	95e
LAC SUPÉRIEUR						
Historique (1981-1999)	105	139	166	-	-	-
2041-2059	126	134	139	20	-5	-27
2081-2099	112	124	138	7	-15	-28
LAC MICHIGAN						
Historique (1981-1999)	104	126	157	-	-	-
2041-2059	74	84	93	-30	-42	-64
2081-2099	29	54	66	-75	-72	-91
LAC HURON						
Historique (1981-1999)	105	131	156	-	-	-
2041-2059	109	118	126	4	-13	-30
2081-2099	65	93	118	-41	-38	-38
LAC ÉRIÉ						
Historique (1981-1999)	67	112	145	-	-	-
2041-2059	63	87	104	-4	-26	-41
2081-2099	0	47	86	-67	-66	-58
LAC ONTARIO						
Historique (1981-1999)	87	106	129	-	-	-
2041-2059	79	85	94	-8	-21	-35
2081-2099	38	57	73	-48	-50	-56

3.0 Répercussions des changements climatiques

Dans l'ensemble du bassin des Grands Lacs, les répercussions des changements climatiques se font déjà sentir.

Les changements du climat et des niveaux d'eau ont une incidence sur les gens, l'infrastructure et les écosystèmes dans la région des Grands Lacs. Les répercussions peuvent être des dommages coûteux à l'infrastructure et aux biens, des menaces à la santé et à la sécurité humaines, des changements aux écosystèmes et à la biodiversité, et des répercussions sur les entreprises et les économies locales. Ces répercussions seront ressenties différemment par différentes personnes, selon les facteurs socioéconomiques et l'emplacement géographique.

Les changements climatiques ont également un effet multiplicateur sur les menaces, exacerbant les effets des facteurs de stress existants comme la pollution, les espèces envahissantes, l'aménagement des côtes et des rives, ainsi que l'inégalité. Cette section met en lumière certaines des principales répercussions des changements climatiques qui se font déjà sentir dans les collectivités du bassin des Grands Lacs, d'après un examen de la documentation publiée, y compris des articles examinés par des pairs, des rapports et des articles de presse. Les répercussions observées comprennent le réchauffement des températures des eaux de surface, la réduction de la couverture de glace, les inondations, l'érosion et les tempêtes, les répercussions sur les industries et les moyens de subsistance, et les répercussions sur les écosystèmes et la biodiversité.

3.1 Répercussions des températures plus chaudes de l'eau

Avec des températures de l'air plus chaudes et une couverture de glace réduite, les températures des eaux de surface estivales se réchauffent dans les Grands Lacs (Allan et coll., 2013). Dans la région des Grands Lacs d'amont, en particulier le lac Supérieur, les températures de l'eau en été se réchauffent encore plus rapidement que les températures de l'air régionales (Austin et Colman, 2007; O'Reilly et coll., 2015; Zhong et coll., 2016; idem, 2019). La température des eaux de surface s'est réchauffée le plus rapidement

le long de la côte et dans la partie est du lac Supérieur (Bartolai et coll., 2015; voir encadré 5). Entre-temps, le réchauffement des autres lacs a surtout été observé dans le centre-nord (lac Michigan) et dans les régions de l'est (lacs Huron, Érié et Ontario). Le réchauffement de la température de l'eau empêche le mélange des eaux du lac, augmente l'appauvrissement en oxygène, favorise la prolifération d'algues nuisibles et entraîne le déclin des espèces d'eau froide. Bon nombre de ces processus sont interreliés et se renforcent mutuellement.

La stratification des eaux lacustres se produit plus tôt, avec des hivers plus courts et un réchauffement plus précoce au printemps (voir la figure 8; Kling et coll., 2003; Allan et coll., 2013). De plus, elle peut durer plus longtemps et s'établir à des profondeurs moins profondes. La stratification fait référence à la superposition et à la séparation des eaux de surface plus chaudes des eaux plus fraîches au fond du lac (Kling et coll., 2003). Elle empêche le mélange de l'eau dans la colonne d'eau et l'oxygénation de l'eau à de plus grandes profondeurs, ce qui peut mener à des périodes d'anoxie de fond plus longues et plus étendues (c.-à-d. épuisement de l'oxygène) ou « zones mortes », lorsque l'oxygène est presque entièrement consommé par les organismes. Les « zones mortes » persistantes peuvent causer la mort massive de poissons, des dommages aux pêches, des proliférations d'algues toxiques et des effets négatifs sur l'eau potable (voir l'encadré 6).

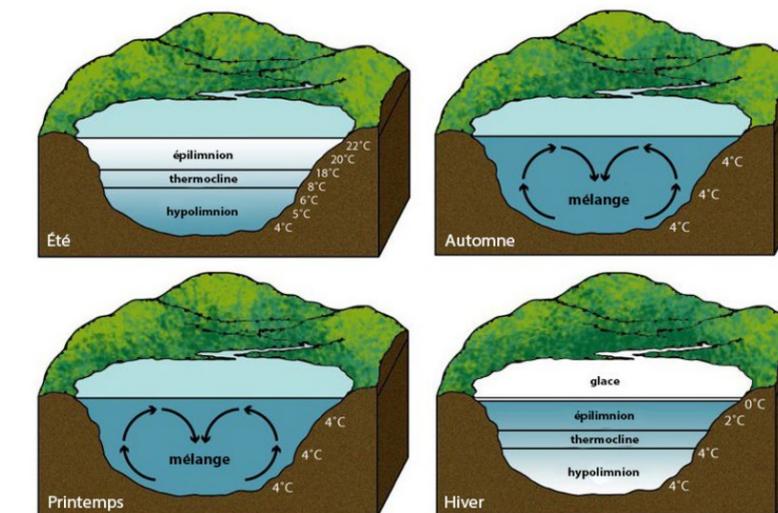


Figure 8: Mélange et stratification des lacs (crédit : Tim Gunther).

Le mélange des eaux des lacs se produit généralement lorsque l'eau de surface se refroidit à partir de sa température maximale de l'année, habituellement en septembre, et commence à se mélanger avec de l'eau plus chaude et moins dense à de plus grandes profondeurs (Wuebbles et coll., 2019). Ce mélange se poursuit jusqu'à ce que l'eau atteigne un seuil de 4 °C (ou 39,2 °F) [le point auquel l'eau douce atteint une densité maximale]. Cependant, lorsque la température de l'eau de surface reste au-dessus de 4 °C, le lac peut ne pas se mélanger complètement pour faire remonter les éléments nutritifs du fond du lac et ramener l'oxygène dissous essentiel dans les eaux plus profondes pour les poissons et les espèces de zooplancton (Bartolai et coll., 2015). Ce manque de mélange contribue à l'augmentation de la stratification thermique et du réchauffement des eaux de surface. Certaines parties du sud du lac Michigan et du lac Ontario affichaient apparemment des températures de surface supérieures à 4 °C pendant les hivers de 2011-2012 et de 2016-2017 (Wuebbles et coll., 2019). Étant le plus petit lac par superficie, le lac Ontario est particulièrement sensible à cet effet.

ENCADRÉ 5 : POURQUOI LE LAC SUPÉRIEUR SE RÉCHAUFFE-T-IL PLUS RAPIDEMENT QUE LES AUTRES LACS?

Selon une étude menée par O'Reilly et d'autres chercheurs en 2015, le lac Supérieur se classe au deuxième rang parmi les lacs du monde qui se réchauffent le plus rapidement, derrière un lac en Suède. Même si l'on peut s'attendre à ce que les lacs plus petits se réchauffent plus rapidement, plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de l'augmentation du réchauffement des lacs, comme celui du lac Supérieur (Chung, 2015). Les lacs qui sont normalement recouverts de glace en hiver connaissent une fonte des glaces plus tôt au printemps, ce qui expose les lacs à plus de rayonnement solaire et augmente la quantité de chaleur absorbée par les lacs. La stratification estivale se produit également plus tôt, ce qui se renforce en inhibant le mélange d'eau plus froide située à de plus grandes profondeurs.

Les températures plus élevées de l'eau favorisent la croissance de certains types d'algues et de cyanobactéries qui forment des proliférations (Wuebbles et coll., 2019). Lorsque la température de l'eau est supérieure à 20 °C (ou 68 °F), les taux de croissance de nombreuses cyanobactéries qui forment des

proliférations augmentent (p. ex., Microcystis, Anabaena et Cylindrospermopsis), ce qui peut entraîner des proliférations algales nuisibles. Parmi ces cyanobactéries, les espèces des genres Microcystis et Anabaena sont les plus préoccupantes parce qu'elles produisent des produits chimiques toxiques qui peuvent endommager le foie et les tissus nerveux, respectivement (Michalak et coll., 2013). Le contact avec des cyanobactéries et la consommation d'eau contaminée par des cyanobactéries ont été associés à une irritation de la peau et des yeux, à des maladies respiratoires, à des maladies gastro-intestinales et à des dommages au foie et aux reins (Angel et coll., 2018). Compte tenu de ces risques pour la santé publique, des restrictions sur les pêches, les loisirs côtiers et l'eau potable sont habituellement mises en place lorsque des proliférations d'algues nuisibles surviennent (Sharma et coll., 2018). Même les proliférations d'algues non toxiques peuvent avoir des effets importants sur les lacs, rendant l'eau des lacs nauséabonde et désagréable au goût, et parfois dangereuse à boire, appauvrissant l'oxygène, tuant des poissons et entraînant des processus chimiques qui préparent les lacs pour des proliférations plus importantes à l'avenir (Michalak et coll., 2013; Filippelli et Ortiz, 2020). Au cours des dernières années, les eaux normalement vierges du lac Supérieur ont également connu des proliférations d'algues près des îles Apostle, ce qui indique les défis potentiels auxquels nous pourrions continuer de nous attendre en raison des changements climatiques (Wuebbles et coll., 2019; Briscoe, 2019c). Entre-temps, dans le lac Érié, la gravité des proliférations est généralement à la hausse depuis le début des années 2000 (Hartig et coll., 2020).

