



PROJECTIONS FUTURES DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES ET DES NIVEAUX D'EAU POUR LE BASSIN DES GRANDS LACS

à l'aide des données de la cinquième
phase du projet d'intercomparaison
de modèles couplés



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

Canada

N° de cat. : CW66-778/1-2022F-PDF
ISBN : 978-0-660-43793-4
EC22022

À moins d'avis contraire, il est interdit de reproduire le contenu de cette publication, en totalité ou en partie, à des fins de diffusion commerciale sans avoir obtenu au préalable la permission écrite de l'administrateur du droit d'auteur d'Environnement et Changement climatique Canada. Si vous souhaitez obtenir du gouvernement du Canada les droits de reproduction du contenu à des fins commerciales, veuillez demander l'affranchissement du droit d'auteur de la Couronne en communiquant avec :

Environnement et Changement climatique Canada
Centre de renseignements à la population
12^e étage, édifice Fontaine
200, boulevard Sacré-Cœur
Gatineau (Québec) K1A 0H3
Téléphone : 819-938-3860
Ligne sans frais : 1-800-668-6767 (au Canada seulement)
Courriel : enviroinfo@ec.gc.ca

Photo page couverture : © GettyImages

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représentée par le ministre de l'Environnement et du Changement climatique, 2022

Also available in English

Citation recommandée: Environnement et Changement climatique Canada. 2022. Projections futures des variables hydroclimatiques et des niveaux d'eau pour le bassin des Grands Lacs à l'aide des données de la cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Seglenieks, F. et Temgoua, A. 89 p.

Les points clés :

- Les tendances générales historiquement observées dans le bassin des Grands Lacs en termes de variations hydroclimatiques se poursuivront dans les décennies à venir, notamment en ce qui concerne l'augmentation globale des précipitations et de l'évaporation à la surface des Grands Lacs.
- Les scénarios climatiques projettent une augmentation de la fluctuation des niveaux d'eau des Grands Lacs, laquelle se traduira par des extrêmes de niveaux d'eau à la fois hauts et bas.
- Les changements les plus extrêmes sont projetés pour les scénarios climatiques forcés avec les scénarios d'évolution des émissions les plus élevées, lesquels n'intègrent aucune mesure d'adaptation et d'atténuation mises en place à l'échelle mondiale.
- Plusieurs sources d'incertitudes doivent être considérées dans toute étude portant sur les changements climatiques, lesquelles touchent tant les hypothèses derrière les scénarios d'émission ou les modèles physiques, que celles plus spécifiques, qui tentent de prédire la réaction d'un bassin hydrographique à des scénarios climatiques extrêmes.

Résumé

Le présent rapport résume le travail effectué par les Services hydrologiques nationaux d'Environnement et Changement climatique Canada dans le cadre de l'Initiative de protection des Grands Lacs (IPGL), laquelle visait à évaluer et améliorer la résilience des milieux humides côtiers des Grands Lacs. Un élément essentiel de cette étude consistait à déterminer l'ampleur et la vitesse des changements climatiques auxquels pourraient être exposés les milieux humides d'ici la fin du siècle. L'un des principaux rôles des Services hydrologiques nationaux consistait à prévoir les niveaux d'eau futurs des Grands Lacs sur la base de simulations climatiques, niveaux d'eau destinés à informer un modèle intégré de réponse de l'écosystème des milieux humides. Bien que le but premier consistait à prédire les transformations de la végétation des milieux humides suite aux changements climatiques, cette étude détaille de façon large les changements projetés sur divers aspects du bassin hydrographique des Grands Lacs.

Les données utilisées dans cette étude proviennent du volet nord-américain de l'expérience régionale coordonnée de réduction d'échelle des prévisions climatologiques au niveau régional (*Coordinated Regional Downscaling Experiment* ou NA-CORDEX). Ces données sont produites par le biais de simulations climatiques qui utilisent une technique de réduction d'échelle dynamique, laquelle fait appel à des modèles de circulation régionale (ou MCR) pour régionaliser les sorties des modèles de circulation générale (ou MCG) qui composent la cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (ou CMPI5). Au total, 13 combinaisons de MCR-MCG ont été utilisées dans cette étude.

Afin de calculer les niveaux moyens projetés pour les différents lacs, les composantes de l'apport net au bassin (ou NBS; soit la précipitation et l'évaporation à la surface des lacs, ainsi que le ruissellement qui contribue au bassin) ont été extraites des MCRs. Dans un premier temps, le biais entre observations et projections a été corrigé pour chacune des variables utilisées dans le calcul de l'apport net au bassin, en employant la méthode dite des composantes. Dans un second temps, ces mêmes variables hydroclimatiques ont servi à calculer l'apport net au bassin, sans débiaisage, sur une base mensuelle, en utilisant la méthode résiduelle appliquée à chacun des lacs. Le biais a été corrigé a posteriori, en utilisant le résiduel du calcul de l'apport net au bassin. Les valeurs de NBS obtenues par le biais de ces deux méthodes, c.-à-d. la méthode des composantes et la méthode résiduelle, ont finalement été utilisées pour déterminer les niveaux futurs des Grands Lacs selon les différents scénarios climatiques.

Dans le courant des dernières décennies, une augmentation générale des précipitations et de l'évaporation à la surface des Grands Lacs a été observée. Selon les projections climatiques obtenues par le biais de cette étude, cette tendance pourrait se poursuivre dans les prochaines

décennies et se combiner à un élargissement de la plage de valeurs possibles. Des valeurs plus élevées ou plus basses qu'historiquement observées pourraient donc se présenter dans le futur.

Globalement, les conclusions de cette étude s'apparentent à celles formulées par les études antérieures en termes de niveau moyen, soit aucune projection précise quant au changement du niveau moyen, lequel pourrait être plus haut ou plus bas, mais une plus grande variabilité interannuelle des niveaux d'eau, ce qui pourrait entraîner des extrêmes de niveau plus élevés ou plus faibles dans le futur. Le scénario de carbone élevé, ou RCP 8.5 (le scénario d'émissions élevées), projette des valeurs plus extrêmes que le scénario de carbone faible, ou RCP 4.5 (le scénario d'émissions modérées), comme attendu.

Il importe de mentionner que les projections de niveaux d'eau obtenues sont largement influencées par les connaissances climatiques à la base des modèles globaux développés dans le cadre du cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, c.-à-d. CMIP5. De nombreuses incertitudes demeurent quant à la validité de ces simulations, particulièrement en termes de projection d'émission, comme les scénarios RCP sont des scénarios de forçage radiatif qui ne relèvent d'aucune hypothèse socioéconomique. Aussi, toute projection de croissance démographique, de consommation d'énergie par habitant, de technologies énergétiques émergentes, et d'initiatives mondiales d'atténuation n'est pas directement définie dans les RCPs. Ces scénarios n'offrent en fait que quelques trajectoires possibles d'émission, chacune englobant un ensemble de scénarios représentatifs de la littérature scientifique disponible et qui comprennent ou non des politiques climatiques de mitigation. Le RCP 8.5 représente à ce titre la limite haute des émissions projetées. Les projections produites servent donc à montrer les tendances générales attendues d'ici la fin du siècle et non prédire le climat.

Ce faisant, les projections de niveaux d'eau ne donnent pas l'estimation exacte des conditions pour une année donnée. Elles définissent plutôt la plage de valeurs possibles, plage à l'intérieur de laquelle la réalisation future a de fortes chances de se retrouver. L'augmentation projetée de cette plage de niveaux moyens des lacs dans un climat changeant demeure donc le message important de cette étude. Cette augmentation rend plus probable l'avènement de niveaux extrêmes dans le futur. La notion de probabilité est importante ici comme toutes ces conditions ne seront pas nécessairement observées dans les années à venir.

Comme mentionné précédemment, les projections des niveaux d'eau produites servent de données d'entrée pour un modèle intégré de réponse de l'écosystème des milieux humides. Ce modèle est utilisé pour déterminer l'impact des changements climatiques sur ces milieux, estimer leur vulnérabilité et identifier des mesures d'adaptation. Néanmoins, ces projections peuvent trouver un usage qui dépasse le simple cadre des milieux humides. L'élargissement des

plages de valeurs de niveaux d'eau possibles pourrait avoir un impact important pour ceux qui vivent, travaillent ou se divertissent sur ou aux abords des Grands Lacs, bien plus qu'une augmentation générale du niveau moyen. D'ordre général, l'avènement de niveaux d'eau extrêmes sur les Grands Lacs entraîne des répercussions socioéconomiques importantes. En reconnaissant que les conditions extrêmes observées par le passé peuvent être en deçà des extrêmes attendus dans le futur, advenant un changement significatif du climat, une meilleure planification peut être entreprise pour tous types de projets de développements et d'activités dans le bassin hydrographique des Grands Lacs.

Cette étude n'est pas destinée à l'évaluation des risques, quels que soient le projet ou les intérêts. Il revient donc à l'utilisateur de déterminer sa tolérance aux risques associés aux caractéristiques climatiques futures (par exemple, le degré d'atténuation future du changement climatique) et aux probabilités associées aux niveaux projetés des lacs.

1 Introduction et portée de la présente étude

Les Grands Lacs sont une importante source d'eau potable, de transport, d'hydroélectricité et de loisirs, comme la pêche, la navigation de plaisance, la natation, la chasse et l'observation de la faune. Ces activités sont créatrices d'emplois, en plus de fournir des biens et des services. Les changements climatiques risquent, toutefois, d'avoir des répercussions importantes sur le bassin hydrographique des Grands Lacs (McDermid et al., 2015; ELPC, 2019). Ces dernières devraient se manifester sous la forme d'extrêmes qui pourraient aggraver les facteurs de stress environnementaux déjà préoccupants, tels que la dégradation de la qualité de l'eau et de la santé des écosystèmes. Il s'avère donc nécessaire de prévoir, de planifier et d'agir sur la question des répercussions futures des changements climatiques sur les ressources que sont les Grands Lacs.

Les milieux humides côtiers sont des écosystèmes particulièrement sensibles au climat en raison de leur localisation, à l'interface entre la terre et l'eau, mais aussi de par leur structure et fonction, qui dépendent fortement des variations du niveau des lacs, de la température, des précipitations et de la couverture de glace (Acreman et al., 2009; Mortsch, 2006). Dans le cadre de l'Initiative de protection des Grands Lacs (IPGL), Environnement et Changement climatique Canada s'est engagé à protéger les écosystèmes des milieux humides des Grands Lacs des effets des changements climatiques en identifiant des stratégies d'adaptation visant à améliorer leur résilience. Ce programme, intitulé « Évaluation et amélioration de la résilience des milieux humides côtiers des Grands Lacs » (2017 à 2022), contribue à la conservation à long terme de ces écosystèmes et aux engagements du Canada pris en vertu de l'Accord Canada-États-Unis relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL) et l'Accord Canada-Ontario sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes des Grands Lacs. Les objectifs de ce programme visent à comprendre la vulnérabilité des milieux humides côtiers, à identifier les meilleures stratégies d'adaptation à mettre en place pour améliorer la résilience des milieux humides, ainsi qu'à engager les communautés touchées par la protection des Grands Lacs à un partage de savoir, à une amélioration de la prise de conscience, et à initier un consensus quant aux priorités et aux mesures à mettre en place pour assurer une adaptabilité aux changements climatiques.

Le présent rapport résume la modélisation réalisée par les Services hydrologiques nationaux (SHN) d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Cette partie du projet visait à évaluer les effets des changements climatiques sur le bassin des Grands Lacs et donc, à projeter des scénarios futurs de niveaux d'eau pour chacun des lacs à partir d'un ensemble de simulations climatiques. Ces données ont été utilisées pour quantifier l'impact des changements climatiques pour les milieux humides via un volet distinct de l'étude, lequel visait

à produire des modèles écohydrauliques (Morin et al., 2006) pour simuler la réponse des écosystèmes aux changements de niveau d'eau projetés.

Le présent rapport porte essentiellement sur les variables hydroclimatiques nécessaires au calcul des niveaux d'eau (les précipitations et l'évaporation à la surface des lacs, ainsi que le ruissellement dans les limites des bassins versants des lacs). Les changements projetés pour les autres variables produites par les modèles climatiques pourront être examinés dans le futur (p. ex., écoulement fluvial, teneur en eau du sol, équivalent en eau de la neige, etc.). Divers intérêts au sein du bassin pourraient tirer profit de ces connaissances mais, tel que mentionné précédemment, il ne s'agit pas de la finalité première de ce rapport.

Le présent rapport fait état des connaissances actuelles portant sur le climat futur, ainsi que son incidence sur l'hydroclimat et les niveaux des Grands Lacs. Ces connaissances évoluent toutefois rapidement et, par conséquent, la documentation scientifique la plus à jour devrait également être considérée lors de la lecture des résultats.

2 Contexte

La modélisation des niveaux d'eau futurs des Grands Lacs a largement évolué dans le courant des deux dernières décennies. Durant les années 1990, dans certaines études la modélisation des niveaux des lacs prévoyait une baisse importante des niveaux d'eau, parfois de l'ordre de quelques mètres (Croley, 1990, Hartmann, 1990, Smith, 1991, Mortsch et Quinn, 1996). Ces études n'incluaient toutefois aucune représentation numérique des Grands Lacs. Ce faisant, les simulations étaient largement limitées puisque: a) la surface des lacs représente une grande proportion de la superficie du bassin; et b) aucun calcul lié à la dynamique des lacs n'est possible et donc, l'englacement et l'évaporation à la surface des lacs n'auraient pas été simulés de façon réaliste. Une surestimation du taux de changement de l'évaporation à la surface des lacs pourrait d'ailleurs expliquer les importantes baisses de niveau prévues par ces études.

Les travaux réalisés ultérieurement se sont basés sur les projections climatiques produites dans le cadre de la troisième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP3), lesquelles reposaient sur l'utilisation de modèles de circulation générale (MCG), et présentées dans le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Hayhoe et al., 2010, Angel et Kunkel, 2010, MacKay et Seglenieks, 2013). Ces MCGs sont des modèles mathématiques qui reproduisent les processus atmosphériques, océaniques et terrestres. Ils utilisent en entrée des données de simulation qui permettent de projeter différents scénarios d'émission, lesquels tracent une trajectoire possible d'émission atmosphérique de gaz à effet de serre et d'aérosols qui dépendent du développement social passé et projeté d'ici la fin du siècle actuel.

Les modèles de climat utilisés dans cette seconde phase de recherche dédiée aux Grands Lacs intègrent pour la première fois une paramétrisation simplifiée des Grands Lacs, laquelle permet de représenter quelques aspects de la dynamique de ces grands bassins hydrographiques. Les résultats de ces études tendent généralement à confirmer la diminution des niveaux moyens des lacs projetés par les études précédentes, quoique beaucoup plus faibles qu’initialement attendu. Il importe néanmoins de noter qu’une légère augmentation des niveaux moyens des lacs était projetée pour le futur par certaines de ces simulations. Les différents modèles concordaient néanmoins sur un plus grand éventail de niveaux extrêmes des lacs dans le futur (MacKay et Seglenieks, 2013).

Les ensembles de données utilisés dans la présente étude proviennent du volet nord-américain de l’Étude coordonnée de recherche sur le climat à échelle régionale (*Coordinated Regional Downscaling Experiment* ou NA-CORDEX), un programme parrainé par le Programme mondial de recherche sur le climat (Giorgi et al., 2009). Cet ensemble de données utilise des projections climatiques à l’échelle régionale, lesquelles ont été réalisées grâce à une technique de réduction d’échelle dynamique qui utilise des modèles régionaux forcés par des MCGs provenant de la cinquième phase du projet d’intercomparaison de modèles couplés (Taylor et al., 2012). De plus, des ensembles de données supplémentaires de la version 5 du grand ensemble du modèle régional canadien du climat (CRCM5) (Martynov et al., 2013) ont été produits et fournis par le consortium en climatologie régionale l’adaptation aux changements climatiques OURANOS.

Pour le projet CMIP5, les scénarios d’émission utilisés définissent des trajectoires représentatives de l’évolution des concentrations de carbone (RCP) qui entraînent des forçages radiatifs spécifiques d’ici 2100, comparativement à la période préindustrielle (1850 à 1900). Les simulations réalisées dans le cadre de l’étude NA-CORDEX utilisent les scénarios RCP 4.5 (une trajectoire moyenne qui inclut certaines mesures d’atténuation des émissions des gaz à effet de serre) et RCP 8.5 (la trajectoire très haute qui n’inclut aucune mesure d’atténuation). Ces deux scénarios suivent des trajectoires d’émissions similaires jusqu’en 2050, date après laquelle le scénario RCP 8.5 diverge, ce qui crée des forçages radiatifs très différents à la fin du siècle.