Des eaux plus chaudes et moins oxygénées favorisent une décomposition microbienne accrue et le rejet subséquent d'éléments nutritifs (p. ex., phosphore) et de contaminants (p. ex., mercure et autres métaux lourds) à partir des sédiments de fond (Kling et coll., 2003). Les métaux lourds comme le mercure deviennent plus solubles (et biodisponibles) en l'absence d'oxygène parce que l'oxygène se lie à ces éléments pour former des composés insolubles qui coulent au fond du lac. Cela pourrait entraîner une augmentation de l'absorption par les organismes aquatiques, entraînant une accumulation accrue de mercure et d'autres contaminants dans la chaîne alimentaire aquatique, ce qui aurait des répercussions sur les humains et les espèces sauvages. Lorsque l'eau à faible teneur en oxygène interagit avec les sédiments du fond du lac Érié et l'argile, des métaux lourds comme le manganèse et le

fer sont libérés dans l'eau (Briscoe, 2019a). L'eau à faible teneur en oxygène est également plus corrosive et peut endommager les conduites d'eau, ce qui cause une odeur nauséabonde et un mauvais goût de l'eau, et augmente le rejet de métaux traces provenant des conduites, ce qui peut également constituer une menace pour la santé humaine.

ENCADRÉ 6 : LA ZONE MORTE DU LAC ÉRIÉ PRÉSENTE DES RISQUES POUR L'EAU POTABLE MUNICIPALE

La zone morte du lac Érié est principalement située dans des eaux profondes au large des côtes et peut couvrir une superficie de la taille du Connecticut (Briscoe, 2019a). Cependant, les vents du nord est peuvent pousser cette eau vers le littoral de l'Ohio, où elle menace un certain nombre de prises d'eau potable municipales importantes de Lorain (environ 48 km ou 30 miles à l'ouest de Cleveland) à Ashtabula (environ 97 km ou 60 miles à l'est). C'est ce qui s'est produit à Westlake, en Ohio, le 9 août 2006, lorsque des vents du nord-est ont soufflé sur le lac, ce qui a mené les eaux à faible teneur en oxygène et chaudes du large à engouffrer la structure de l'encaissement protégeant la prise d'eau potable municipale et, par la suite, à pénétrer dans trois des quatre installations de traitement de l'eau de l'usine de traitement Crown Water. Cela a duré jusqu'à 12 jours et les concentrations de manganèse à l'usine de traitement Crown Water ont parfois dépassé 1 milligramme par litre (mg/l), dépassant les seuils recommandés par l'Environmental Protection Agency d'au plus 0,3 mg/l pour les femmes enceintes et allaitantes, et d'au plus 1 mg/l pour les adultes en bonne santé. Le manganèse cause la décoloration de l'eau et a été associé à des problèmes neurologiques permanents.

Le réchauffement des températures de l'eau signifie également une diminution de l'habitat disponible pour les espèces de poissons d'eau froide (p. ex., touladi, omble de fontaine, grand corégone, méné émeraude et éperlan arc-en-ciel) et les espèces d'eau fraîche (p. ex., grand brochet et doré jaune; Alofs et coll., 2014, 2015; Dove-Thompson et coll., 2011). Pour les lacs plus petits et moins profonds comme le lac Ontario, l'augmentation de la température de l'eau peut entraîner une perte importante du volume d'eau de fond froide, limiter les espèces de poissons d'eau froide à des bandes de

plus en plus étroites dans la colonne d'eau où les niveaux d'oxygène sont suffisants et où la température est supportable (Briscoe, 2019b). Au fur et à mesure que la température de l'eau augmente, les espèces de poissons des eaux froides diminuent probablement et peuvent être de plus en plus remplacées par des espèces des eaux plus chaudes (voir la section 3.4 pour les répercussions sur la pêche commerciale, récréative et de subsistance).

3.2 Répercussions de la réduction de la couverture de glace

Bien que la couverture de glace des Grands Lacs varie d'une année à l'autre, elle diminue rapidement depuis les années 1970 (NOAA, 2018; voir la section 2.4). Dans les zones côtières, la glace de lac aide à protéger les rives en réduisant l'action des vagues et est importante pour les collectivités qui dépendent des routes de glace et pour les loisirs d'hiver.

La couverture de glace aide à réduire l'énergie et l'érosion des vagues qui s'accumulent le long de la côte. Elle offre également une isolation et une protection pour les habitats de fraie dans les zones peu profondes pour les espèces qui fraient pendant l'automne et l'hiver (Bartolai et coll., 2015). Compte tenu de la réduction de la couverture de glace au début et à la fin de l'hiver et de la possibilité de niveaux d'eau extrêmes plus fréquents, on peut s'attendre à une augmentation des risques d'érosion, en particulier pour les réseaux de plages sablonneuses du sud du lac Huron, et d'une grande part des lacs Michigan, Érié et Ontario (Wuebbles et coll., 2019). Il y a aussi un risque accru de débordement et d'ouverture de brèches dans les barrières, ce qui a une incidence sur les milieux humides côtiers protégés par des barrières et des digues/réservoirs de retenue, en particulier aux endroits vulnérables, comme la baie Presque Isle et la pointe Long sur le lac Érié, et le long des barrières à l'embouchure de la baie de Sodus et du port de Hamilton dans le lac Ontario. Les milieux humides côtiers et les rives de la pointe Pelée, du marais Hillman, de la baie Rondeau et de la pointe Long ont été endommagés et touchés par des vagues entraînées par le vent pendant que le niveau des lacs était élevé. Les marais côtiers endigués du lac Sainte-Claire ont également été dégradés.

Pour de nombreuses personnes de la région des Grands Lacs, la glace de lac fait partie intégrante de la vie et contribue à un sentiment d'appartenance et d'identité (Briscoe, 2020a). Pour les collectivités qui dépendent des routes de glace, la couverture de glace assure la mobilité et l'accès pendant l'hiver à des ressources essentielles comme la nourriture, l'essence et d'autres nécessités. La couverture de glace est également importante pour les activités récréatives hivernales, comme la motoneige et la pêche sur glace. La diminution de la couverture de glace peut donc entraîner la perte de moyens de transport essentiels pour certaines collectivités (voir l'encadré 7), la perte de loisirs et de culture hivernales, ainsi que des risques pour la sécurité des gens lorsqu'ils voyagent dans des conditions de glace dangereuses. Au cours des hivers récents, plus de 200 personnes ont été sauvées et plus de trois douzaines sont mortes dans des accidents liés à la glace sur les Grands Lacs et les plans d'eau avoisinants.

ENCADRÉ 7 : LA ROUTE DE GLACE RELIANT BAYFIELD ET L'ÎLE MADELINE SUR LE LAC SUPÉRIEUR

Historiquement, la glace de lac se forme sur une grande partie du lac Supérieur, créant une route de glace d'environ 3 km (ou 1,9 mile) qui relie Bayfield, au Wisconsin, et l'île Madeline (Briscoe, 2020a). Cette route de glace permet d'assurer un accès gratuit à longueur d'année pour les résidents de l'île Madeline en provenance et à destination du continent pour la nourriture, l'essence et d'autres produits de première nécessité. Avec la diminution de la couverture de glace du lac, la route de glace ne s'est jamais formée en 2020. Par conséquent, les gens du coin ont dû payer pour prendre le traversier, ce qui représente un coût de la vie supplémentaire. En même temps, la Madeline Ferry Line perdait de l'argent parce que le transport de quelques passagers pendant la saison morte n'est pas suffisant pour compenser les coûts d'exploitation. Pour atténuer les pertes, l'entreprise a ajouté un supplément hivernal, ce qui a fait augmenter le coût du transport pour les résidents de l'île Madeline.



3.3 Répercussions des inondations, de l'érosion et des tempêtes

Les inondations et l'érosion ont déjà des effets dévastateurs dans le bassin des Grands Lacs. Sur les rives ouest du lac Michigan, par exemple, des maisons ont commencé à glisser dans le lac en raison de l'érosion des dunes côtières (O'Connell, 2020b). La fréquence et la gravité des inondations et de l'érosion augmenteront probablement sous l'effet des changements climatiques, avec des précipitations plus fréquentes et plus intenses, une fonte des neiges plus hâtive au printemps, plus de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige, une débâcle plus hâtive et peut-être des niveaux d'eau extrêmes plus fréquents. L'augmentation des inondations et de l'érosion peut causer des dommages à l'infrastructure et aux biens, présenter des risques pour la santé et la sécurité humaines et avoir une incidence sur la santé mentale et le bien-être des gens. Les inondations et l'érosion peuvent aussi augmenter la remise en suspension des sédiments contaminés et augmenter le risque de maladies d'origine hydrique (Gagnon et coll., 2019).