L’application des MCGs à une région donnée demeure difficile en raison de leur résolution spatiale, qui est généralement de l’ordre de centaines de kilomètres. À cette résolution, même des entités aussi grandes que les Grands Lacs demeurent mal représentées (Figure 1). Puisque les lacs comptent un important pourcentage de la superficie totale du bassin versant des Grands Lacs, les simulations utilisées doivent idéalement comprendre une définition numérique adaptée aux lacs.

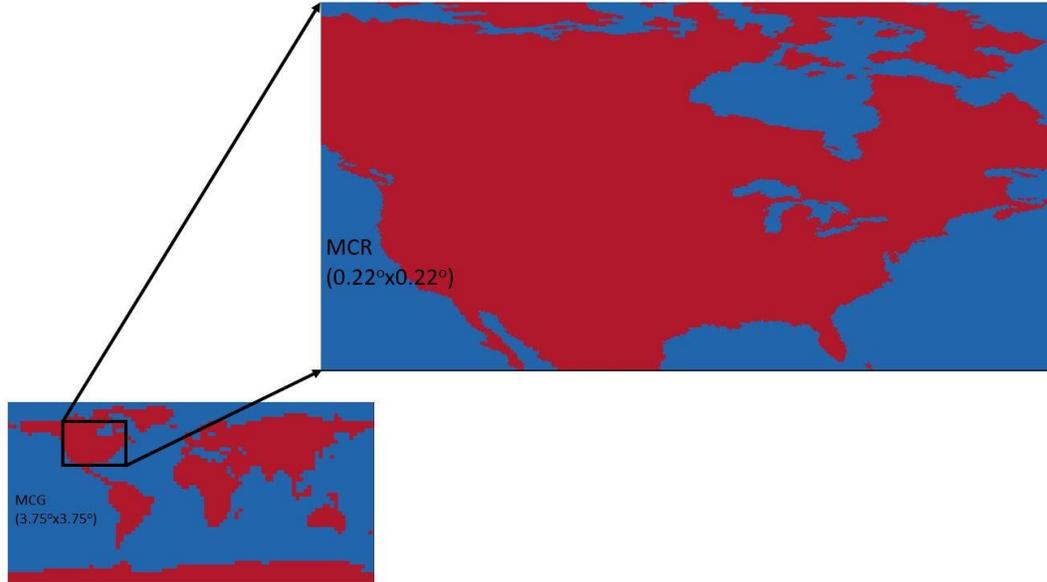


Figure 1: Masques terre-mer caractéristiques des MCG et MCR utilisés dans cette étude.

Il est donc nécessaire de réduire l'échelle spatiale des données produites par les MCGs. Pour ce faire, une réduction d'échelle dynamique a été utilisée, laquelle consiste à utiliser des modèles de circulation régionale (MCR) à haute résolution (de l'ordre de dizaines de kilomètres) forcés par les sorties des MCGs. Les MCRs sont donc utilisés dans un sous-domaine régional. Ils permettent une résolution adéquate des Grands Lacs, en plus de comprendre (dans la plupart des cas) une représentation numérique simplifiée de la dynamique des lacs.

L'étude NA-CORDEX comprend un ensemble de sept MCRs et neuf MCGs, forcés par les scénarios d'émission RCP 4.5 et 8.5, ou un seul des deux. Au total, 27 combinaisons MCR-MCG offrent des projections climatiques à l'échelle régionale, mais seulement 13 d'entre elles disposaient de sorties sur l'évaporation à la surface des lacs. Aussi, seules ces 13 projections ont été utilisées dans cette étude, lesquelles comprennent les données de trois MCRs et de cinq MCGs distincts.

Le détail des projections utilisées dans cette étude est présenté dans le tableau 1, lequel indique sous quels MCR, MCG et RCP chacune des simulations climatiques a été produite, en plus de préciser la résolution spatiale et le sous-modèle de lac du MCR. Il est suggéré de consulter Giorgi et al. (2009) pour obtenir plus de détails sur ces modèles. La plus haute résolution spatiale disponible a été employée pour assurer une fiabilité et une cohérence des résultats. Au commencement de l'étude, la matrice NA-CORDEX était la seule source connue de

sous-ensembles régionaux accessible, offrant des combinaisons de MCG-MCR multiples et contenant des données suffisantes pour permettre le calcul des niveaux futurs des Grands Lacs.

La plupart des MCRs utilisés incluent une paramétrisation simplifiée des lacs, laquelle prend la forme d'un modèle de lac nommé FLake (Fresh-water Lake Model; Mironov, 2008). Il s'agit d'un modèle d'eau douce à deux couches qui prédit la structure verticale de la température de l'eau, ainsi que les conditions de mélange à différentes profondeurs et pour différentes échelles de temps, allant de quelques heures à des années. Il permet une modélisation des bilans intégrés de la chaleur et de l'énergie cinétique dans les deux couches considérées. Ce modèle de lac est couramment utilisé pour des applications diverses, notamment pour la modélisation des prévisions météorologiques, la modélisation du climat, ainsi que d'autres systèmes de prévision numériques destinés à des applications environnementales.

Tableau 1: Détails des combinaisons MCG-MCR utilisées dans cette étude

MCR	MCG	Scénario	Résolution	Modèle de lac
CRCM5	CanESM2	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	Flake
CRCM5	CanESM2	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	Flake
CRCM5	CNRM-CM5	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	Flake
CRCM5	CNRM-CM5	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	Flake
CRCM5	GFDL-ESM2M	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	Flake
CRCM5	GFDL-ESM2M	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	Flake
CRCM5	MPI-ESM-LR	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	Flake
CanRCM4	CanESM2	RCP 4.5	0.22° X 0.22°	Aucun en MCR, prescrit à partir du modèle parent global (MCG)
CanRCM4	CanESM2	RCP 8.5	0.22° X 0.22°	Aucun en MCR, prescrit à partir du modèle parent global (MCG)
RCA4	CanESM2	RCP 4.5	0.44° X 0.44°	Flake
RCA4	CanESM2	RCP 8.5	0.44° X 0.44°	Flake
RCA4	Earth_SMHI	RCP 4.5	0.44° X 0.44°	Flake
RCA4	Earth_SMHI	RCP 8.5	0.44° X 0.44°	Flake

3 Apport net au bassin

Cette étude ne porte que sur les variables hydroclimatiques nécessaires pour simuler le niveau des lacs. Les modèles utilisés pour calculer les niveaux des lacs via les données hydroclimatiques seront décrits dans une section ultérieure. Ces modèles utilisent toutefois l'apport net au bassin (NBS), lequel sert de données d'entrée à l'estimation des niveaux moyens.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour calculer l'apport net au bassin (NBS) : la méthode des composantes et la méthode résiduelle. La méthode des composantes fait appel à des mesures et des estimations modélisées de trois principales variables du NBS, c'est-à-dire les précipitations, le ruissellement et l'évaporation, tandis que la méthode « résiduelle » calcule le NBS en estimant l'eau résiduelle nécessaire pour expliquer la variation observée dans le stockage total d'eau (c.-à-d. la variation mensuelle du niveau du lac), ainsi que dans les intrants et sortants dus aux tributaires. Les deux méthodes sont utilisées dans cette étude, et décrites dans les sections qui suivent.

3.1 Apport net en eau au bassin par la méthode des composantes

L'apport net en eau au bassin (NBS_c) calculé par la méthode des composantes représente la somme des précipitations totales à la surface du lac (précipitations observées directement sur le lac) et du ruissellement provenant de son bassin, moins l'évaporation à la surface du lac (évaporation observée directement sur le lac).

$$NBS_c = P + R - E \quad (1)$$

où, NBS_c – Apport net en eau au bassin calculé par la méthode des composantes

P – précipitations à la surface du lac

R – ruissellement entrant dans le lac à partir de la surface terrestre

E – évaporation à la surface du lac

Pour l'apport net en eau au bassin calculé par la méthode des composantes, les variables hydroclimatiques sont estimées séparément pour chacun des lacs, puis combinées dans une seule équation pour calculer l'apport net au bassin, lequel ne réfère qu'à un seul lac. Étant donné que les lacs Michigan et Huron sont reliés hydrauliquement par le détroit de Mackinac, ils ont le même niveau d'eau et seront considérés comme une seule et même entité (c.-à-d. un seul lac) sous l'appellation Michigan-Huron.

En ce qui concerne les précipitations, elles englobent la quantité de toute forme de précipitations qui tombent directement à la surface du lac. Bien que cette quantité soit

généralement similaire à celle des précipitations qui tombent globalement en périphérie du lac, certaines différences peuvent être observées en raison de la direction des vents, de la topographie locale ou de la dynamique du lac.

Le ruissellement représente la quantité d'eau qui s'écoule dans le lac à partir de tous les cours d'eau environnants, à l'exception du lac en amont le cas échéant. Ce ruissellement est la somme de l'écoulement de surface, de subsurface (c.-à-d. écoulement hypodermique) et des eaux souterraines. De manière à faciliter une comparaison des variables hydroclimatiques, le débit de chaque lac, qui est généralement exprimé en mètres cubes par seconde, a été transformé en millimètres (mm) d'équivalent en eau à la surface du lac en considérant la superficie du lac.

L'évaporation à la surface du lac représente la quantité d'eau évaporée depuis la surface du lac. La variabilité saisonnière de l'évaporation est très différente de celle de la surface terrestre en raison de la dynamique hydrologique du système lacustre. Par exemple, l'évaporation à la surface d'un lac est fortement influencée par la présence de la glace, ce qui montre l'importance d'avoir des modèles de lacs qui prennent en compte la dynamique des lacs.

Les précipitations et l'évaporation au-dessus du lac ont été directement tirées de l'ensemble de données de l'étude NA-CORDEX. Toutefois, l'ensemble des données ne comprenait que le ruissellement généré dans des grilles individuelles numériques pour l'ensemble du bassin des Grands Lacs.

Pour calculer la valeur de ruissellement appropriée, le ruissellement généré par chaque grille du modèle numérique doit être acheminé vers le réseau hydrographique au moment propice du ruissellement. Plutôt que de s'appuyer sur le modèle de surface terrestre (modèle numérique d'élévation) pour chaque MCR, cette étude a fait appel au modèle hydrologique WATFLOOD largement utilisé par la communauté scientifique (Kouwen et al., 1993, Wijayarathne et Coulibaly, 2020) pour calculer le ruissellement dans chaque lac.

Le modèle WATFLOOD est un modèle physique semi-empirique qui utilise la température horaire et les précipitations comme entrants pour calculer le ruissellement de chaque grille dans le réseau hydrographique. Le ruissellement est séparé en écoulement de surface, en écoulement hypodermique et en débit de base (c.-à-d. l'écoulement des eaux souterraines). Les simulations du modèle WATFLOOD ont été exécutées avec succès pour l'ensemble des Grands Lacs. Pendant de nombreuses années, un ensemble de paramètres étalonnés ainsi qu'une méthode de calcul du ruissellement dans chacun des Grands Lacs sont disponibles dans la littérature (Pietroniro et al., 2007). Dans le cadre de cette étude, la température brute et les précipitations proviennent des simulations de l'étude NA-CORDEX et sont utilisées pour calculer le débit de chacun des cours d'eau qui se déversent dans chacun des lacs.

3.1.1 Comparaison des composantes historiques de l'apport net au bassin

Il est difficile de trouver d'anciens ensembles de données des variables de l'apport net en eau au bassin (NBS) qui tiennent compte de façon précise des zones lacustres du bassin des Grands Lacs. Toutefois, la base de données hydrométéorologiques du Laboratoire de recherche environnementale sur les Grands Lacs (GLERL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) contient les données les plus fiables. Cette base de données comprend les valeurs mensuelles des précipitations et de la température de l'air au-dessus des lacs et au-dessus des terres, du ruissellement et de l'évaporation au-dessus des lacs depuis 1950. Les valeurs sont calculées à partir d'une combinaison de données mesurées dans l'ensemble du bassin et des résultats de la modélisation. Bien que le nombre de stations et les modèles utilisés aient évolué au fil du temps, tout est fait pour que les données résultantes restent cohérentes sur toute la période. Les détails de la façon dont chacun des paramètres est dérivé se trouvent dans Hunter et al. (2015).

Les valeurs annuelles de chaque variable sont présentées dans les Figure 2 à Figure 13. Les points rouges montrent qu'il y a une grande variation annuelle des précipitations, du ruissellement et de l'évaporation au-dessus des lacs. Une variation aussi importante fait en sorte qu'il est difficile de voir des tendances globales des données. Par conséquent, la moyenne mobile décennale des données annuelles est également présentée afin de faciliter l'identification (visualisation) de ces tendances.

Les précipitations au-dessus du lac (Figure 2 à Figure 5) montrent qu'il y a une grande variation annuelle lorsqu'une année très sèche est immédiatement suivie d'une année très humide. En examinant la moyenne mobile sur 10 ans, il est possible d'observer la même tendance générale pour tous les lacs ayant une période de faible humidité dans les années 1960 et une période de précipitations supérieures au-dessus des lacs tout au long des années 1970 et jusque dans les années 1980. Entre le milieu des années 1980 et les années 1990, il y a eu une longue période de précipitations plus faibles au-dessus des lacs qui s'est prolongée progressivement dans les années 2010.

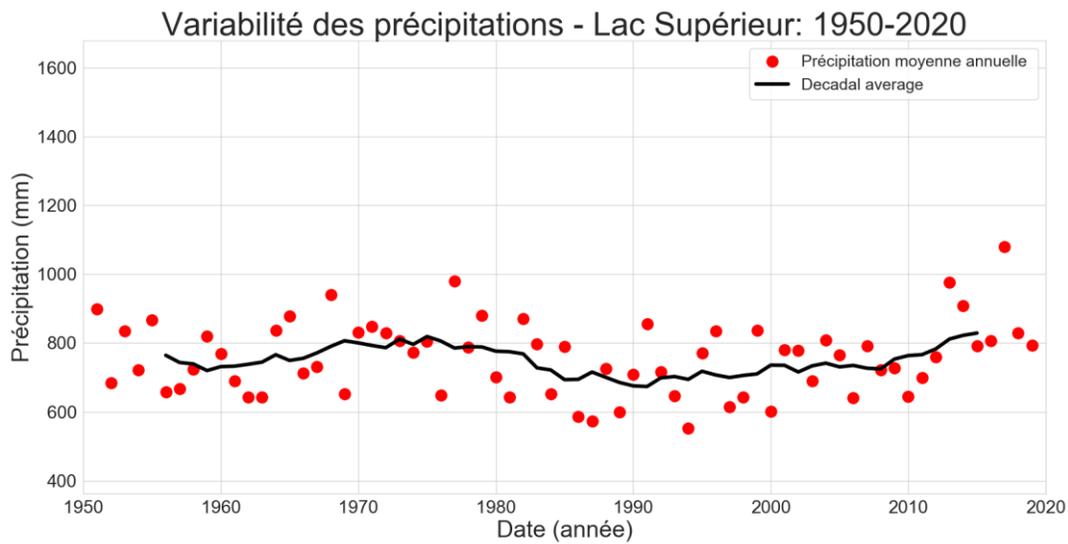


Figure 2: Variabilité des précipitations annuelles au-dessus du lac Supérieur. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

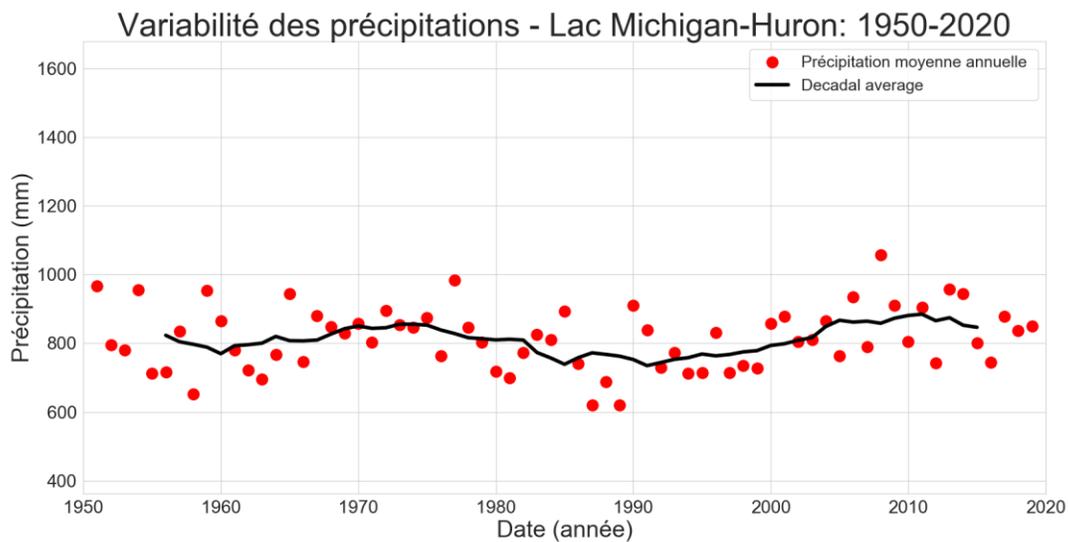


Figure 3: Variabilité des précipitations annuelles au-dessus du lac Michigan-Huron. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

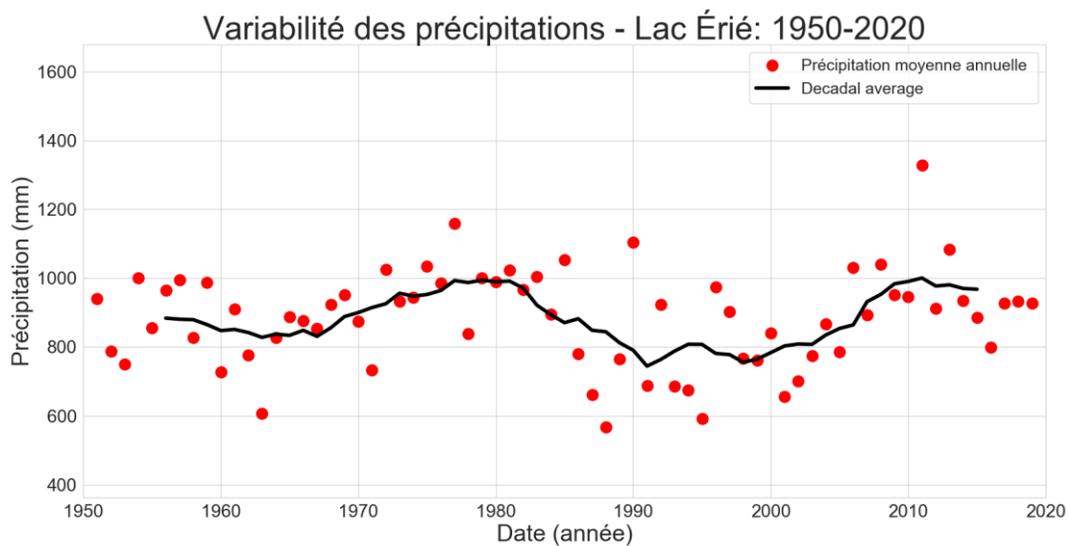


Figure 4: Variabilité des précipitations annuelles au-dessus du lac Érié. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

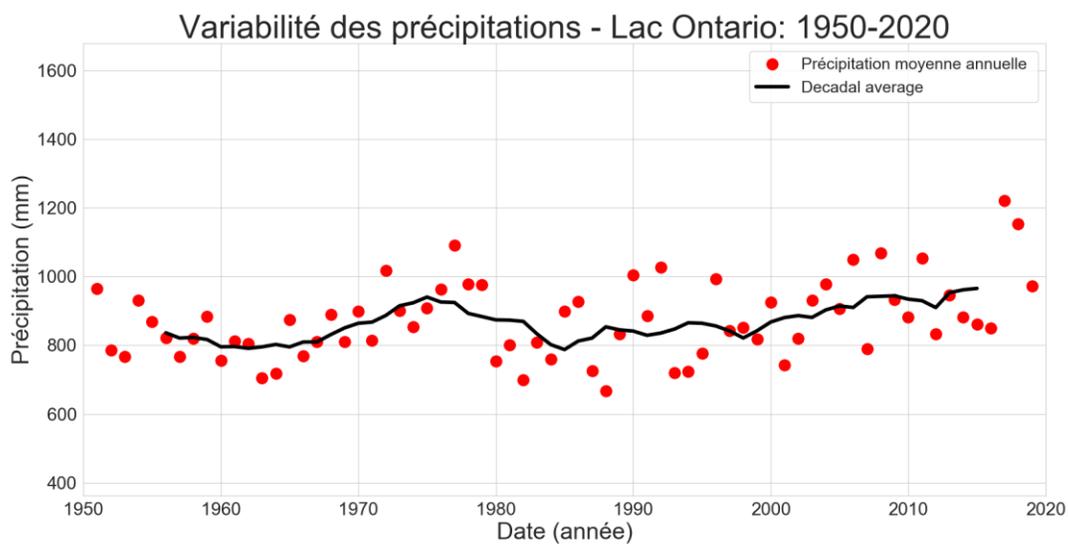


Figure 5: Variabilité des précipitations annuelles au-dessus du lac Ontario. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

Il convient de noter que le ruissellement entrant dans chaque lac a été exprimé en équivalent de mm au-dessus du lac afin de faciliter la comparaison avec les de ux autres variables du NBS. Toutefois, en raison de la taille plus petite du lac Ontario par rapport à son bassin versant, cette transformation fait en sorte que les valeurs de ruissellement pour ce lac sont beaucoup plus élevées comparativement aux autres lacs. Cependant, l'échelle des graphiques a été normalisée pour tous les lacs afin de faciliter la comparaison de toutes les variables.

En ce qui concerne les variations du ruissellement (Figure 6 à Figure 9), étonnamment, les tendances ne sont semblables à celles observées dans les précipitations au-dessus des lacs avec des tendances plus élevées et plus faibles d'une décennie à l'autre. Les variations de l'évaporation au-dessus du lac (Figure 10 à Figure 13) correspondent davantage à l'augmentation générale des moyennes décennales depuis les années 1980.

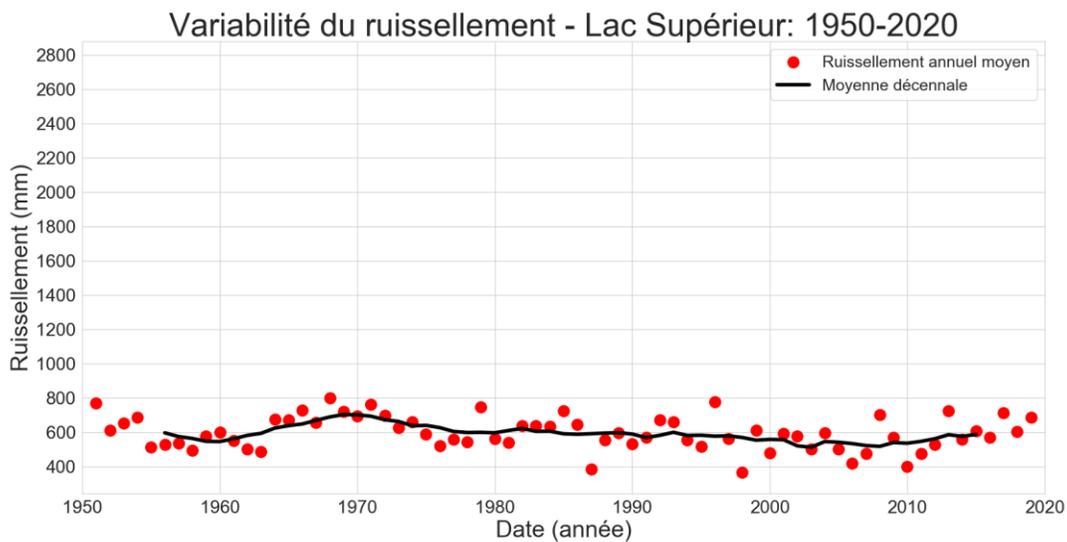


Figure 6: Variabilité du ruissellement annuel entrant dans le lac Supérieur. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

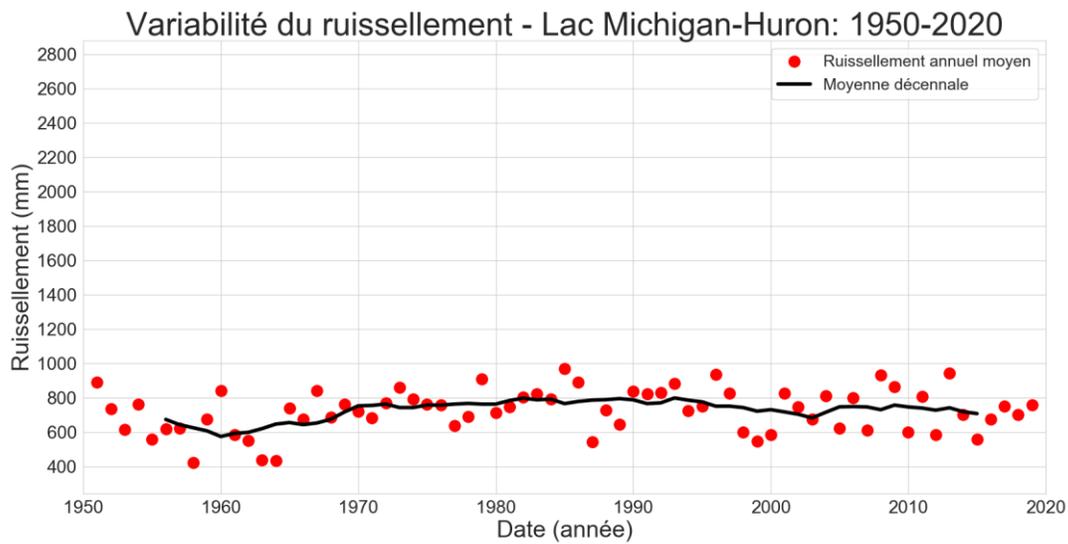


Figure 7: Variabilité du ruissellement annuel entrant dans le lac Michigan-Huron. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

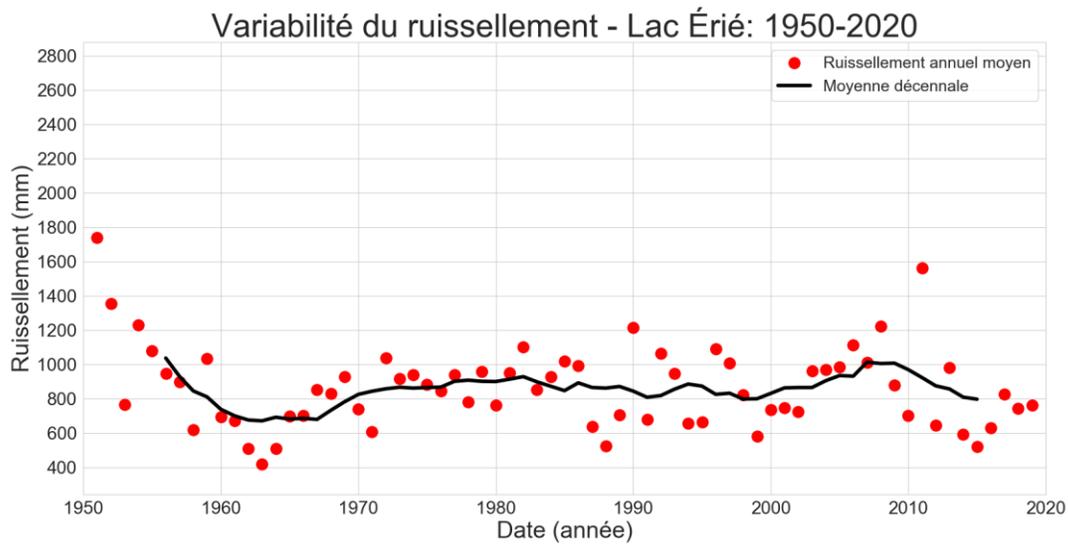


Figure 8: Variabilité du ruissellement annuel entrant dans le lac Érié. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

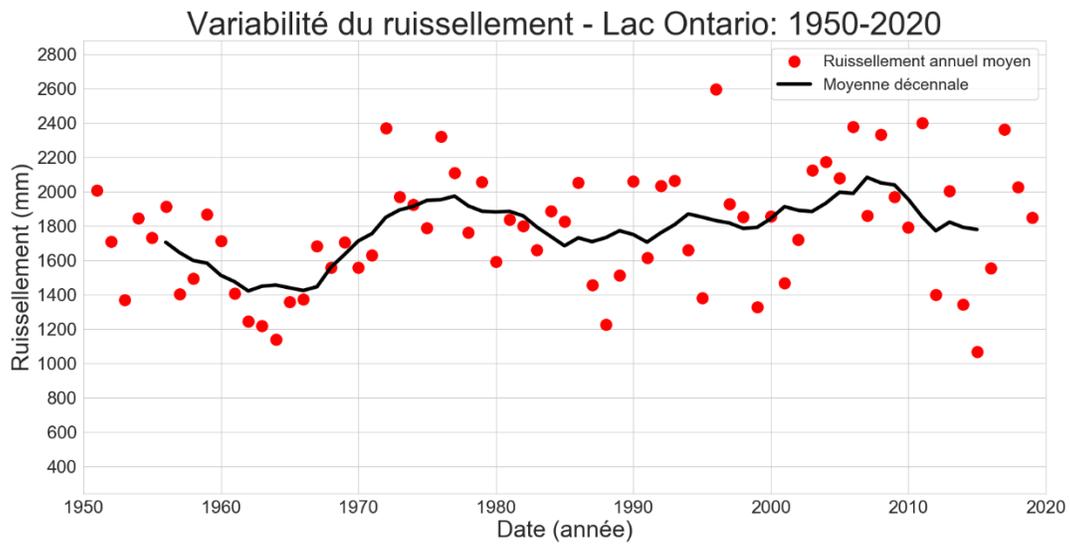


Figure 9: Variabilité du ruissellement annuel entrant dans le lac Ontario. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

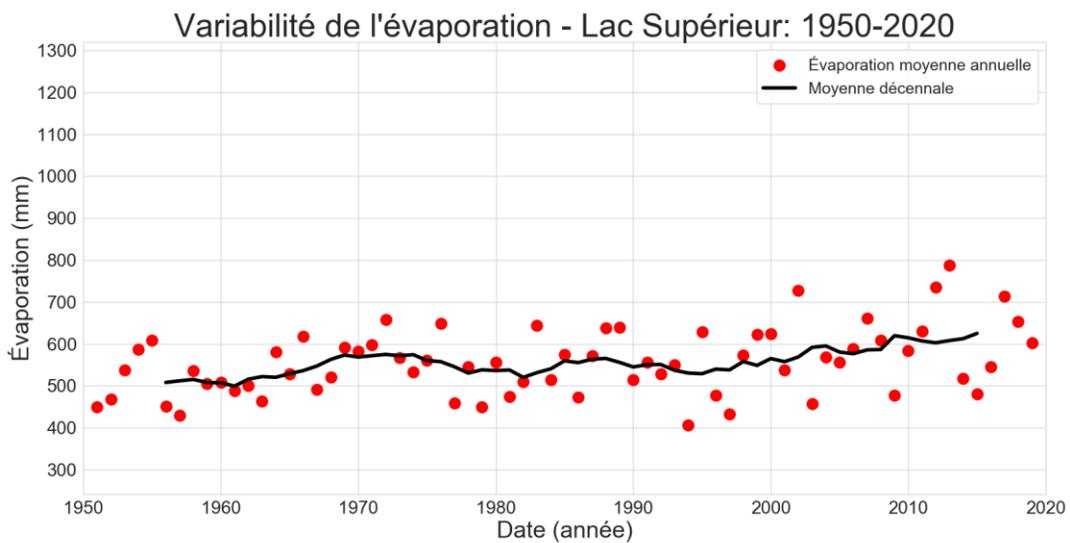


Figure 10: Variabilité de l'évaporation annuelle au-dessus du lac Supérieur. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