Les récents niveaux d'eau élevés dans les Grands Lacs ont entraîné l'inondation de maisons, d'entrées de cour, de routes et de sentiers, ainsi que l'érosion des rives, et la perte de plages et de végétation (McNeil, 2019). Le lac Ontario a connu un niveau d'eau record en 2017 de 75,88 m SRIGL85 (ou 248,95 pi SRIGL85), qui a par la suite été dépassé seulement deux ans plus tard en 2019, avec un nouveau record de 75,92 m SRIGL85 (ou 249,09 pi) [CMI, 2019]. Les zones qui ont été particulièrement touchées au cours des deux années comprennent des parties de l'île de Toronto, de Clarington, de Brighton, du comté de Prince Edward, de la zone côtière des Mille-Îles et de la baie de Quinte en Ontario, au Canada (McNeil, 2019). De nombreux états d'urgence ont été déclarés au Canada et aux États-Unis, et les dommages et les réparations nécessaires qui en ont résulté ont été coûteux (voir l'encadré 8 pour des exemples de ces coûts). Pour les résidents et les propriétaires d'entreprise le long de la rive du lac Ontario, les événements des dernières années ont non seulement eu des répercussions financières importantes, mais aussi des répercussions sur la santé émotionnelle et mentale (O'Connell, 2020a). Étant donné que des niveaux d'eau plus

élevés et plus faibles sont prévus dans l'ensemble des Grands Lacs en raison des changements climatiques, il faut se préparer à des niveaux d'eau élevés et bas (p. ex., niveaux d'eau record en 2013 dans le lac Michigan-Huron).

Les dommages causés par l'érosion ne se limitent pas aux bâtiments, aux falaises et aux dunes (Eng, 2019). L'érosion peut aussi avoir une incidence sur le lit d'un lac en creusant le fond du lac, ce qui augmente le risque de vagues plus importantes qui peuvent causer plus de dommages dus à l'érosion le long de la côte. Afin de protéger leurs propriétés contre l'érosion et les hautes vagues, les propriétaires ont érigé leurs propres barrières, mais cette approche fragmentaire peut exacerber l'érosion des propriétés avoisinantes.

Des précipitations plus fréquentes et plus intenses devraient également accroître le ruissellement induit par les tempêtes et les éléments nutritifs et les contaminants connexes. Le ruissellement de surface des terres du bassin versant des Grands Lacs contribue à peu près à la moitié de l'approvisionnement en eau douce des lacs (Cherkauer et Sinha, 2010). Les nutriments peuvent s'accumuler rapidement au cours d'un petit nombre de pluies intenses (Wuebbles et coll., 2019). Le ruissellement agricole est une menace importante pour les Grands Lacs, en particulier pour le lac Érié, où on estime que le ruissellement agricole représente jusqu'à 89 % du phosphore qui pénètre dans le lac (US EPA, 2018). Dans les bassins hydrographiques urbains, plus de 60 % de la charge annuelle de tous les contaminants sont transportés pendant les tempêtes (Patz et coll., 2008). Plusieurs endroits le long du lac Ontario sont particulièrement vulnérables aux apports d'éléments nutritifs, notamment la baie de Quinte, le port de Hamilton et le secteur riverain de Toronto (ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs de l'Ontario, 2020). L'augmentation de la charge en éléments nutritifs entraînera probablement une augmentation des proliférations d'algues, ce qui aura une incidence négative sur la santé des lacs et présentera des menaces pour l'eau potable (voir la section 3.1).

Les fortes précipitations peuvent aussi augmenter les débordements des égouts unitaires, entraînant le rejet d'eaux usées non traitées dans les lacs, ce qui entraîne des niveaux plus élevés de la bactérie E. coli (une menace pour la santé publique) et la fermeture des plages (Patz et coll., 2008; Wuebbles et coll., 2019).



ENCADRÉ 8 : EXEMPLES DES COÛTS ASSOCIÉS AUX INONDATIONS, À L'ÉROSION ET AUX TEMPÊTES

- En 2017, les dommages directs et indirects causés à la Ville de Toronto (Ontario) par la fermeture du parc de l'île de Toronto en raison du niveau élevé des lacs ont été estimés à 8 millions de dollars canadiens (McNeil, 2019).
- En 2018, les inondations et l'érosion causées par les tempêtes printanières ont causé des dommages de 3,5 millions de dollars canadiens à 400 maisons et chalets entre la pointe Pelée et Wheatley en Ontario (Baxter, 2019).
- En 2019, à la suite des récents niveaux d'eau élevés du lac Huron, la Ville de Goderich, en Ontario, a dépensé de 1,5 à 2 millions de dollars canadiens pour protéger sa station de traitement de l'eau potable, qui est située à moins de 30 m (ou environ 98 pi) du bord de l'eau (Lupton, 2019).
- Un groupe de maires des Grands Lacs a estimé qu'en 2019, les niveaux d'eau élevés, les inondations et l'érosion ont causé des dommages d'une valeur de 500 millions de dollars américains dans les villes de la région (O'Connell, 2020b).
- En 2019, la Ville de Grosse Pointe, au Michigan, a dépensé plus de 100 000 \$ US pour régler les problèmes associés aux niveaux d'eau élevés du lac Sainte-Claire (Gray, 2020). Un autre montant de 50 000 \$ US est nécessaire pour réparer une décharge d'eaux pluviales érodée dans le lac, et un projet de reconstruction d'une digue endommagée par des niveaux d'eau élevés devrait coûter jusqu'à 12 millions de dollars US.
- En 2020, neuf collectivités du Michigan adjacentes au lac Michigan prévoient que des projets d'une valeur de 30 millions de dollars américains seront nécessaires pour contrer l'érosion causée par les niveaux d'eau élevés (Gray, 2020).

3.4 Répercussions sur les industries et les moyens de subsistance

Les industries et les gens qui dépendent des Grands Lacs peuvent également être touchés par les conditions climatiques changeantes dans le bassin des Grands Lacs. Il s'agit notamment des répercussions sur le transport maritime, la production hydroélectrique, la pêche commerciale, récréative et de subsistance, l'agriculture, le tourisme et les loisirs (Hartmann, 1990; Wuebbles et coll., 2019).

Les Grands Lacs et la Voie maritime du Saint-Laurent sont un important réseau de transport et l'une des zones de navigation les plus achalandées au monde. Les niveaux d'eau bas et élevés peuvent avoir une incidence sur le transport maritime. Les bas niveaux d'eau peuvent entraîner des conditions dangereuses pour le transport maritime et la navigation, en particulier dans les parties moins profondes des chenaux et des ports des Grands Lacs. Il faudra probablement plus de déplacements pour transporter la même quantité de marchandises, ce qui augmentera les coûts d'expédition et le trafic. Le dragage des ports et des chenaux pourrait également être nécessaire, ce qui coûte déjà environ 20 millions de dollars US par an (Bartolai et coll., 2015). Les niveaux d'eau élevés peuvent produire de l'eau se déplaçant plus rapidement dans des parties de la Voie maritime qui présentent également des conditions dangereuses pour la navigation (Comité de gestion adaptative des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent [Comité GAGL], 2018). Cela s'est produit dans le lac Ontario au cours des niveaux d'eau élevés de 2017, où des débits sortants record allant jusqu'à 10 400 m³/s (ou 367 272 pi³/s) ont été observés. Toute incidence sur l'industrie du transport maritime aura des répercussions directes sur d'autres industries qui dépendent du transport dans les Grands Lacs (p. ex., le fer, l'acier et les céréales; Hartmann, 1990).

Les eaux des lacs sont largement utilisées pour la production d'hydroélectricité. En Ontario, les Grands Lacs contribuent à produire 80 % de l'électricité de la province (ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2016). Dans le Midwest américain, la plupart des infrastructures de production d'énergie sont situées le long des voies navigables (Wuebbles et coll., 2019). Les Grands Lacs fournissent de l'eau pour la production hydroélectrique ainsi que l'eau nécessaire pour refroidir les centrales électriques. Avec des niveaux d'eau extrêmement bas plus fréquents et des températures de l'eau plus élevées,



Un navire de charge entrant dans le canal Welland du lac Ontario, St Catharines, l'Ontario, Canada

moins d'eau est disponible pour la production hydroélectrique et les niveaux d'eau pourraient descendre plus fréquemment sous les niveaux des prises d'eau. L'augmentation de la température de l'eau réduit également leur efficacité pour le refroidissement des centrales électriques. Comme l'infrastructure énergétique actuelle a été conçue et construite en fonction des niveaux d'eau et des régimes de température historiques, les changements climatiques pourraient potentiellement interrompre ou diminuer la production d'électricité régionale.

La pêche commerciale, récréative et de subsistance peut être touchée par les effets des changements climatiques sur les espèces et les populations de poissons, comme la perte d'habitat d'eau froide et d'eau fraîche, l'augmentation des proliférations d'algues et des zones mortes, la perte d'habitat sûr de reproduction et de fraie et l'augmentation du nombre d'espèces envahissantes. Pour certains, la perte de possibilités de pêcher des espèces de poissons d'eau froide peut être compensée par une augmentation des possibilités de pêcher des espèces d'eau chaude (Alofs et coll., 2014, 2015; Dove-Thompson

et coll., 2011). Toutefois, pour de nombreux peuples autochtones, le déclin de certaines espèces de poissons peut avoir une incidence sur leurs moyens de subsistance et leur mode de vie, ainsi que sur leurs connaissances traditionnelles, leur alimentation et leur culture (Wuebbles et coll., 2019; Briscoe, 2020b). Par exemple, les communautés de pêcheurs de la Première Nation de Saugeen et des Chippewas de Nawash constatent que les vents plus forts, la perte de la couverture de glace et les températures plus chaudes ont une incidence sur les populations de grands corégonides du lac Huron et de la baie Georgienne, dont bon nombre de collectivités dépendent pour leur subsistance (Johnson, 2019).