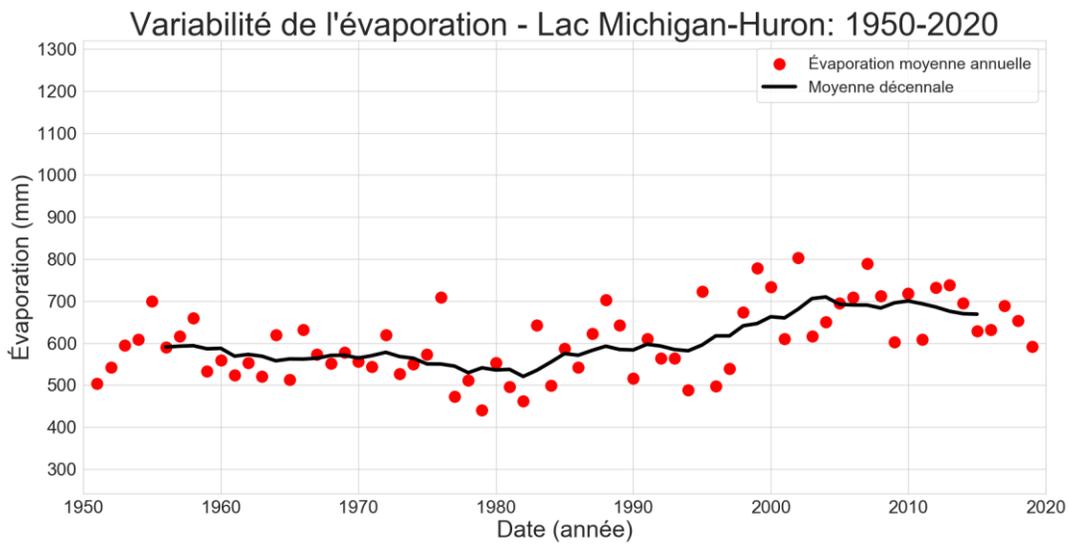


Figure 11: Variabilité de l'évaporation annuelle au-dessus du lac Michigan-Huron. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

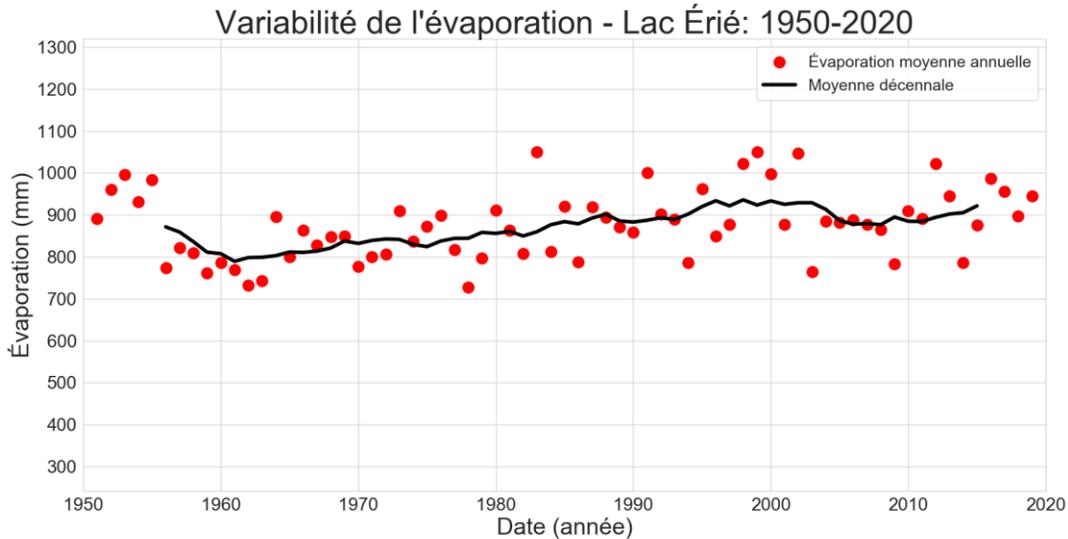


Figure 12: Variabilité de l'évaporation annuelle au-dessus du lac Érié. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

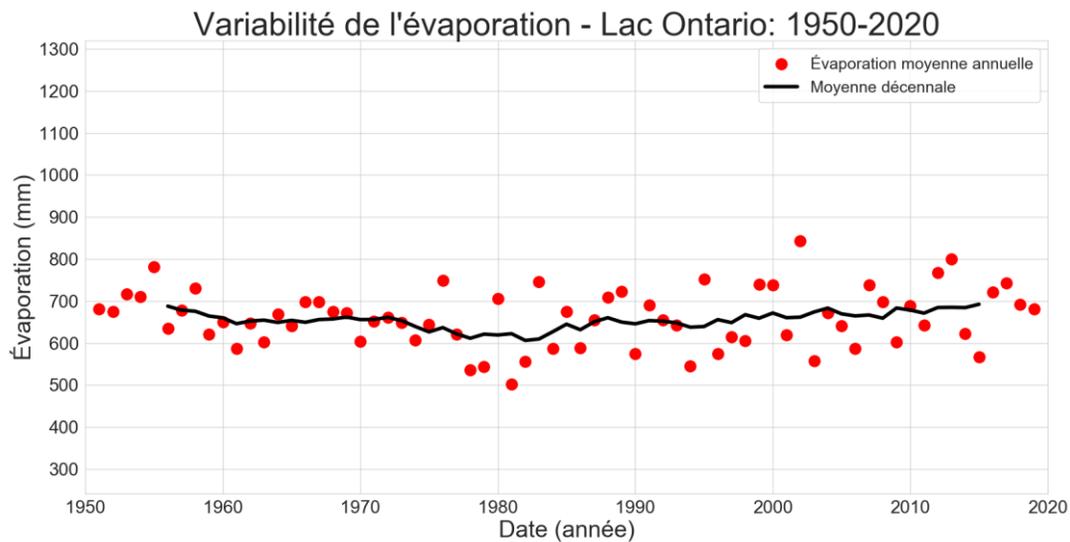


Figure 13: Variabilité de l'évaporation annuelle au-dessus du lac Ontario. Les points rouges sont les valeurs annuelles et la ligne noire est la moyenne mobile sur 10 ans.

Une comparaison des valeurs des variables du NBS de la base de données hydrométriques du GLERL a été effectuée avec celles du climat actuel des simulations du NA-CORDEX. Comme il est indiqué précédemment, les valeurs des précipitations et de l'évaporation au-dessus des lacs ont été extraites de l'ensemble de données de NA-CORDEX, tandis que les données de ruissellement sont issues des simulations du modèle hydrologique WATFLOOD qui fait appel aux données de précipitations et de températures de l'étude NA-CORDEX.

Il convient également de noter qu'il est impossible de comparer directement les valeurs séquentielles mensuelles des variables du NBS de l'étude NA-CORDEX avec celles de la base de données hydrométriques du GLERL. Cela s'explique par le fait que les modèles simulés du climat actuel représentent des résultats climatiques possibles qui évoluent différemment des observations historiques en raison des conditions initiales des modèles et de la nature aléatoire du système climatique. Cependant, il est possible d'analyser le climat actuel en faisant la moyenne des valeurs mensuelles des variables du NBS dans la simulation de 1961 à 2000 versus la valeur moyenne mensuelle des variables correspondantes de la base de données hydrométriques du GLERL.

Pour les précipitations au-dessus du lac (Figure 14 à Figure 17), les MCRs représentent raisonnablement bien le cycle saisonnier observé dans la base de données hydrométriques du GLERL. Toutefois, tous les modèles sont unidirectionnels et surestiment généralement les

valeurs des précipitations au-dessus des lacs, et c'est particulièrement le cas pour le lac Ontario.

En général, les modèles du MCR ne représentaient pas tous la variation saisonnière du ruissellement observée dans la base de données hydrométriques du GLERL (Figure 18 à Figure 21). Le ruissellement modélisé a montré une valeur maximale de ruissellement printanier retardée et une diminution plus lente des débits faibles en automne et en hiver. Il existe de nombreuses causes possibles de cette mauvaise représentation; notamment les données d'entrée du modèle WATFLOOD ou la calibration du modèle WATFLOOD. Une recherche détaillée et complète sur les raisons de la contre-performance des modèles hydrologiques dépasse la portée de cette étude, mais elle est envisagée à l'avenir.

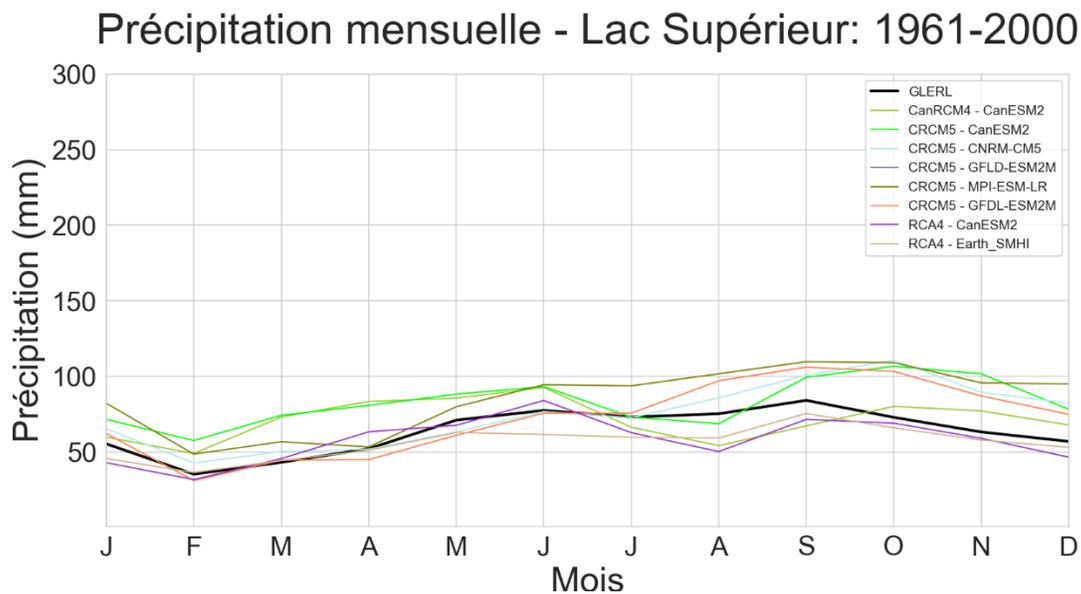


Figure 14: Comparaison des précipitations mensuelles au-dessus du lac Supérieur utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

Précipitation mensuelle - Lac Michigan-Huron: 1961-2000

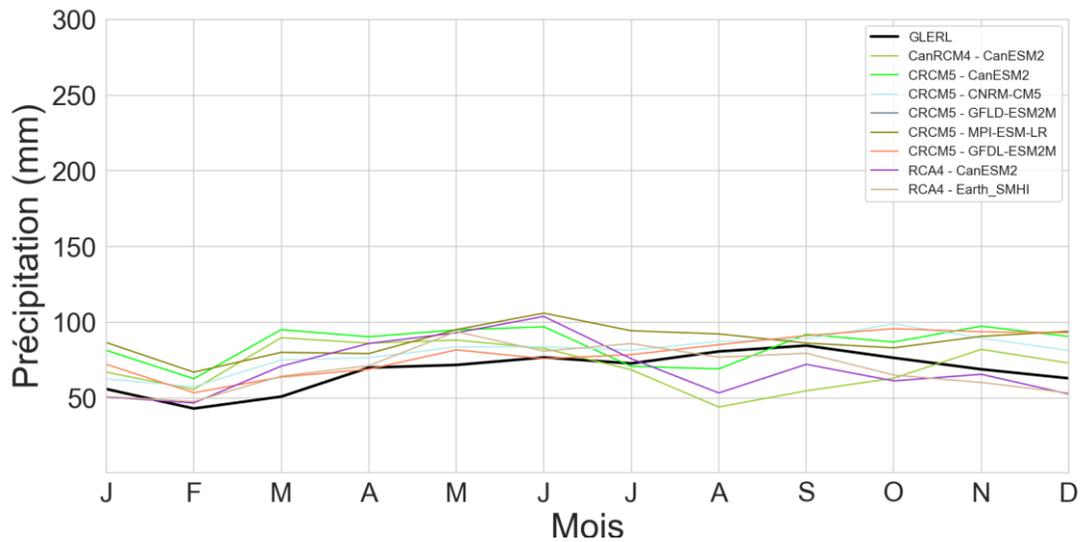


Figure 15: Comparaison des précipitations mensuelles au-dessus du lac Michigan-Huron utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

Précipitation mensuelle - Lac Érié: 1961-2000

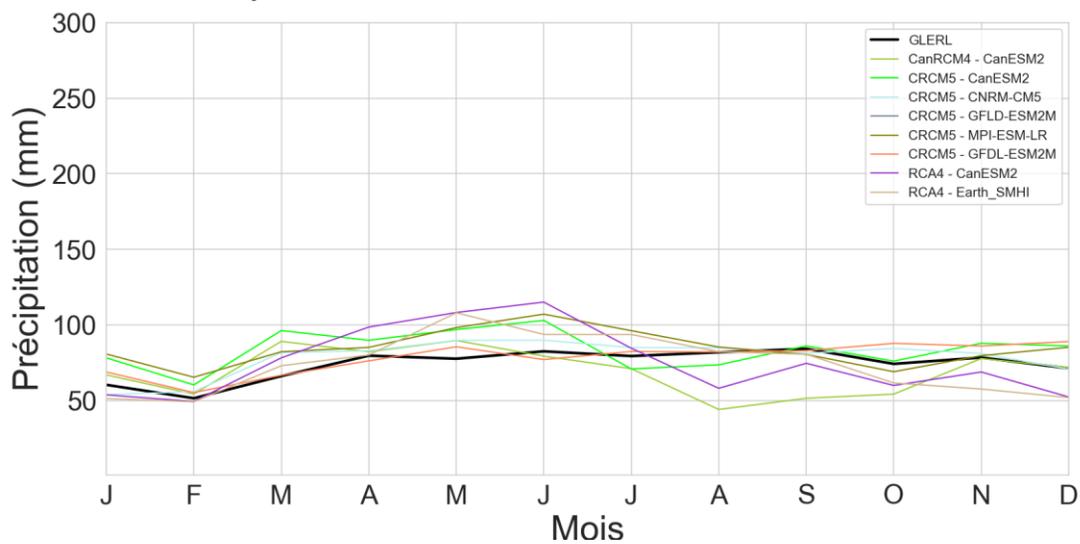


Figure 16: Comparaison des précipitations mensuelles au-dessus du lac Érié utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

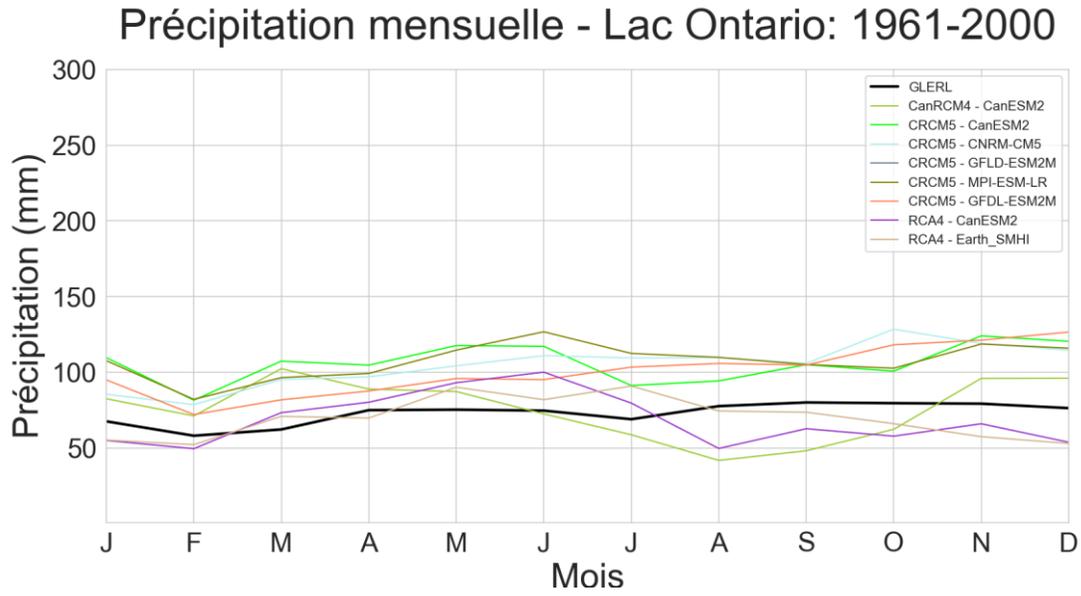


Figure 17: Comparaison des précipitations mensuelles au-dessus du lac Ontario utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

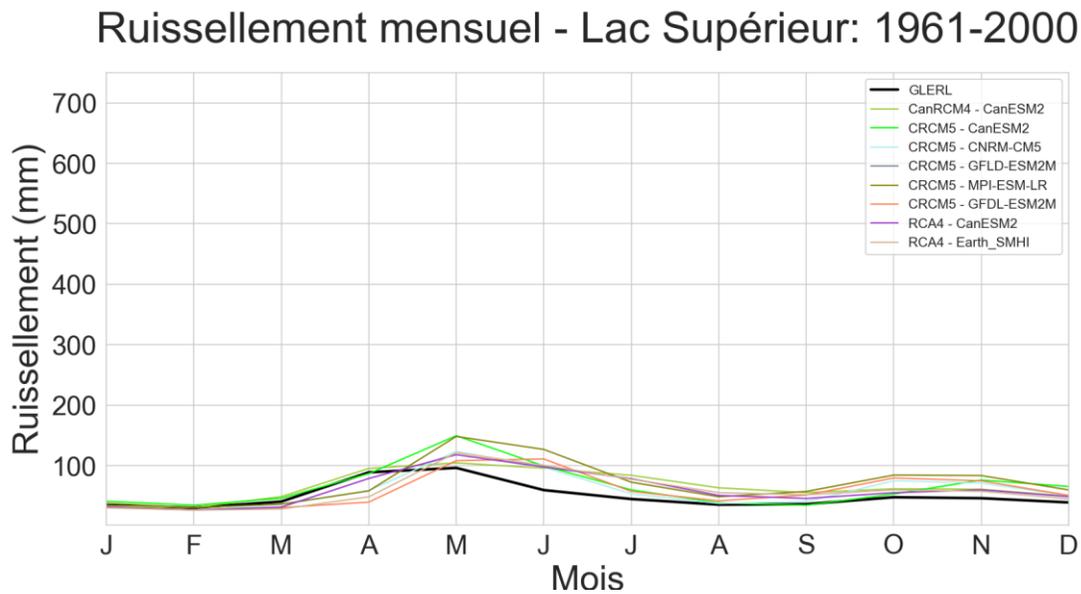


Figure 18: Comparaison du ruissellement mensuel dans le lac Supérieur utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et des différents résultats de la MCR du climat actuel.