Les changements climatiques peuvent avoir des répercussions positives et négatives sur l'agriculture, qui représente un tiers de l'utilisation des terres du bassin (Wuebbles et coll., 2019). Une saison de croissance plus longue serait bénéfique pour l'agriculture. Toutefois, ces avantages peuvent être compensés par des phénomènes météorologiques plus extrêmes, des précipitations plus variables et une augmentation des ravageurs et des maladies. Par exemple, l'aire de répartition de la chrysome du haricot, un ravageur du soja, semble déjà se déplacer vers le nord (Kling et coll., 2003). De plus, une évapotranspiration accrue pendant la saison de croissance peut réduire l'eau stockée dans le paysage, accroître les déficits d'humidité du sol à l'automne, ainsi que la demande d'irrigation (Wuebbles et coll., 2019).

Les changements climatiques peuvent également avoir des répercussions positives et négatives sur le tourisme et les loisirs. Par exemple, des niveaux d'eau extrêmement élevés et bas plus fréquents peuvent limiter les activités récréatives comme la navigation de plaisance et le canot. Des hivers plus chauds et des conditions de neige et de glace moindres en moyenne entraîneront moins de possibilités de loisirs hivernaux, y compris le ski, la motoneige, la raquette et la pêche sur glace. Bien que les possibilités de loisirs par temps chaud puissent augmenter, la perte des loisirs traditionnels par temps froid est une perte de mode de vie et de culture pour beaucoup. Les collectivités qui dépendent des loisirs d'hiver et du tourisme connexe seront probablement grandement touchées. Les répercussions sur les attractions naturelles telles que les plages, les grottes de glace et les parcs peuvent avoir une incidence supplémentaire sur le tourisme (Dawson et Scott, 2010; Briscoe, 2020a).

3.5 Répercussions sur les écosystèmes et la biodiversité

Les changements climatiques peuvent avoir des répercussions sur les plantes et les animaux du bassin des Grands Lacs, notamment sur l'abondance, la répartition, la composition génétique, le comportement et la survie des espèces. Les tendances saisonnières changeantes peuvent perturber la reproduction, la fraie et d'autres comportements. Par exemple, dans le lac Érié, une plus grande variabilité du réchauffement printanier a été associée à une plus grande variabilité chez les espèces reproductrices printanières comme le doré jaune (Wuebbles et coll., 2019). Les changements d'une espèce peuvent avoir une incidence sur une autre par le biais des interactions et des dépendances entre les espèces (p. ex., relations prédateur-proie; Dove-Thompson et coll., 2011).

En raison des changements climatiques, les aires de répartition de l'habitat continueront probablement de s'étendre pour certaines espèces végétales et animales à mesure que le réchauffement se poursuivra, tandis que d'autres rétréciront ou se déplaceront vers le nord. Par exemple, l'achigan à petite bouche a toujours été limité dans sa répartition vers le nord en raison des températures plus froides (Alofs et coll., 2014, 2015). Toutefois, en raison des températures plus chaudes de l'eau et d'une saison libre de glace plus longue, les populations d'achigans à petite bouche se sont multipliées. En tant que prédateurs voraces, l'agrandissement de leur aire de répartition aurait entraîné la réduction de plus de 25 000 populations de ventres rouges du Nord, de ventres citrons, de têtes-de-boule et de muets perlés dans l'ensemble des lacs de l'Ontario. En raison du réchauffement des eaux de surface et de la réduction de la couverture de glace, les milieux en eau peu profonde de bon nombre des Grands Lacs se prêtent mieux aux espèces envahissantes (p. ex., carpe, gobie à taches noires, moule quagga et moule zébrée; Taylor et coll., 2006).

La répartition des forêts changera également probablement, car les températures plus élevées entraîneront le rétrécissement des forêts boréales et le déplacement vers le nord de nombreuses espèces d'arbres (p. ex., bouleau, tremble, sapin baumier et épinette noire), qui seront probablement

remplacés par des espèces plus méridionales (Great Lakes Integrated Sciences and Assessments [GLISA], 2014). À l'heure actuelle, le couvert forestier représente environ 60 % de la couverture terrestre dans le bassin et constitue une partie importante de l'écosystème des Grands Lacs (Bartolai et coll., 2015). À mesure que les températures se réchauffent et que la répartition des forêts change, les ravageurs et les maladies (p. ex., la spongieuse) devraient également augmenter, ce qui constitue une menace supplémentaire pour la santé des arbres et des forêts dans tout le bassin (Kling et coll., 2003).

Les changements climatiques représentent également une menace pour les milieux humides côtiers, qui fournissent un habitat essentiel à une grande variété de plantes et d'animaux (Mortsch, 1998; Wuebbles et coll., 2019). Plus de la moitié des espèces de poissons des Grands Lacs utilisent des milieux humides comme habitat de fraie et d'alevinage. On a également signalé que 30 espèces de sauvagine, 155 espèces d'oiseaux nicheurs et 55 espèces de reptiles et d'amphibiens sont soutenues par des milieux humides côtiers dans le bassin. Les milieux humides côtiers sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques et aux niveaux d'eau. Par exemple, les milieux humides riverains ouverts sont vulnérables aux niveaux d'eau élevés et aux ondes de tempête qui entraînent l'érosion des flèches et des bancs de sable protecteurs dans les milieux humides protégés par des barrières, et la perte de l'habitat des milieux humides. Les bas niveaux d'eau peuvent entraîner le rétrécissement des milieux humides et réduire la connectivité hydraulique. Les milieux humides côtiers sont également touchés par l'érosion côtière. Par exemple, il a été signalé que plus de 160 hectares de milieux humides côtiers ont disparu dans la baie Rondeau à Chatham-Kent, en Ontario, en raison de l'érosion du cordon littoral (Zuzek, 2020). À l'heure actuelle, ECCC entreprend une étude pour évaluer la vulnérabilité des milieux humides côtiers et améliorer leur résilience par l'adaptation. L'évaluation de la vulnérabilité permettra de mieux comprendre les répercussions climatiques sur les milieux humides côtiers et de recommander des stratégies et des mesures d'adaptation pour améliorer la résilience de ces milieux. Ces résultats et recommandations seront rendus publics lorsque l'étude sera terminée en 2022.

4.0 Regard sur l'avenir

Si les changements climatiques se poursuivent au rythme actuel, nos enfants et petits-enfants connaîtront des Grands Lacs très différents des nôtres.

D'ici la fin du siècle, le climat, les niveaux d'eau et la couverture de glace des Grands Lacs devraient changer considérablement

Les **températures de l'air au-dessus des terres** devraient augmenter considérablement dans le bassin par rapport à 1961-2000. Les plus fortes augmentations de température sont prévues pour les saisons d'automne et d'hiver. Les changements des températures moyennes de l'air au-dessus des terres devraient entraîner des hivers plus chauds, une chaleur extrême plus intense, une saison de croissance plus longue, des précipitations plus abondantes et une couverture de glace moindre. Les plus fortes augmentations des températures de l'air au-dessus des terres sont prévues pour les lacs Supérieur et Michigan-Huron.

Les **précipitations au-dessus des** lacs devraient augmenter en toutes saisons et au cours de l'année selon les deux scénarios climatiques pour tous les lacs, bien que l'augmentation soit généralement moindre en été. Les variations saisonnières des précipitations au-dessus des lacs devraient varier selon le scénario de lac et de climat. Avec des hivers plus chauds, les chutes de neige devraient diminuer en moyenne, avec plus de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige. Les plus fortes augmentations des précipitations au-dessus des lacs sont prévues pour les lacs Supérieur et Ontario.

On s'attend à ce que les **niveaux des lacs** augmentent en variabilité à mesure que le climat change, et à ce que des valeurs plus élevées et plus basses deviennent possibles avec des changements plus importants des températures moyennes mondiales. Les projections du niveau des lacs indiquent des écarts importants par rapport aux moyennes à long terme propres à chaque lac (1918-2019) dans l'ensemble du bassin, avec une

légère tendance à la hausse pour tous les lacs apparente dans la deuxième moitié du siècle. Le lac Michigan-Huron devrait connaître la plus grande variation du niveau des lacs et a toujours été le plus variable parmi les Grands Lacs (Wuebbles et coll., 2019). Les lacs Érié, Sainte-Claire et Ontario devraient également connaître des variations importantes du niveau des lacs.

La **couverture de glace** devrait diminuer dans tous les lacs, surtout en février et en mars, selon le scénario de fortes émissions. À l'avenir, il pourrait y avoir plus d'années avec peu ou pas de couverture de glace et des saisons de glace plus courtes en hiver et au printemps. La couverture de glace moyenne sur les lacs Supérieur et Érié affiche les plus fortes baisses prévues, suivies du lac Huron. La croissance de la glace peut également atteindre un sommet plus tôt pour les lacs plus profonds comme les lacs Supérieur et Huron.