Ruissellement mensuel - Lac Michigan-Huron: 1961-2000

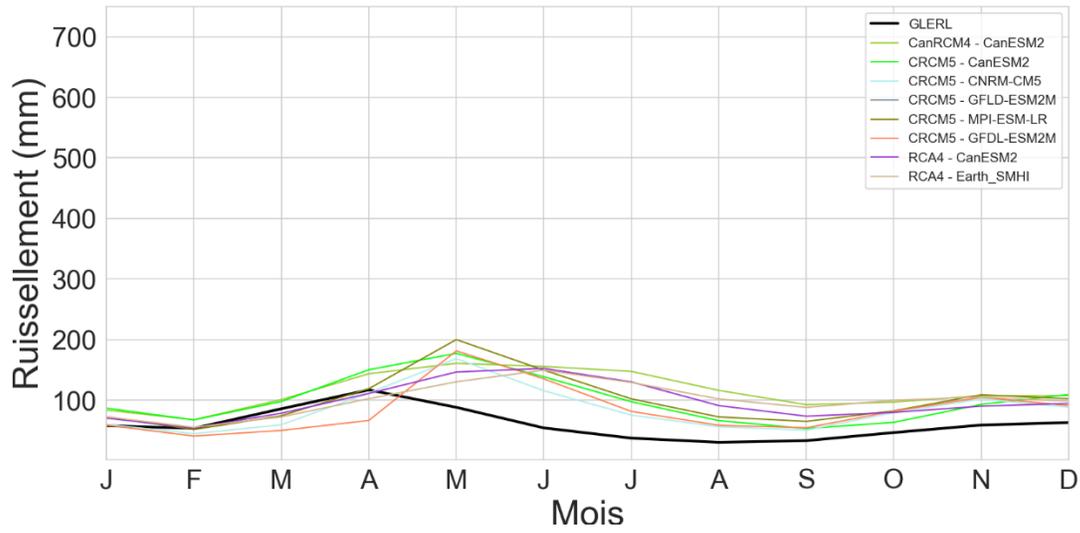


Figure 19: Comparaison du ruissellement mensuel dans le lac Michigan-Huron utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et des différents résultats de la MCR du climat actuel.

Ruissellement mensuel - Lac Érié: 1961-2000

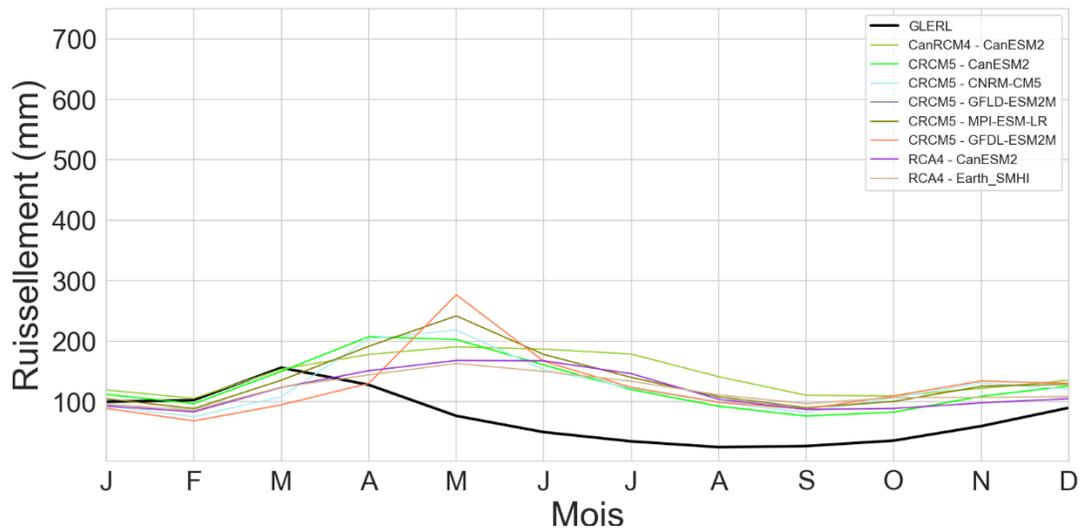


Figure 20: Comparaison du ruissellement mensuel dans le lac Érié utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et des différents résultats de la MCR du climat actuel.

Ruissellement mensuel - Lac Ontario: 1961-2000

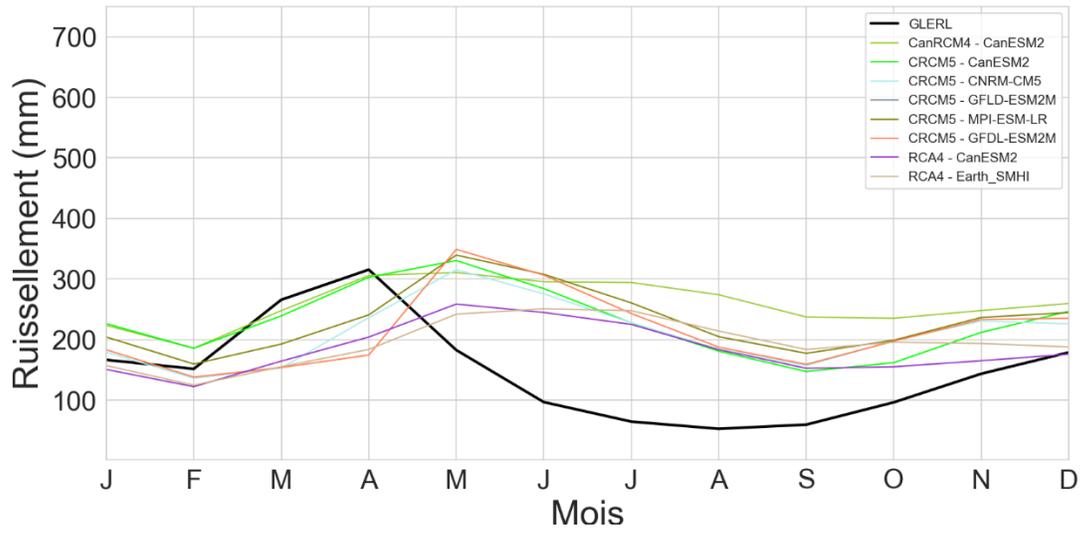


Figure 21: Comparaison du ruissellement mensuel dans le lac Ontario utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et des différents résultats de la MCR du climat actuel.

Les graphiques d'évaporation au-dessus des lacs (Figure 22 à Figure 25) illustrent également l'incapacité des modèles à saisir les cycles saisonniers des variables hydroclimatiques. Par conséquent, les simulations des modèles issues des MCRs projettent des valeurs d'évaporation au-dessus des lacs plus élevées pendant les périodes où la base de données hydrométriques du GLERL montre une faible évaporation au-dessus des lacs. En particulier, pour le lac Érié (Figure 24), les modèles ont grandement sous-estimé l'évaporation totale au-dessus de ce lac. Les raisons n'ont pas été élucidées dans ce projet mais il serait possible d'orienter les études futures vers une meilleure compréhension de plusieurs autres enjeux environnementaux incluant celle-ci.

En général, tous les modèles du MCR, avaient de la difficulté à représenter la variation saisonnière du ruissellement ainsi que l'évaporation au-dessus du lac pour certains lacs (par exemple, Figure 20 et Figure 25). Les incohérences observées montrent qu'il est nécessaire de corriger le biais comme il est décrit dans la section suivante.

Évaporation mensuelle - Lac Supérieur: 1961-2000

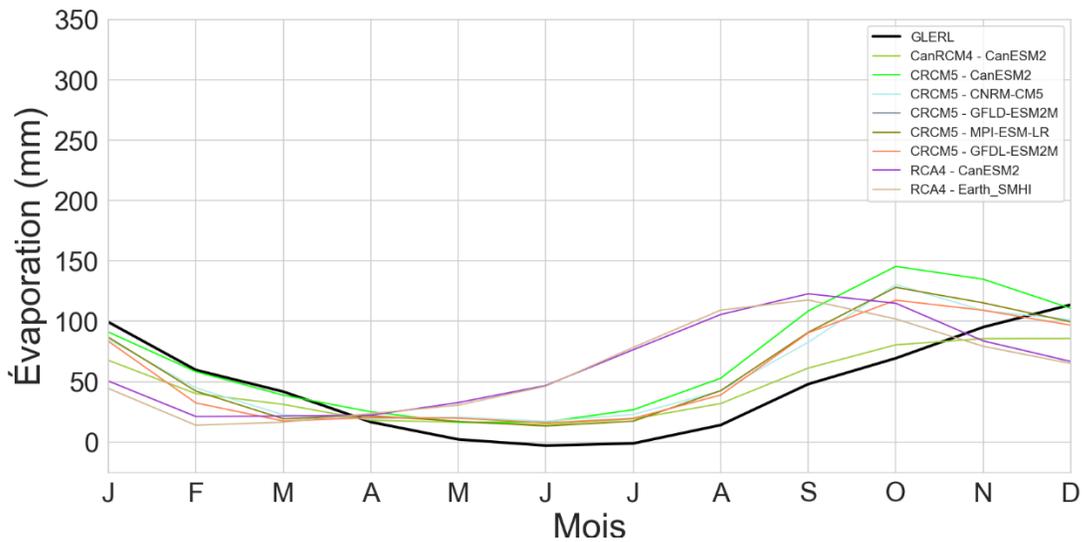


Figure 22: Comparaison de l'évaporation mensuelle au-dessus du lac Supérieur utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

Évaporation mensuelle - Lac Michigan-Huron: 1961-2000

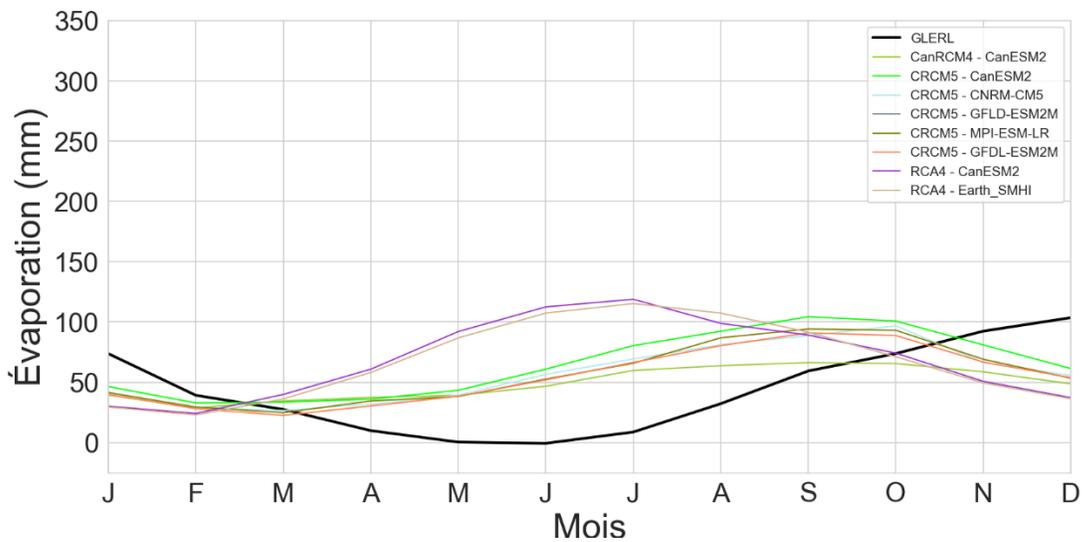


Figure 23: Comparaison de l'évaporation mensuelle au-dessus du lac Michigan-Huron utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

Évaporation mensuelle - Lac Érié: 1961-2000

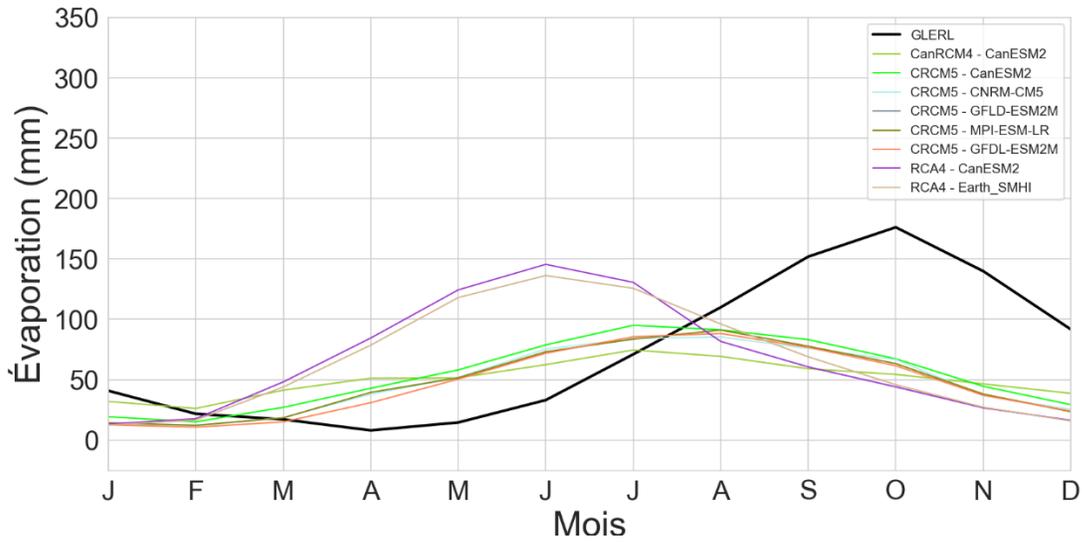


Figure 24: Comparaison de l'évaporation mensuelle au-dessus du lac Érié utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

Évaporation mensuelle - Lac Ontario: 1961-2000

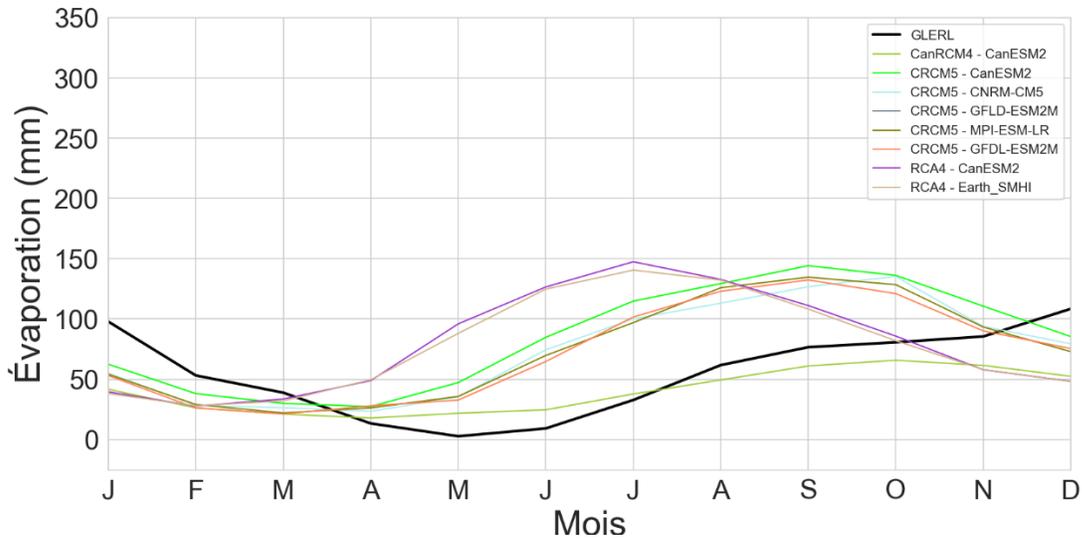


Figure 25: Comparaison de l'évaporation mensuelle au-dessus du lac Ontario utilisant la base de données Hydrométriques du GLERL et divers résultats de la MCR du climat actuel.