Les changements du système climatique dans le bassin des Grands Lacs peuvent avoir de vastes répercussions environnementales, sociales et économiques. Ces effets sont cumulatifs, composés et interactifs, ce qui peut entraîner des conséquences encore plus graves. D'après les projections et les répercussions climatiques décrites aux sections 2.0 et 3.0, voici les principaux risques liés aux changements climatiques cernés pour le bassin des Grands Lacs qui pourraient être pris en considération par les gestionnaires des ressources pour aider à réduire les répercussions négatives des changements climatiques et à renforcer la résilience aux changements climatiques. Les voici :

- niveaux d'eau extrêmement élevés et bas plus fréquents;
- augmentation des inondations et de l'érosion;
- précipitations plus variables et plus intenses;
- augmentation du ruissellement causé par les tempêtes qui transporte des éléments nutritifs et des contaminants dans les lacs;
- augmentation des débordements des égouts unitaires;
- augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes;

- augmentation des proliférations d'algues toxiques et non toxiques, des conditions de faible teneur en oxygène et des zones mortes;
- stress accru sur les infrastructures d'eau potable;
- augmentation des conditions de glace dangereuses pour les déplacements et les loisirs;
- augmentation de la remise en suspension des sédiments contaminés qui peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire aquatique;
- augmentation des espèces envahissantes, des ravageurs et des maladies;
- possibilité de réduction ou d'interruption du transport maritime et de la production d'hydroélectricité;
- perte d'habitat d'espèces de poissons en eau froide ou tempérée;
- perte d'habitat faunique (p. ex., reproduction, fraie et alevinage), y compris les habitats essentiels comme les milieux humides côtiers;
- perte du mode de vie traditionnel autochtone;
- perte du sentiment d'appartenance et d'identité;
- perte de moyens de subsistance et facteurs économiques locaux.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais vise plutôt à souligner les risques importants qui pourraient servir de point de départ à la prise de décisions éclairées en matière de planification de l'adaptation.

Références

Allan, J. D., McIntyre, P. B., Smith, S. D. P., Halpern, B. S., Boyer, G. L., Buchsbaum, A., Burton, G. A., Campbell, L. M., Chadderton, W. L., Ciborowski, J. J. H., Doran, P. J., Eder, T., Infante, D. M., Johnson, L. B., Joseph, C. A., Marino, A. L., Prusevich, A., Read, J. G., Rose, J. B., ... Steinman, A. D. (2013). Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 372-377. <https://doi.org/10.1073/pnas.1213841110>

Alofs, K. M., & Jackson, D. A. (2015). The abiotic and biotic factors limiting establishment of predatory fishes at their expanding northern range boundaries in Ontario, Canada. *Global Change Biology*, 21(6), 2227-2237. <https://doi.org/10.1111/gcb.12853>

Alofs, K. M., Jackson, D. A., & Lester, N. P. (2014). Ontario freshwater fishes demonstrate differing range-boundary shifts in a warming climate. *Diversity and Distributions*, 20(2), 123-136. <https://doi.org/10.1111/ddi.12130>

Angel, J. R., Swanson, C., Boustead, B. M., Conlon, K., Hall, K. R., Jorns, J. L., Kunkel, K. E., Lemos, M. C., Lofgren, B. M., Ontl, T., Posey, J., Stone, K., Takle, E., & Todey, D. (2018). Chapter 21: Midwest. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II. U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA4.2018.CH21>

Austin, J. A., & Colman, S. M. (2007). Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06604. <https://doi.org/10.1029/2006GL029021>

Bartolai, A. M., He, L., Hurst, A. E., Mortsch, L., Paehlke, R., & Scavia, D. (2015). Climate change as a driver of change in the Great Lakes St. Lawrence River Basin. *Journal of Great Lakes Research*, 41, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.11.012>

Baxter, M. (2019, July 22). How to save Lake Erie's disappearing shorelines. TVO. <https://www.tvo.org/article/how-to-save-lake-erries-disappearing-shorelines>

Briscoe, T. (2019a, November 14). Cleveland Residents Are Used to Their Water Being Brown, Even if They Don't Know Why. The Answer Lies at the Bottom of Lake Erie. *The Chicago Tribune*. <https://pulitzercenter.org/reporting/cleveland-residents-are-used-their-water-being-brown-even-if-they-dont-know-why-answer>

Briscoe, T. (2019b, November 14). In the Great Lakes' Most Productive Fishing Grounds, Algae-Fueled Dead Zones Are Eroding Livelihoods. *The Chicago Tribune*. <https://pulitzercenter.org/reporting/great-lakes-most-productive-fishing-grounds-algae-fueled-dead-zones-are-eroding>

Briscoe, T. (2019c, November 14). The Shallowest Great Lake Provides Drinking Water for More People Than Any Other. Algae Blooms Are Making It Toxic-And It's Getting Worse. *The Chicago Tribune*. <https://pulitzercenter.org/reporting/shallowest-great-lake-provides-drinking-water-more-people-any-other-algae-blooms-are>

Briscoe, T. (2020a, March 19). Ice Shapes Economy, Identity of Lake Superior's Coastal Towns. But It's Disappearing: 'Culture Is Defined by How the World Around Us Looks - and Now That's Changing.' *The Chicago Tribune*. <https://pulitzercenter.org/reporting/ice-shapes-economy-identity-lake-superiors-coastal-towns-its-disappearing-culture-defined>

Briscoe, T. (2020b, January 13). On the largest freshwater island in the world, Lake Huron's Native Americans warn of the fragility of water. *Chicagotribune.Com*. <https://www.chicagotribune.com/news/environment/great-lakes/ct-lake-huron-climate-change-native-americans-20200113-tf4vprfjmbgwhepnkh52gssihe-story.html>

Brown, L. C. et Duguay, C. R. (2010). The response and role of ice cover in lake-climate interactions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 34(5), 671-704. <https://doi.org/10.1177/0309133310375653>

Cherkauer, K. A., & Sinha, T. (2010). Hydrologic impacts of projected future climate change in the Lake Michigan region. *Journal of Great Lakes Research*, 36, 33-50. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2009.11.012>

Chung, E. (2015, December 17). Climate change is really heating up the world's lakes, especially Canada's. CBC. <https://www.cbc.ca/news/technology/warming-lakes-1.3369700>

Coordinating Committee on Great Lakes Basic Hydraulic and Hydrologic Data. (1992). IGLD 1985 Brochure on the International Great Lakes Datum 1985. <https://www.in.gov/dnr/water/files/11WhatIsIGLD1985.pdf>

Dawson, J., & Scott, D. (2010). Climate Change and Tourism in the Great Lakes Region: A Summary of Risks and Opportunities. *Tourism in Marine Environments*, 6(2), 119-132. <https://doi.org/10.3727/154427310X12682653195087>

Desjardins, J. (2017, August 20). If the Great Lakes region were a country, it would have the third largest economy in the world. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/great-lakes-region-economy-infographic-2017-8>

Dove-Thompson, D., Lewis, C., Gray, P. A., Chu, C., & Dunlop, W. I. (2011). A Summary of the Effects of Climate Change on Ontario's Aquatic Ecosystems (p. 68). Ontario Ministry of Natural Resources.

Eng, M. (2019, September 16). Climate Change Is Already Impacting Lake Michigan-Here's How. NPR. <https://www.npr.org/local/309/2019/09/16/760909053/climate-change-is-already-impacting-lake-michigan-here-s-how>

Filippelli, G., & Ortiz, J. D. (2020, April 29). Climate change threatens drinking water quality across the Great Lakes. *The Conversation*. <https://www.greatlakesnow.org/2020/04/rust-resilience-climate-change-drinking-water-quality/>

Gagnon, J. E., Hartig, J., Drouillard, K. G., Siu, M., & McKay, R. M. L. (2019, December 22). Great Lakes waters at risk from buried contaminants and new threats. *The Conversation*. <http://theconversation.com/great-lakes-waters-at-risk-from-buried-contaminants-and-new-threats-128992>

Gouvernement du Canada. (2018). Scénarios et modèles climatiques. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changes-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/scenarios-modeles.html>

Gouvernement du Canada. (2019a). Rapport sur le climat changeant du Canada. [Bush, E. et Lemmen, D.S., (eds.)

Gouvernement du Canada. (2019b). Types de fluctuation du niveau des lacs. Pêches et Océans Canada. <https://waterlevels.gc.ca/C&A/fluctuations-fra.html>

Gouvernement du Canada. (2019c). Références verticales et niveaux d'eau. Pêches et Océans Canada. <http://www.waterlevels.gc.ca/C&A/datums-fra.html>

Gray, K. (2020, February 6). Whitmer budget puts focus on Great Lakes water levels, contaminated sites. *Detroit Free Press*. <https://www.freep.com/story/news/politics/2020/02/06/whitmer-great-lakes-erosion-budget/4680936002/>

Comité de gestion adaptative des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent (GAGL). (2018). Résumé des répercussions du niveau d'eau et des conditions observées dans le bassin des Grands Lacs en 2017 à l'appui de l'évaluation continue du plan de régularisation. *Conseils des Grands Lacs et à la Commission mixte internationale*. https://www.ijc.org/sites/default/files/2018-11/GLAM_2017_MainReport_FINAL-20181129_FR.pdf

Great Lakes Commission. (2021). About the Lakes. Great Lakes Commission. <https://www.glc.org/lakes/>

Great Lakes Integrated Sciences and Assessments. (2014). Synthesis of the Third National Climate Assessment for the Great Lakes Region. Graham Sustainability Institute's Climate Center, University of Michigan.