3.1.2 Correction du biais des variables hydroclimatiques

Comme le montre la section précédente, pour certaines variables et différents horizons temporels, les résultats du MCR n'ont pas les mêmes caractéristiques que l'ensemble de données de référence du climat actuel. L'une des raisons de ce contraste est la présence d'un biais non négligeable dans les résultats du MCR. Comme l'a suggéré Piani et al. (2009), il faut procéder à une correction de biais dans les modèles du MCR avant de les utiliser dans les études hydrologiques afin d'optimiser les probabilités d'obtenir des résultats réalistes.

Il existe plusieurs techniques de correction du biais et l'une des approches généralement acceptée est de présumer que le biais dans la simulation du climat actuel est le même que celui de la simulation du climat futur (Reichler et Kim, 2008). Dans cette étude, une fonction de correction de biais multivariable a été utilisée pour corriger le biais des données mensuelles. Cette technique consiste à sélectionner d'abord une période de référence pour laquelle une variable a des valeurs mesurées ou simulées fiables. Les données de cette période dite de référence sont ensuite comparées aux valeurs simulées du modèle pour le climat actuel. Des calculs sont ensuite effectués sur cette comparaison, ce qui entraîne des ajustements de la sortie du modèle pour le climat actuel afin qu'ils correspondent plus étroitement aux données de référence. Les mêmes ajustements sont ensuite apportés à la sortie du modèle pour le climat futur, ce qui donne un ensemble de données futures débiaisées. Les détails sur cette technique de correction de biais se trouvent dans les travaux de Cannon (2016).

Les trois variables de l'apport net en eau au bassin calculé par la méthode des composantes (NBS_c) sont corrigées à l'aide de la technique de correction utilisée par Cannon (2016). Les données de référence de la base de données hydrométriques du GLERL sont également utilisées pour couvrir la période de 1961 à 2000. Pendant cette période, il est nécessaire de tenir compte des conditions humides et sèches d'un passé récent, sans toutefois chevaucher les périodes d'accélération utilisées dans les projections climatiques, afin de ne pas compromettre la qualité des comparaisons.

La

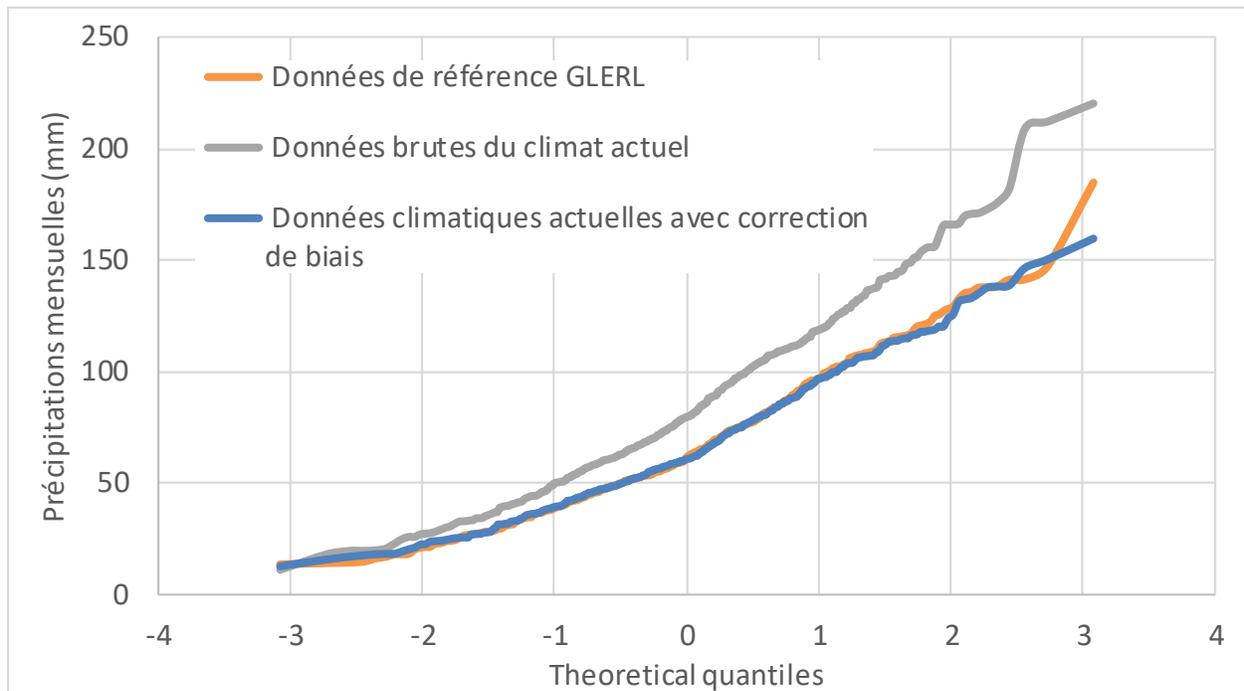


Figure 26 montre la correction du biais des précipitations mensuelles (1961 à 2000) du lac Supérieur à l'aide de la combinaison du MCG et MCR (MPI-ESM et CRCM5). Il est à noter que le MCG (MPI-ESM) fait référence au « Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model » alors que le MCR (CRCM5) est la version 5 du grand ensemble du modèle régional canadien du climat. Les valeurs de la base de données du GLERL sont en orange et les résultats bruts des simulations climatiques actuelles sont en gris. Il est possible de constater que les résultats bruts des simulations climatiques ont des valeurs généralement plus élevées. La moyenne pour la base de données du GLERL est de 66,4 mm avec un écart-type de 28,2 mm, tandis qu'avec les simulations, la moyenne est de 84,4 mm avec un écart-type de 35,4 mm.

Les valeurs présentant un biais corrigé en bleu correspondent bien aux données de référence du GLERL. En général, ces données correspondent mieux aux données de référence en ce qui concerne l'amplitude et la variation; la moyenne étant maintenant de 66,1 mm avec un écart-type de 27,2 mm dans l'ensemble de données dont le biais a été corrigé. Les résultats obtenus après correction de biais sont similaires pour d'autres lacs et les autres variables du NBS_C.

Pour chaque ensemble distinct de données, le biais est corrigé pour le climat actuel, puis la même correction est appliquée pour le climat futur. Bien entendu, cela suppose que le biais observé dans le climat actuel sera le même que dans le climat futur. Bien que la validité de cette hypothèse ne puisse être vérifiée, il s'agit d'une méthodologie couramment utilisée dans ce genre d'étude (Christensen, 2008; Teutschbein et Seibert, 2012; Willkofer et al., 2018,

Krinner et al., 2020). Par conséquent, données débiaisées sont utilisées pour projeter les valeurs futures des variables hydroclimatiques, toujours en supposant que les mêmes biais seraient réitérés dans le futur.

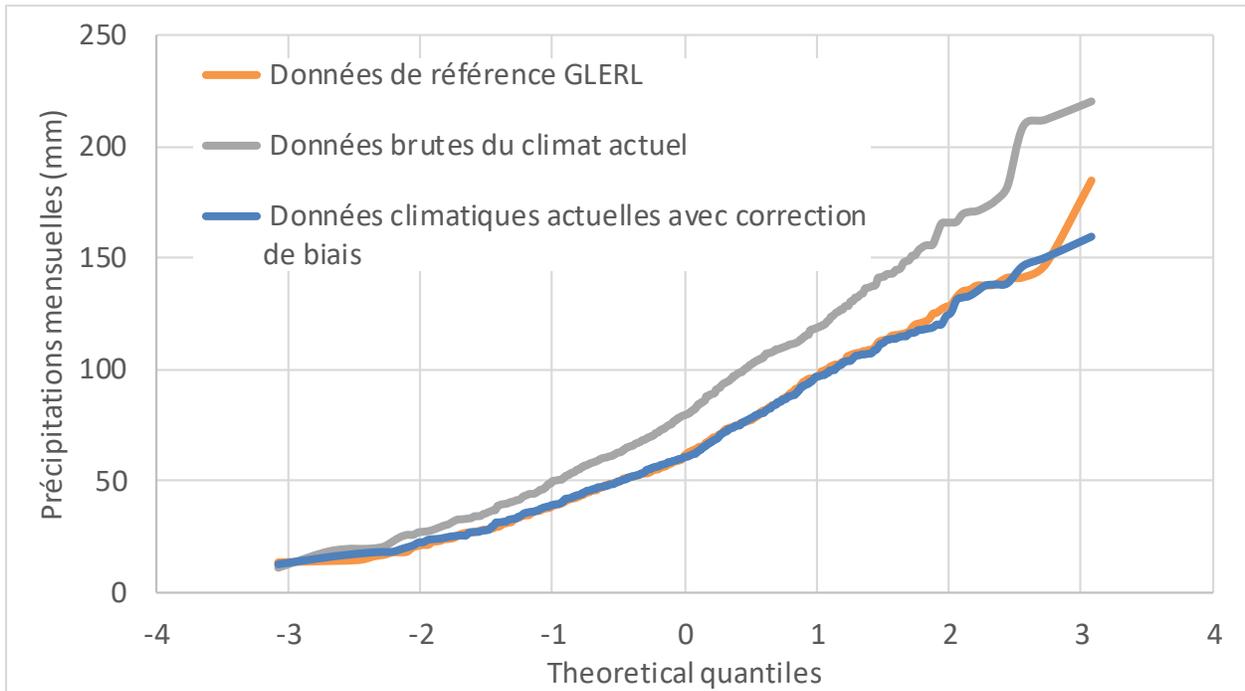


Figure 26: Graphique quantile-quantile montrant la correction de biais des précipitations mensuelles du MPI-ESM (MCG et MRC).

3.1.3 Valeurs futures projetées des variables hydroclimatiques

Afin de déterminer la variation des variables hydroclimatiques dans le climat futur se compare à celle observée dans le climat actuel, les Figure 27 à Figure 38 montrent : la moyenne annuelle de la base de données hydrométriques du GLERL pour le climat actuel, les valeurs annuelles projetées pour toutes les simulations des RCPs, et les tendances linéaires obtenues par la méthode des moindres carrés pour les valeurs projetées du RCP 4.5 et du RCP 8.5.

En ce qui concerne les précipitations au-dessus des lacs (Figure 27 à Figure 30), la plupart des simulations du modèle de climat projeté montrent une augmentation des valeurs moyennes dans le climat futur. La tendance globale montre que les simulations du RCP 8.5 sont

représentées par une ligne ayant une pente constamment plus élevée (traduisant une forte augmentation des valeurs) que celle représentant les simulations du RCP 4.5. L'écart-type des projections du climat futur est plus grand que celui observé dans le climat actuel. De plus, le plus grand écart-type se situe au niveau des valeurs les plus élevées, mais certaines valeurs extrêmes plus faibles sont également observées.

Il n'y a pas beaucoup de différences marquées entre les résultats du RCP 4.5 et ceux du RCP 8.5 dans la période s'échelonnant du début du siècle jusqu'au milieu du siècle puisque, la quantité des émissions dans l'atmosphère n'est pas très différente d'une année à l'autre. Cependant, au cours des 30 dernières années du siècle, les simulations du RCP 8,5 montrent des valeurs de précipitations au-dessus des lacs plus élevées. Plus particulièrement, les CRCM5 simulés à l'aide des MCGs (MPI-ESM et GFDL-ESM2M) révèlent des précipitations au-dessus des lacs beaucoup plus élevées pendant cette période.

Étant donné que le ruissellement est principalement dicté par l'intensité, la fréquence, la durée et la quantité des précipitations, les tendances générales observées dans les données futures sur le ruissellement sont les mêmes que dans les précipitations au-dessus du lac (Figure 31 à Figure 34). La plage de variation dans la projection du climat futur est plus grande que celle observée dans la base de données du climat actuel, particulièrement plus tard au cours du siècle.

L'évaporation au-dessus des lacs montre une même tendance générale à la hausse observée dans le climat actuel qui se prolongerait dans le futur (Figure 35 à Figure 38). Fait intéressant, la tendance observée dans le profil RCP 8.5 « activités habituelles sans mesure d'adaptation et d'atténuation » semble maintenir la tendance réelle des données observées au cours des dernières décennies, tandis que dans le profil RCP 4.5, la pente de la tendance suggère une augmentation moins forte.

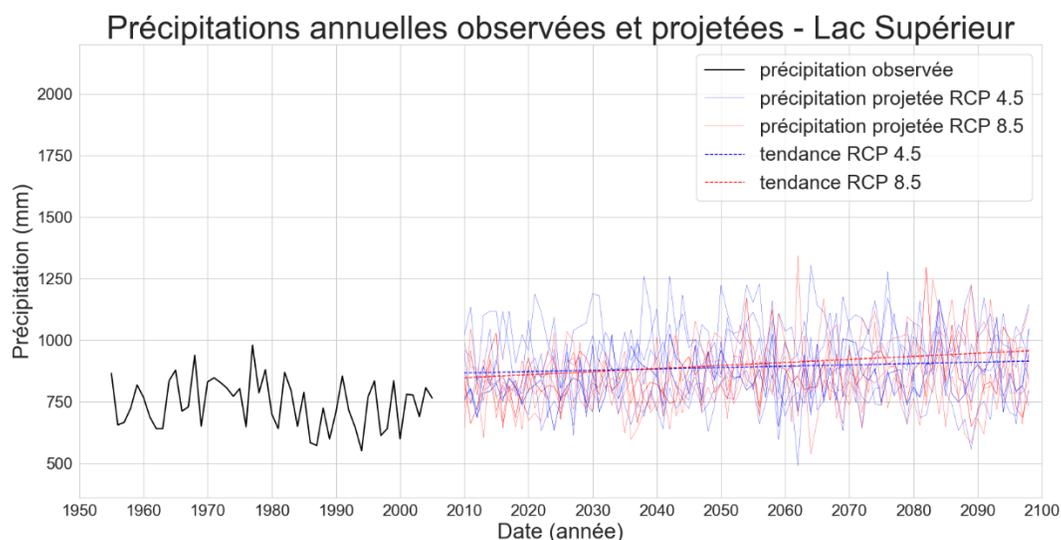


Figure 27: Variabilité des précipitations annuelles avec correction de biais au-dessus du lac Supérieur, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