Gronewold, A. D., & Stow, C. A. (2014). Unprecedented Seasonal Water Level Dynamics on One of the Earth's Largest Lakes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(1), 15-17. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00194.1>

Gronewold, A. D., Fortin, V., Caldwell, R., & Noel, J. (2018). Resolving Hydro-meteorological Data Discontinuities along an International Border. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5), 899-910. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0060.1>

Gunther, T. (2011). Lake Turnover. <https://www.nationalgeographic.org/media/lake-turnover/>

Hartig, J. H., Francoeur, S. N., Ciborowski, J. J. H., Gannon, J. E., Sanders, C. E., Galvao-Ferreira, P., Knauss, C. R., Gell, G., & Berk, K. (2020). Checkup: Assessing Ecosystem Health of the Detroit River and Western Lake Erie (Occasional Publication No. 11; p. 516). Great Lakes Institute for Environmental Research, University of Windsor.

Hartmann, H. C. (1990). Climate change impacts on Laurentian Great Lakes levels. *Climatic Change*, 17(1), 49-67. <https://doi.org/10.1007/BF00149000>

Hayhoe, K., D.J. Wuebbles, D.R. Easterling, D.W. Fahey, S. Doherty, J. Kossin, W. Sweet, R. Vose, and M. Wehner. (2018). Our Changing Climate. In *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II* [Reidmiller, D.R., C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 72-144. doi: 10.7930/NCA4.2018.CH2

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2018). Résumé à l'intention des décideurs. Réchauffement planétaire de 1,5°C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement

planétaire de 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 32 p.]

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021) Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.

Commission mixte internationale. (2019). Répercussions de la crue extrême des Grands Lacs de 2019 sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent. Commission mixte internationale. <https://ijc.org/fr/repercussions-de-la-crue-extreme-des-grands-lacs-de-2019-sur-le-lac-ontario-et-le-fleuve-saint>

Commission mixte internationale. (2020). Niveaux d'eau. Commission mixte internationale. <https://ijc.org/fr/quoi/niveaux-eau>

Johnson, R. (2019, January 20). Saugeen Ojibway Nation confronts effects of climate change on whitefish fishery. CBC. <https://www.cbc.ca/news/indigenous/saugeen-ojibway-whitefish-fishery-climate-change-1.4982666>

Kling, G. W., Hayhoe, K., Johnson, L. B., Magnuson, J. J., Polasky, S., Robinson, S. K., Shuter, B. J., Wander, M. M., Wuebbles, D. J., & Zak, D. R. (2003). Confronting Climate Change in the Great Lakes | Union of Concerned Scientists. The Union of Concerned Scientists and The Ecological Society of America. <https://www.ucsusa.org/resources/confronting-climate-change-great-lakes>

Lofgren, B. M., Quinn, F. H., Clites, A. H., Assel, R. A., Eberhardt, A. J., & Luukkonen, C. L. (2002). Evaluation of Potential Impacts on Great Lakes Water Resources Based on Climate Scenarios of Two GCMs. *Journal of Great Lakes Research*, 28(4), 537–554. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(02\)70604-7](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(02)70604-7)

Lupton, A. (2019, December 31). “We had no choice”: Goderich moves to protect water treatment plant from rising lake levels. CBC. <https://www.cbc.ca/news/canada/london/we-had-no-choice-goderich-moves-to-protect-water-treatment-plant-from-rising-lake-levels-1.5410851>

McNeil, D. (2019). Examen Indépendant Des Inondations de 2019 en Ontario. Rapport au gouvernement du conseiller spécial de l’Ontario en matière d’inondation. <https://files.ontario.ca/mnrf-french-ontario-special-advisor-on-flooding-report-2019-11-25.pdf>

Michalak, A. M., Anderson, E. J., Beletsky, D., Boland, S., Bosch, N. S., Bridgeman, T. B., Chaffin, J. D., Cho, K., Confesor, R., Daloglu, I., DePinto, J. V., Evans, M. A., Fahnenstiel, G. L., He, L., Ho, J. C., Jenkins, L., Johengen, T. H., Kuo, K. C., LaPorte, E., ... Zagorski, M. A. (2013). Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(16), 6448–6452. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216006110>

Michigan Sea Grant. (2021). Physical Characteristics of the Great Lakes. <https://www.michiganseagrant.org/lessons/lessons/by-broad-concept/earth-science/data-sets/physical-characteristics-of-the-great-lakes/>

Mortsch, L. D. (1998). Assessing the Impact of Climate Change on the Great Lakes Shoreline Wetlands. *Climatic Change*, 40(2), 391–416. <https://doi.org/10.1023/A:1005445709728>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2018). Great Lakes ice cover decreasing over last 40 years. Climate.Gov. <https://www.climate.gov/news-features/featured-images/great-lakes-ice-cover-decreasing-overlast-40-years>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021a). Great Lakes Water Levels. NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory. <https://www.glerl.noaa.gov/data/wlevels/>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021b). Ice Cover. NOAA - Great Lakes Environmental Research Laboratory. <https://www.glerl.noaa.gov/data/ice/>

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021c). Predicting Currents in the Straits of Mackinac. NOAA - Great Lakes Environmental Research Laboratory. <https://www.glerl.noaa.gov/res/straits/>

Notaro, M., Bennington, V., & Vavrus, S. (2015). Dynamically Downscaled Projections of Lake-Effect Snow in the Great Lakes Basin. *Journal of Climate*, 28(4), 1661–1684. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00467.1>

Notaro, M., Schummer, M., Zhong, Y., Vavrus, S., Elsen, L. V. D., Coluccy, J., & Hoving, C. (2016). Projected Influences of Changes in Weather Severity on Autumn-Winter Distributions of Dabbling Ducks in the Mississippi and Atlantic Flyways during the Twenty-First Century. *PLOS ONE*, 11(12), e0167506. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167506>

O’Connell, P. M. (2020a, September 1). Big problems for smallest Great Lake: More precipitation, warmer temperatures and controversial regulation plan upend life along Lake Ontario. *The Chicago Tribune*. <https://www.chicagotribune.com/news/environment/great-lakes/ct-great-lakes-climate-change-lake-ontario-20200901-qn66ky-px5rhenkhw2lausrxie-htmlstory.html>

O’Connell, P. M. (2020b, November 20). The Battle for Lake Michigan: As Beaches Erode, Millions of Dollars Have Been Poured Into Temporary Solutions. Can Anyone Find a Long-Term Fix? *The Chicago Tribune*. <https://pulitzercenter.org/reporting/battle-lake-michigan-beaches-erode-millions-dollars-have-been-poured-temporary-solutions>

Ministère de l’Environnement de l’Ontario. (2016). Stratégie ontarienne pour les Grands Lacs. Ministère de l’Environnement de l’Ontario. <https://www.ontario.ca/fr/page/strategie-ontarienne-pour-les-grands-lacs>

Ministère de l’Environnement de l’Ontario. (2020). Rapport annuel 2020 du ministre sur l’eau potable. Ministère de l’Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs de l’Ontario. <https://www.ontario.ca/fr/page/rapport-annuel-2020-du-minis-tre-sur-leau-potable>

O’Reilly, C. M., Sharma, S., Gray, D. K., Hampton, S. E., Read, J. S., Rowley, R. J., Schneider, P., Lenters, J. D., McIntyre, P. B., Kraemer, B. M., Weyhenmeyer, G. A., Straile, D., Dong, B., Adrian, R., Allan, M. G., Anneville, O., Arvola, L., Austin, J., Bailey, J. L., ... Zhang, G. (2015). Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, 42(24). <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>

Patz, J. A., Vavrus, S. J., Uejio, C. K., & McLellan, S. L. (2008). Climate Change and Waterborne Disease Risk in the Great Lakes Region of the U.S. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.026>

Quinn, F. H. (2002). Secular Changes in Great Lakes Water Level Seasonal Cycles. *Journal of Great Lakes Research*, 28(3), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(02\)70597-2](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(02)70597-2)

Seglenieks, F. & Temgoua, A.G. 2021. Future hydroclimate variables and lake levels for the Great Lakes using data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (In review).

Sharma, A., Hamlet, A. F., Fernando, H. J. S., Catlett, C. E., Horton, D. E., Kotamarthi, V. R., Kristovich, D. A. R., Packman, A. I., Tank, J. L., & Wuebbles, D. J. (2018). The Need for an Integrated Land-Lake-Atmosphere Modeling System, Exemplified by North America’s Great Lakes Region. *Earth’s Future*, 6(10), 1366–1379. <https://doi.org/10.1029/2018EF000870>

Taylor, M. E., Gray, P. A., & Schiefer, K. (2006). Helping Canadians Adapt to Climate Change in the Great Lakes Coastal Zone. 13(1), 12.

The Earth Observatory. (2021). 2020 Tied for Warmest Year on Record. NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>

United States Army Corps of Engineers. (2021). Current Regulated Outflows. Detroit District Website. <https://www.lre.usace.army.mil/Missions/Great-Lakes-Information/Outflows/Current-Regulated-Outflows/>

United States Environmental Protection Agency. (2018). U.S. Action Plan for Lake Erie 2018–2023: Commitments and strategy for phosphorus reduction (p. 119). United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/us_dap_final_march_1.pdf

US Environmental Protection Agency. (2021a). Climate Change Indicators: Great Lakes Ice Cover. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-great-lakes-ice-cover>

US Environmental Protection Agency. (2021b). Great Lakes Ice Cover. US Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/great-lakes-ice_td.pdf

Vertical Control – Water Levels Subcommittee. (2017). Updating the International Great Lakes Datum (IGLD) Executive Summary. Coordinating Committee on Great Lakes Basic Hydraulic and Hydrologic Data. http://www.greatlakescc.org/wp36/wp-content/uploads/2017/09/IGLD_Update_20170929_Exec_220dpi.pdf

Wang, J., Kessler, J., Hang, F., Hu, H., Clites, A. H., & Chu, P. (2018). Great Lakes Ice Climatology Update of Winters 2012–2017: Seasonal Cycle, Interannual Variability, Decadal Variability, and Trend for the period 1973–2017 (NOAA Technical Memorandum GLERL-170). National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.glerl.noaa.gov/pubs/tech-reports/glerl-170/tm-170.pdf>

Wuebbles, D., Cardinale, B., Cherkauer, K., Davidson-Arnott, R., Hellmann, J., Infante, D., Johnson, L., & de Loë, R. (2019). An Assessment of the Impacts of Climate Change on the Great Lakes by Scientists and Experts from Universities and Institutions in the Great Lakes Region. Environmental Law & Policy Center. <https://elpc.org/resources/the-impacts-of-climate-change-on-the-great-lakes/>

Zhong, Y., Notaro, M., Vavrus, S. J., & Foster, M. J. (2016). Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: Physical drivers. *Limnology and Oceanography*, 61(5), 1762–1786. <https://doi.org/10.1002/lno.10331>

Zhong, Y., Notaro, M., & Vavrus, S. J. (2019). Spatially variable warming of the Laurentian Great Lakes: An interaction of bathymetry and climate. *Climate Dynamics*, 52(9), 5833–5848. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4481-z>

Zuzek, P. J. (2020). Chatham-Kent Lake Erie Shoreline Study. https://portal.chatham-kent.ca/downloads/es/CKLakeErieSS_HR.pdf



Une falaise rocheuse surplombant le lac Supérieur

Annexe A : Description détaillée de la méthode utilisée par Environnement et Changement climatique Canada pour élaborer les projections du climat et des niveaux d'eau

Comme l'indique l'encadré 1, la présente annexe fournit un résumé plus détaillé de la méthode utilisée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) pour élaborer les projections du climat et des niveaux d'eau incluses dans le présent rapport. L'information présentée dans ce résumé est fondée sur un rapport de Seglenieks et Temgoua (2021, en révision).

Les données climatiques modélisées utilisées par ECCC provenaient de la phase 5 du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5), qui étaient disponibles auprès de [NA-CORDEX](#), le volet nord-américain de l'Étude coordonnée sur le climat (International Coordinated Regional Downscaling Experiment) parrainée par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Ces ensembles de données sont fondés sur des simulations climatiques futures à échelle réduite de façon dynamique, fondées sur des modèles climatiques mondiaux (MCM).

La réduction d'échelle fait référence au processus consistant à dériver des données climatiques régionales de plus haute résolution à partir des MCM, qui divisent la Terre en grandes cellules de grille qui sont souvent plus grandes que 100 km sur 100 km. La réduction d'échelle dynamique est l'un des deux types de réduction d'échelle, qui produit ce qu'on appelle les modèles climatiques régionaux (MCR). Il s'agit d'exécuter un modèle à haute résolution sur une plus petite zone d'intérêt, plutôt que sur le globe entier,

afin de dériver des simulations sur une échelle de dizaines de kilomètres carrés. Étant donné que le climat de la zone d'intérêt est influencé par des processus à l'extérieur des limites de cette zone, les MCR se fient aux MCM pour simuler les conditions limites de la zone d'intérêt. Grâce à cette résolution plus élevée, les MCR offrent une meilleure représentation des Grands Lacs, ainsi que des processus physiques et de couplage supplémentaires qui sont essentiels pour représenter un climat régional, et la plupart sont capables de capter les processus des lacs, comme l'évaporation des lacs.

La réduction statistique est l'autre type de réduction d'échelle, qui repose sur une compréhension des relations historiques observées entre les variables climatiques locales (p. ex., les précipitations) et les variables à grande échelle (p. ex., la pression atmosphérique). Les équations mathématiques sont utilisées pour définir ces relations statistiques observées historiquement. Ces équations sont ensuite appliquées aux projections des MCM afin de dériver les projections climatiques locales.

NA-CORDEX était la seule source connue de données de MCR qui était accessible au public au début du projet d'évaluation de la vulnérabilité des milieux humides côtiers d'ECCC qui avait les variables et la résolution temporelle nécessaires pour calculer avec précision les niveaux d'eau. Sept MCR ont été inclus dans le projet NA-CORDEX, et chaque MCR a été piloté par un sous-ensemble des six MCM. Parmi ces MCR, ECCC a choisi ceux qui présentaient des précipitations au-dessus des lacs, la température du bassin et l'évaporation des lacs. Par conséquent, 13 combinaisons MCR-MCM ont été incluses dans l'étude d'ECCC (voir le tableau A-1). La plupart de ces MCR utilisent un modèle de lac unidimensionnel appelé FLake, qui aide à obtenir des simulations plus réalistes de la dynamique des lacs comparativement à l'absence de tout modèle de lac.

Tableau A-1 : Liste des combinaisons MCR-MCM et détails associés

NO.	MCR	MCM	SCÉNARIO	RÉSOLUTION*	MODÈLE DE LAC
1	CRCRM5	CanESM2	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	FLake
2	CRCRM5	CanESM2	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	FLake
3	CRCRM5	CNRM-CM5	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	FLake
4	CRCRM5	CNRM-CM5	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	FLake
5	CRCRM5	GFDL-ESM2M	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	FLake
6	CRCRM5	GFDL-ESM2M	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	FLake
7	CRCRM5	MPI-ESM-LR	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	FLake
8	CanRCM4	CanESM2	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	Aucun – prescrit par le modèle pilote
9	CanRCM4	CanESM2	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	Aucun – prescrit par le modèle pilote
10	RCA4	CanESM2	RCP 4.5	0.44° X 0.44°	FLake
11	RCA4	CanESM2	RCP 8.5	0.44° X 0.44°	FLake
12	RCA4	Earth_SMHI	RCP 4.5	0.44° X 0.44°	FLake
13	RCA4	Earth_SMHI	RCP 8.5	0.44° X 0.44°	Flake

*Remarque : 0,1° représente 11,1 km

Les projections du niveau des lacs ont été établies en fonction des facteurs suivants, y compris l'apport net au bassin (ANB) de chaque lac, l'apport d'eau du lac en amont et le débit sortant vers le lac en aval. L'ANB fait référence au volume net de l'approvisionnement local en eau entrant dans chaque lac. Une façon de calculer l'ANB consiste à prendre la somme des précipitations totales au-dessus du lac et du ruissellement dans le lac à partir de son bassin versant avoisinant, et à soustraire l'évaporation du lac (ou évaporation au-dessus du lac). Il s'agit du composant d'apport net au bassin. Chacun des trois éléments de l'ANB a été calculé séparément, puis combiné en un seul ANB pour chaque lac.

Les données sur les précipitations et l'évaporation au-dessus des lacs ont été tirées directement des ensembles de données disponibles de l'étude NA-CORDEX. Les précipitations au-dessus du lac désignent les précipitations qui tombent à la surface du lac. Entre-temps, l'évaporation au-dessus du lac désigne la quantité d'évaporation à la surface du lac.

L'utilisation d'un modèle hydrologique était nécessaire pour déterminer le ruissellement dans le lac à partir du bassin versant avoisinant. Le ruissellement dans le lac est la somme de l'eau qui s'écoule dans le lac à partir de tous les cours d'eau environnants, à l'exception de l'eau du lac en amont s'il y en a un. Bien que les MCR aient fourni des eaux de ruissellement de chaque cellule de grille du MCR, il n'y a pas de calcul direct du débit dans chaque lac. Par conséquent, ECCC a utilisé un modèle hydrologique appelé WATFLOOD pour calculer le ruissellement dans chaque lac, ce qui permet d'acheminer le débit de chaque cellule de la grille vers le réseau fluvial et vers chaque lac correspondant afin d'assurer le bon moment du ruissellement. Ce modèle a été utilisé avec succès dans les Grands Lacs pendant de nombreuses années, et il existe une méthode établie pour calculer le ruissellement dans chacun des Grands Lacs. Il utilise les données horaires sur la température et les précipitations comme données d'entrée pour calculer la séparation du ruissellement en ruissellement de surface, en infiltration et en débit de base. Les données sur la température et les précipitations qui ont été utilisées dans le modèle hydrologique étaient disponibles dans le cadre du projet NA-CORDEX.

Le modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs (Coordinated Great Lakes Regulation and Routing Model - CGLRRM) a été utilisé pour calculer les niveaux et le débit des voies interlacustres des lacs d'amont (du lac Supérieur au lac Érié). Le modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs utilise l'ANB pour chaque lac comme intrant et tient compte de la régulation des débits sortants du lac Supérieur dans le calcul du débit des voies interlacustres. Ce modèle a donné de bons résultats pour simuler les niveaux et les débits anciens des lacs lorsqu'il est exécuté avec l'ANB historique. Afin de calculer le débit des voies interlacustres, on formule dans le modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs des hypothèses sur la débitance de ces voies. Comme les effets des changements climatiques sur la débitance des voies interlacustres sont inconnus, on a supposé que les voies demeureraient stables et que les relations de la débitance seraient constantes dans toutes les simulations.