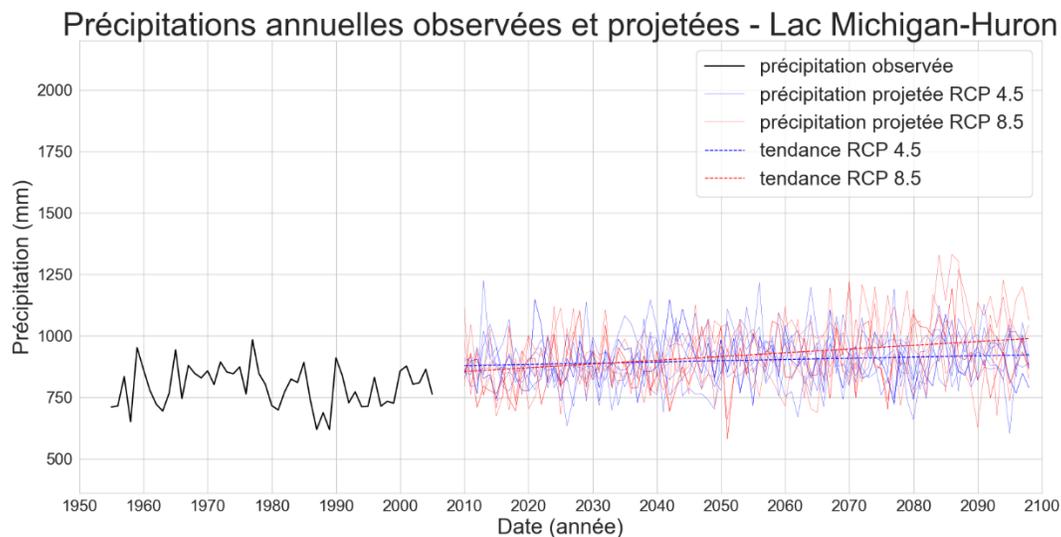


Figure 28: Variabilité des précipitations annuelles avec correction de biais au-dessus du lac Michigan-Huron, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

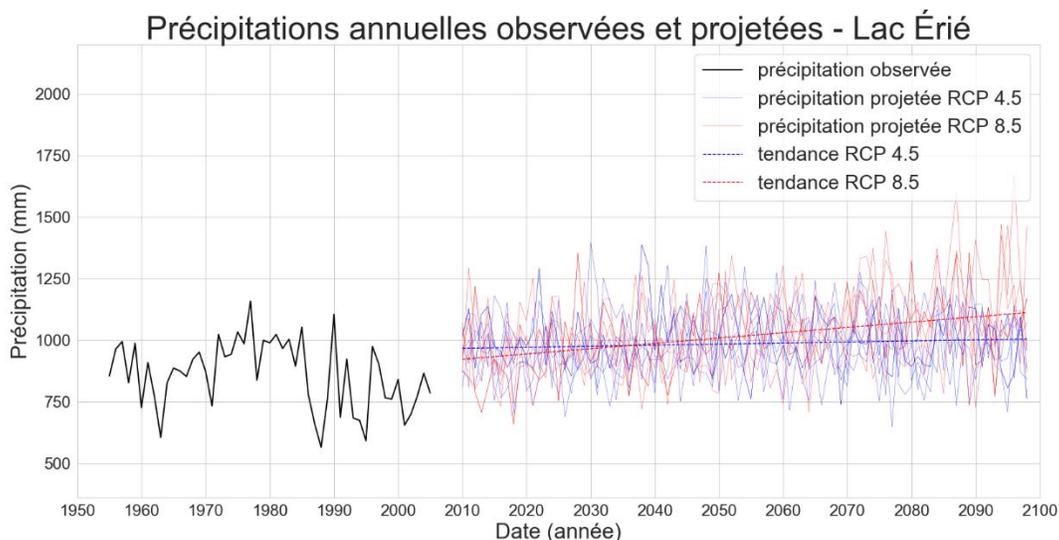


Figure 29: Variabilité des précipitations annuelles avec correction de biais au-dessus du lac Érié, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

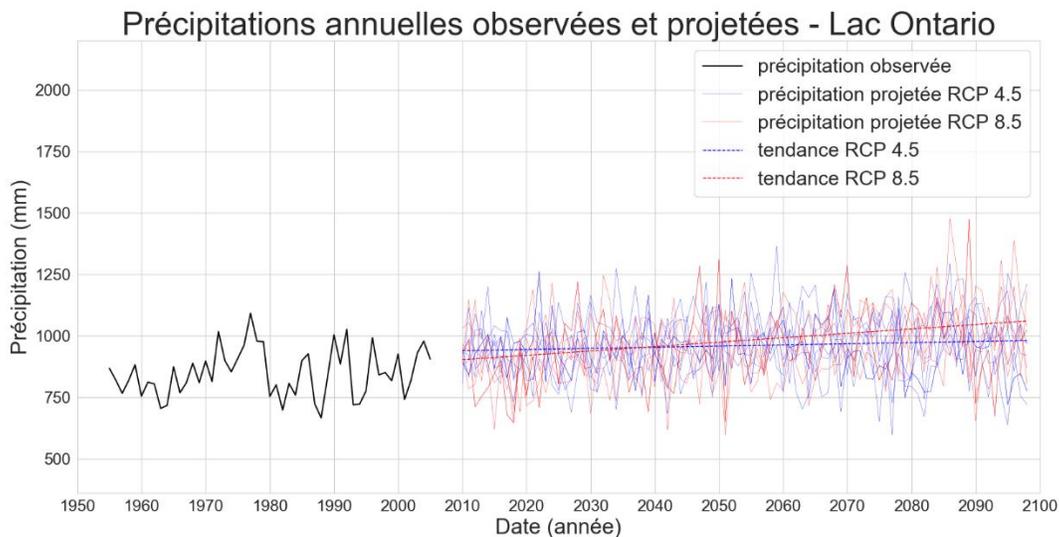


Figure 30: Variabilité des précipitations annuelles avec correction de biais au-dessus du lac Ontario, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

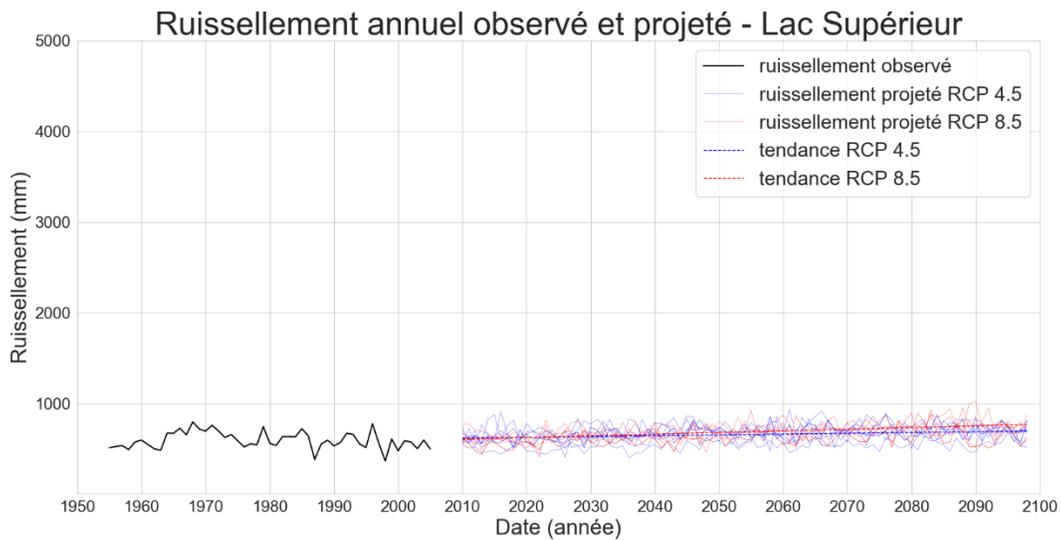


Figure 31: Variabilité du ruissellement annuel avec correction de biais du lac Supérieur, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

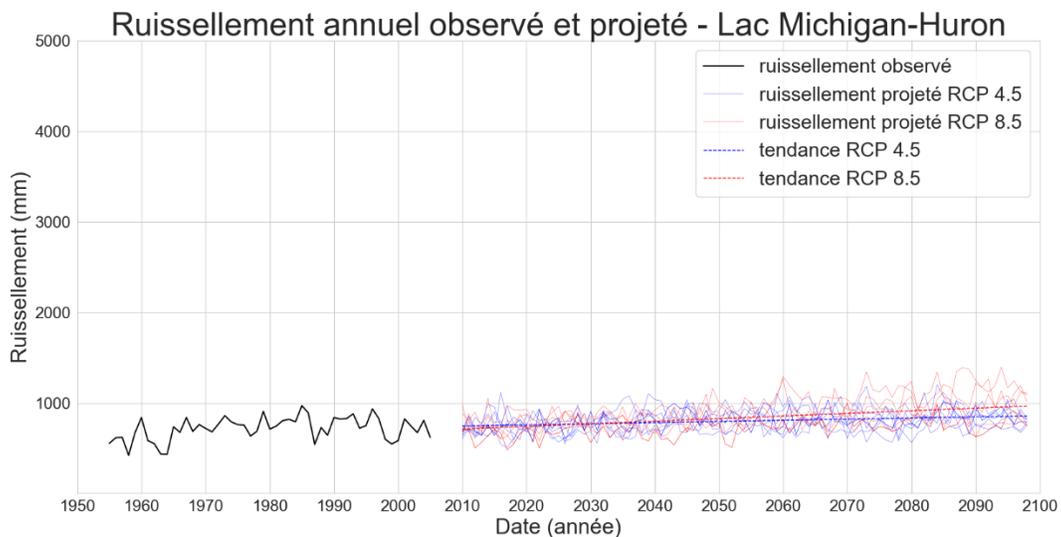


Figure 32: Variabilité du ruissellement annuel avec correction de biais du lac Michigan-Huron, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

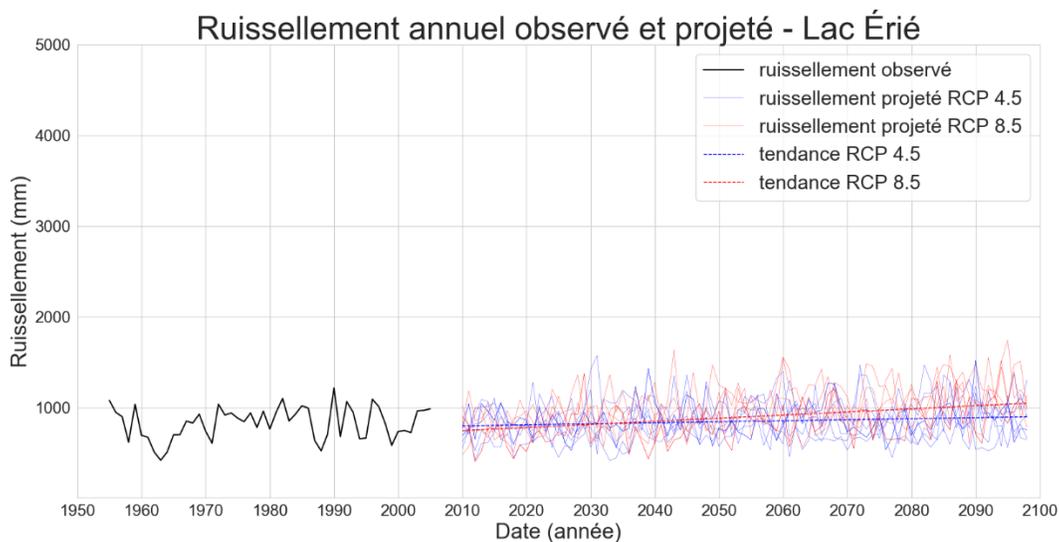


Figure 33: Variabilité du ruissellement annuel avec correction de biais du lac Érié, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

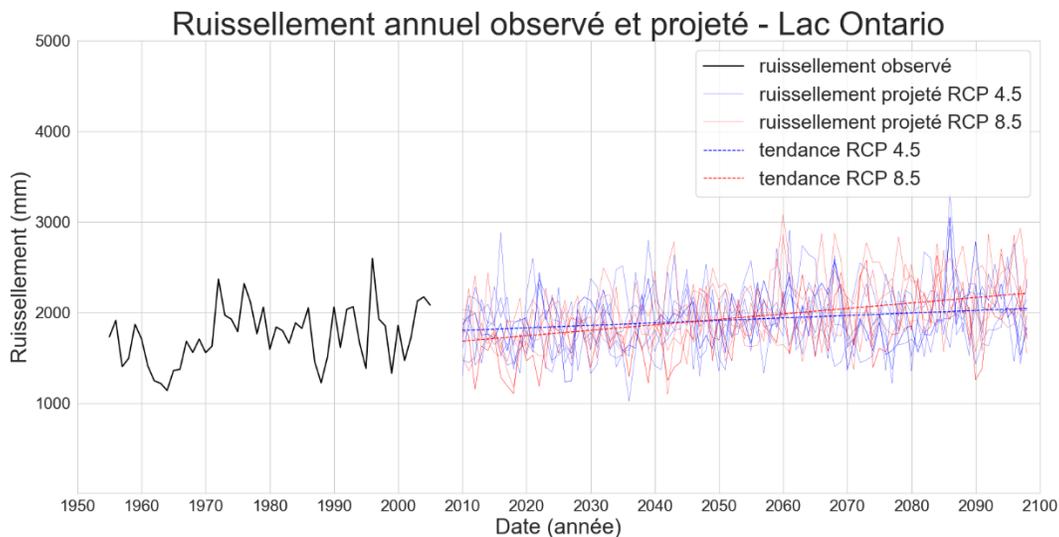


Figure 34: Variabilité du ruissellement annuel avec correction de biais du lac Ontario, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

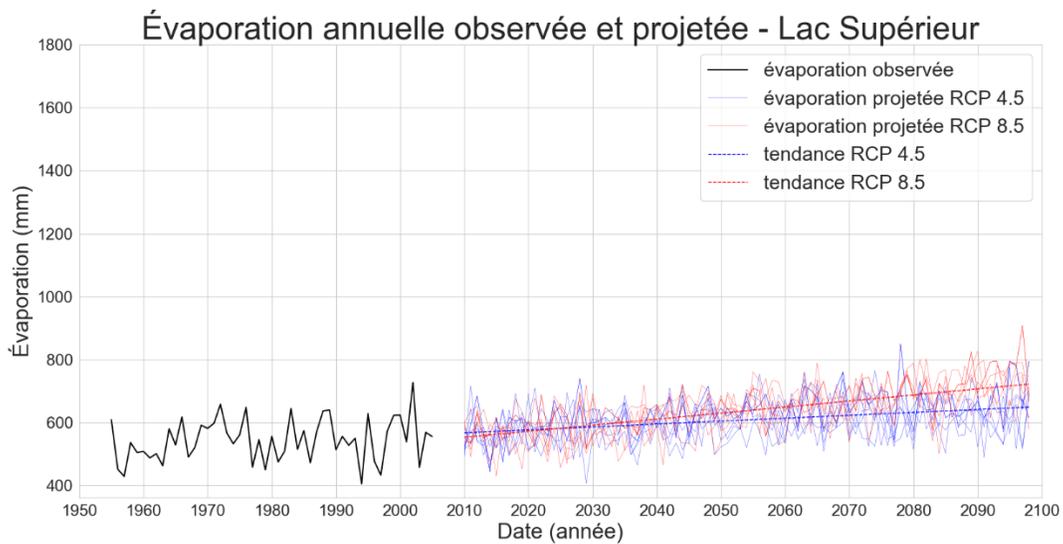


Figure 35: Variabilité de l'évaporation annuelle avec correction de biais au-dessus du lac Supérieur, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

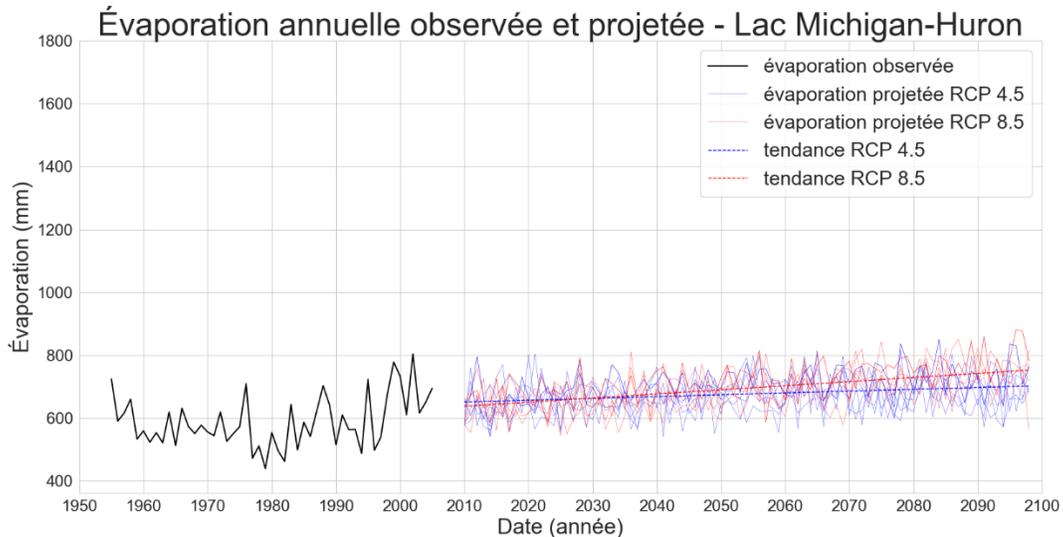


Figure 36: Variabilité de l'évaporation annuelle avec correction de biais au-dessus du lac Michigan-Huron, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