Pour le lac Ontario, un modèle de simulation de plan de régularisation distinct a été utilisé pour calculer le débit sortant du lac Ontario en fonction du plan de régularisation actuel — Plan 2014. Ce modèle a été élaboré par ECCC et tient compte du débit de la rivière des Outaouais et d'autres affluents qui coulent dans le fleuve Saint-Laurent en aval du lac Ontario.

Comme il a été mentionné à la section 2.3, certaines projections pour le lac Ontario selon deux modèles RCP 8.5 ont donné des valeurs extrêmement élevées en raison de la surévaluation possible de l'accumulation d'eau de tous les Grands Lacs se déversant dans le lac Ontario à l'avenir et ont donc été exclues de notre analyse. Ces valeurs extrêmes ont été exclues parce qu'il est impossible de prévoir les mesures qui pourraient être prises pour modifier les débits hors du réseau si des débits d'entrée extrêmement élevés devaient se produire dans le lac Ontario à l'avenir. Les valeurs exclues provenaient des deux combinaisons MCR-MCM suivantes :

1. MRCC5-GFDL-ESM2M (novembre 2060 jusqu'à la fin de 2095) — numéro 6 dans le tableau A-1
2. MRCC5-MPI-ESM-LR (décembre 2066 jusqu'à la fin de 2095) — numéro 7 dans le tableau A-1.

Il est important de se rappeler que les projections des paramètres climatiques et des niveaux des lacs sont fondées sur la compréhension actuelle du système climatique et les hypothèses formulées au sujet du comportement futur de la société, ce qui entraînera la quantité de carbone qui sera rejetée dans l'atmosphère. Il y a de nombreuses incertitudes et hypothèses inhérentes à ces projections et, par conséquent, les projections sont les plus utiles pour montrer les tendances générales de ce qui pourrait se produire à l'avenir.

Remarque sur la correction des biais

La correction des biais a été effectuée par ECCC pour les variables suivantes : précipitations au-dessus des lacs, évaporation au-dessus des lacs, ruissellement et ANB. La correction des biais fait référence au processus d'ajustement des données simulées pour améliorer l'ajustement par rapport aux données observées. Il est bien reconnu qu'il faut corriger les biais dans les études hydrologiques afin d'obtenir des résultats réalistes. Toutefois, il est important de noter que les données corrigées en fonction de biais ne sont pas conçues pour reproduire parfaitement les données de référence au cours de la période spécifiée, mais plutôt pour avoir les mêmes caractéristiques globales que les données de référence.

La correction des biais a été effectuée sur les prévisions des précipitations au-dessus du lac, de l'évaporation au-dessus du lac et du ruissellement parce que les MCR affichent habituellement un biais pour certaines variables et périodes. ECCC a utilisé une fonction de correction des biais multivariée et a choisi la période de 1961 à 2000 comme période historique de référence parce qu'elle saisit les conditions humides et sèches tout en ne chevauchant pas les périodes d'accélération utilisées dans les projections climatiques (c.-à-d. 2006-2095), ce qui pourrait fausser les comparaisons. Pour chaque ensemble de données distinct, le biais a été corrigé pour le climat actuel, puis la même correction a été appliquée pour le climat futur. Cela est fondé sur une pratique généralement acceptée selon laquelle le biais dans la simulation du climat actuel est présumé être le même dans la simulation du climat futur.

Une correction des biais a également été effectuée sur l'ANB futur. Pour ce faire, on a utilisé une autre méthode pour calculer l'ANB, connu sous le nom d'ANB résiduel. L'ANB résiduel est déterminé en fonction du changement de niveau d'eau et de la différence entre le débit entrant et le débit sortant. Comme ces niveaux et débits sont fondés sur des valeurs mesurées, ils présentent moins d'incertitude que les différentes composantes utilisées pour déterminer l'ANB (c.-à-d. les précipitations au-dessus du lac, le ruissellement dans le lac et l'évaporation au-dessus du lac). L'ANB résiduel

est donc généralement considéré comme ayant une incertitude plus faible que l'ANB, et bien que les deux méthodes calculent l'ANB différemment, leurs valeurs résultantes devraient être les mêmes. Par conséquent, l'ANB résiduel coordonné a été utilisé comme ensemble de données de référence pour corriger le biais de l'ANB futur qui a été calculé à partir des données de simulation.

Annexe B : Description détaillée de la méthode utilisée par le Nelson Institute Center for Climatic Research pour élaborer des projections de la couverture de glace

Tel qu'indiqué dans l'encadré 1, la présente annexe fournit un résumé plus détaillé de la méthode utilisée par le Nelson Institute Center for Climatic Research (CCR) pour élaborer les projections de la couverture de glace incluses dans le présent rapport. L'information présentée dans ce résumé est fondée sur des articles examinés par des pairs par Notaro et autres (2015; 2016).

Les données climatiques modélisées utilisées par le CCR proviennent également de la phase 5 du CMIP5. Les simulations de six MCM ont été réduites dynamiquement selon le RCP 8.5 à l'aide d'un MCR — RegCM4 (voir le tableau B-1). RegCM4 a une résolution (ou une « cellule de grille ») de 25 km sur 25 km et a été associé de façon interactive à un modèle de lac à bilan énergétique unidimensionnel et à un sous-modèle de glace de lac pour produire des projections de la couverture de glace (entre autres variables) qui saisissent la dynamique des Grands Lacs.

Tableau B-1 : List of RCM-GCM Combinations and Associated Details

NO.	RCM	GCM	SCENARIO	NOTES
1	RegCM4	ACCESS1-0	RCP 8.5	Années bissextilles comprises
2	RegCM4	CNRM-CM5	RCP 8.5	Années bissextilles comprises
3	RegCM4	GFDL-ESM2M	RCP 8.5	Ajusté pour intégrer les années bissextilles
4	RegCM4	IPSL-CM5-MR	RCP 8.5	Ajusté pour intégrer les années bissextilles
5	RegCM4	MIROC5	RCP 8.5	Ajusté pour intégrer les années bissextilles; Données manquantes pour 1989
6	RegCM4	MRI-CGCM3	RCP 8.5	Années bissextilles comprises

Le MCR produit l'épaisseur de la glace pour chaque cellule de la grille de lac. Lorsque l'épaisseur de la glace est de 2 cm ou plus, on a supposé que 100 % de la couverture de glace se trouvait dans cette cellule de grille. Autrement, elle était fixée à 0 %. Un pourcentage réduit de la couverture de glace quotidienne a été produit pendant trois périodes : 1980-1999, 2040-2059 et 2080-2099. Compte tenu du volume de données quotidiennes, les périodes ne couvrent que 20 années consécutives. Seules les données de décembre à mai ont été analysées dans le présent rapport, qui représente la saison des glaces typique dans les Grands Lacs.

Remarque sur la correction des biais

La correction des biais a été effectuée par l'Ontario Climate Consortium (OCC), car le MCR de lac utilisé dans le processus de réduction d'échelle tend à produire une couverture de glace excessive. Une méthode simple de variation delta a été utilisée en ajoutant la différence entre les données historiques observées et les données historiques modélisées aux données futures modélisées. Encore une fois, cela est fondé sur la pratique généralement acceptée selon laquelle le biais dans la simulation du climat actuel est présumé être le même dans la simulation du climat futur.

La méthode de variation delta a été appliquée à l'échelle mensuelle. Les moyennes mensuelles entre 1980 et 1999 ont été calculées pour les six simulations MCR-MCM et les données historiques observées obtenues de Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Le delta a été calculé en prenant la différence entre les données historiques observées et les données historiques modélisées pour chacune des six combinaisons MCR MCM. Ces deltas mensuels ont ensuite été ajoutés aux données mensuelles modélisées agrégées (à la fois historiques et futures). Lorsque le pourcentage de couverture de glace de lac était une valeur négative, on a supposé une couverture de glace de 0 %.

La durée de la saison des glaces entre décembre et mai a été calculée pour chaque année à l'aide des données quotidiennes sur la couverture de glace. La durée annuelle de la saison des glaces a ensuite été agrégée sur les trois périodes, couvrant 1981-1999, 2041-2049 et 2081-2099. Les années 1980, 2040 et 2080 n'ont pas été incluses parce que les données de décembre de l'année précédente n'étaient pas disponibles pour les données modélisées (c.-à-d. décembre 2039 et décembre 2079) ou n'étaient pas incluses pour les données observées à des fins de cohérence (c.-à-d. décembre 1979).

La même méthode de variation delta a été appliquée à la durée moyenne de la saison des glaces pour les deux périodes futures. Le delta a été calculé en prenant la différence entre la longueur moyenne historique observée de la saison des glaces et la longueur moyenne historique modélisée de la saison des glaces pour chacune des six combinaisons MCR-MCM. Les deltas ont ensuite été ajoutés à la durée moyenne future modélisée de la saison des glaces pour 2041-2049 et 2081-2099. Lorsque la durée moyenne de la saison des glaces était négative, on supposait 0 jour.



Des vagues du lac Huron à Kincardine, l'Ontario, Canada lors d'une journée d'automne ensoleillée