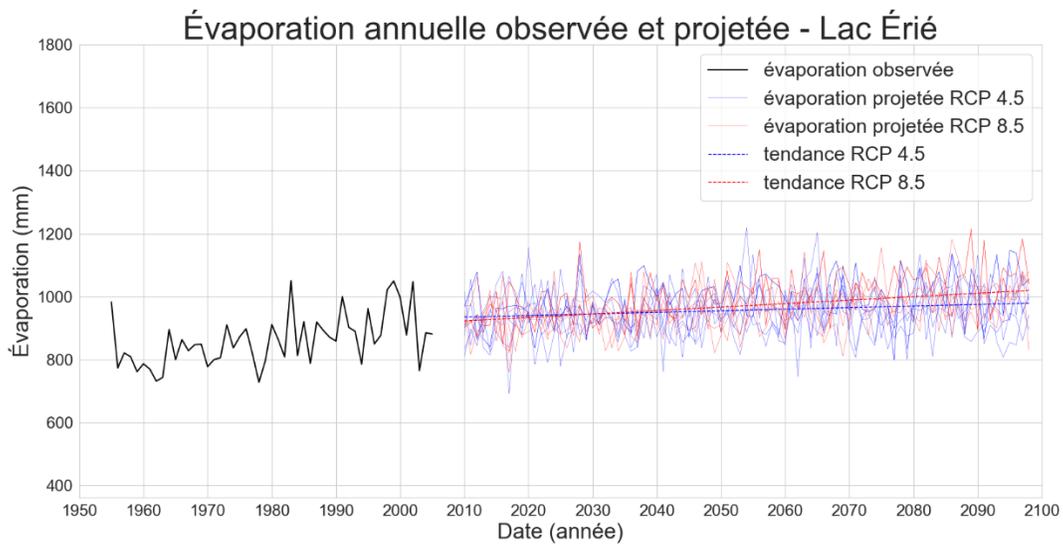


Figure 37: Variabilité de l'évaporation annuelle avec correction de biais au-dessus du lac Érié, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

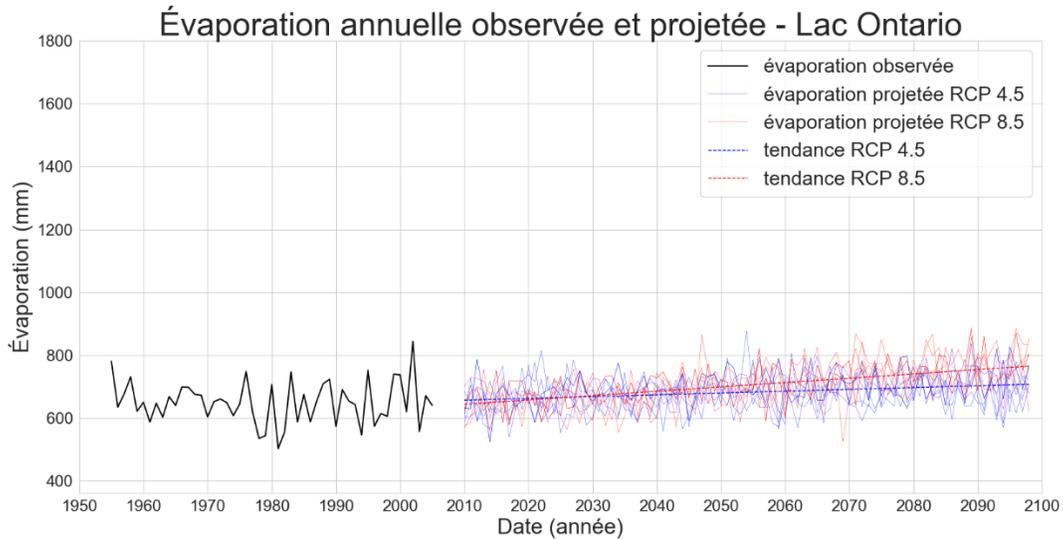


Figure 38: Variabilité de l'évaporation annuelle avec correction de biais au-dessus du lac Ontario, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, rouge ligne pointillée – tendance des projections RCP 8.5.

L'examen des valeurs annuelles uniquement, peut masquer certaines tendances saisonnières futures des variables hydroclimatiques. La prochaine série de valeurs montre les anomalies mensuelles des variables de l'apport net en eau au bassin (NBS) pour les années 2050 (2036 à 2065) par rapport à la période de référence climatique actuelle. Par souci de concision, seul es les valeurs du lac Michigan-Huron sont présentées ici, et un ensemble complet des valeurs pour tous les lacs est montré à l'annexe A.

Les graphiques ont été générés en utilisant la valeur moyenne mensuelle projetée de chaque variable du climat futur (par exemple, les précipitations au-dessus du lac pour janvier 2050) et en la comparant à la moyenne du climat actuel correspondant au même mois (dans cet exemple, la moyenne des précipitations au-dessus du lac pour tous les mois de janvier de 1961 à 2000). Il en découle une seule valeur d'anomalie, qui est ensuite appliquée aux autres années de la période à l'étude (dans cet exemple, tous les mois de janvier de la période de 2036 à 2065). Les résultats montrent la variabilité des anomalies mensuelles. Comme c'est habituellement le cas dans ces types de graphique, la ligne du centre montre la médiane, et les lignes au-dessus (rouges et bleues) représentent la fluctuation des anomalies mensuelles (faibles et élevées). Plus la plage des valeurs est large, plus la plage des différences entre les valeurs du climat actuel et futur est non négligeable.

La figure 39 montre les précipitations du lac Michigan-Huron. Des anomalies positives (c.-à-d. plus de précipitations dans le climat futur) sont observées au printemps, tandis que pour les autres lacs, les anomalies positives sont concentrées au début de l'automne et de l'hiver. Il faut également noter que, bien que la tendance annuelle des précipitations au-dessus des lacs soit plus élevée pour les valeurs futures, il y a certains mois (particulièrement à la fin du printemps et au début de l'été) où il n'y a aucune variation, voire une légère diminution des précipitations.

En ce qui concerne le ruissellement (Figure 40), les résultats suggèrent une augmentation en hiver et au début du printemps. Une telle augmentation est probablement attribuable à l'augmentation des précipitations pendant l'hiver ainsi qu'aux températures plus élevées qui entraînent plus de précipitations pluvieuses sur la neige dont la fonte augmente les quantités d'eau dans le réseau hydrographique. Les températures plus élevées entraînent également une augmentation du ruissellement printanier, puisque les températures clémentes favorisent également la diminution du manteau neigeux printanier. Dans tous les lacs, la fluctuation du ruissellement observée pendant l'été et du début de l'automne est minime.

Attendu que, l'évaporation au-dessus des lacs (Figure 41) est généralement concentrée à l'automne et en hiver, il n'est pas surprenant qu'il s'agisse également des périodes de l'année où les valeurs les plus élevées des anomalies sont observées dans le futur.

Bien qu'il y ait de légères différences enregistrées entre les lacs, les résultats pour les autres lacs sont semblables aux graphiques qui sont montrés pour le lac Michigan-Huron et ce, pour les profils RCP dans les principaux horizons temporels. Quoiqu'il en soit, l'ensemble des anomalies saisonnières des Grands Lacs est présenté à l'annexe A.

Les résultats présentés dans cette section montrent que la plage des valeurs du NBS devrait augmenter selon les projections climatiques futures. Cependant, bien qu'il soit important de comprendre comment chaque variable hydroclimatique pourrait fluctuer dans le futur, il faut connaître l'incidence sur l'apport net au bassin (NBS) de chaque lac, afin de calculer les niveaux d'eau.

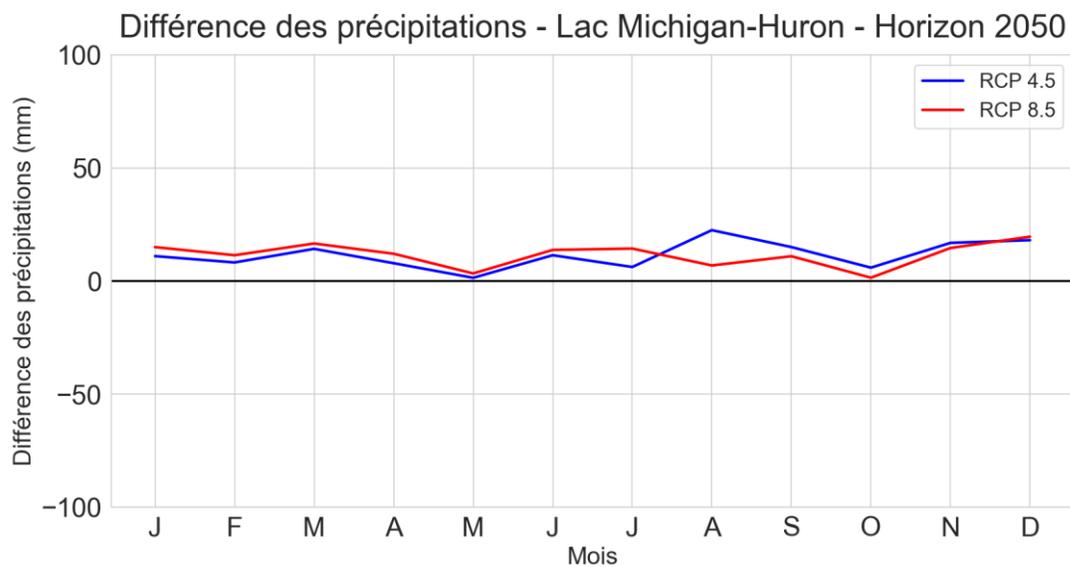


Figure 39: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Michigan-Huron.

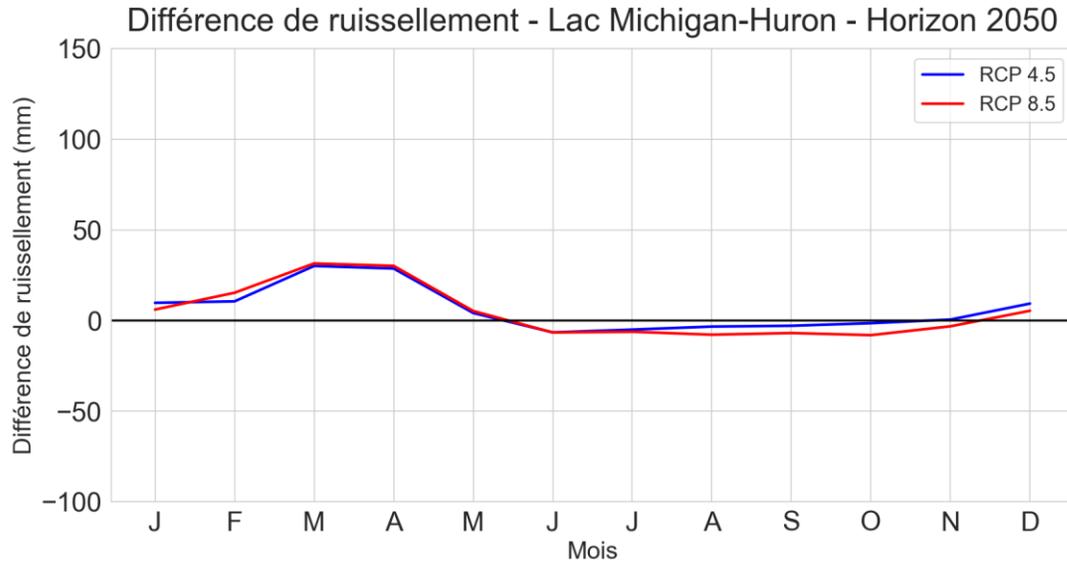


Figure 40: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Michigan-Huron.

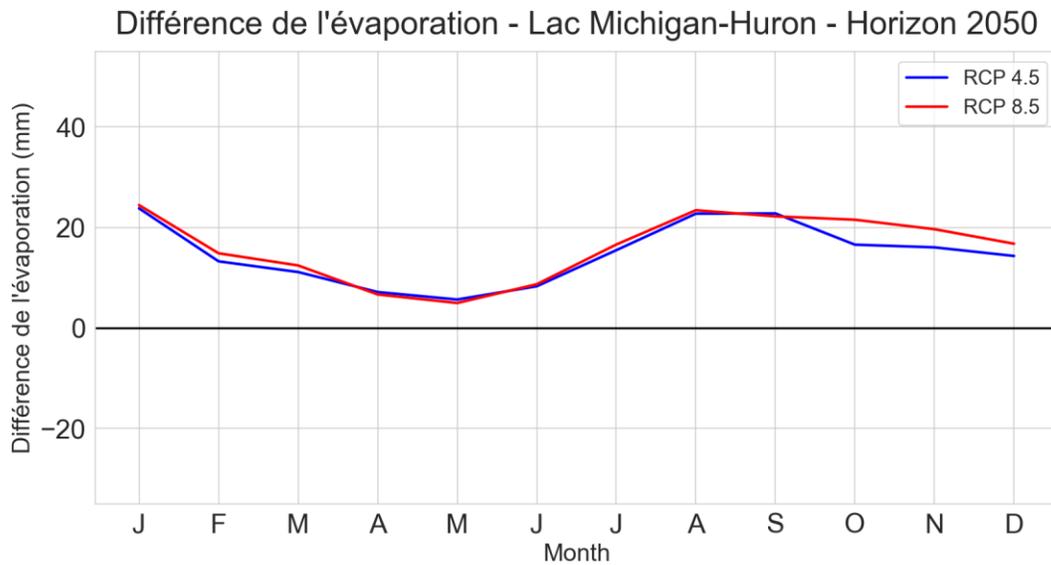


Figure 41: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Michigan-Huron.

3.1.4 Analyse de l'apport net au bassin calculé par la méthode des composantes

Il a été expliqué dans les sections précédentes comment l'apport net au bassin calculé par la méthode des composantes (NBS_c) correspond à l'approvisionnement en eau locale qui entre dans chaque lac. Le NBS_c combiné à l'apport du lac en amont et à l'écoulement en aval détermineront si le niveau d'eau du lac fluctue (augmente ou diminue). Pour cette partie de l'étude, toutes les composantes de l'apport net au bassin ont été débiaisées pour calculer les valeurs de l'apport net au bassin exempt de biais.

En examinant la variabilité des projections annuelles futures du NBS_c (Figure 42 à Figure 45), il est possible de voir que les tendances sont semblables à celles observées pour chaque variable du NBS_c mentionné dans les sections précédentes. Les tendances de la moyenne des scénarios du RCP 4.5 montrent une fois de plus, une augmentation moindre que la moyenne des scénarios du RCP 8.5. Là encore, les résultats montrent que deux scénarios distincts du RCP 8.5 projettent un NBS_c très élevé à la fin du siècle, en raison des précipitations très élevées pour ces scénarios.

La répartition saisonnière de l'NBS_c pour l'horizon 2050 du lac Michigan-Huron est présentée à la Figure 46. Cette figure semble suggérer que lorsque les anomalies saisonnières des composantes sont combinées, la tendance à l'augmentation de l'approvisionnement en eau en hiver et au début du printemps, observée pour chacune des variables n'est étonnamment pas répétée pour l'apport net au bassin. Ensuite, pendant l'été et au début de l'automne, l'apport net au bassin montre une diminution des valeurs. Les anomalies saisonnières pour les autres lacs sont présentées à l'annexe B.

Les résultats de l'analyse de l'apport net en eau au bassin calculé par la méthode des composantes indiquent une augmentation générale projetée de la valeur moyenne annuelle future. Cette augmentation étant plus importante dans le scénario RCP 8.5. Cependant, il est également important de reconnaître l'augmentation de la plage des valeurs futures projetées qui se traduit par des valeurs extrêmes.

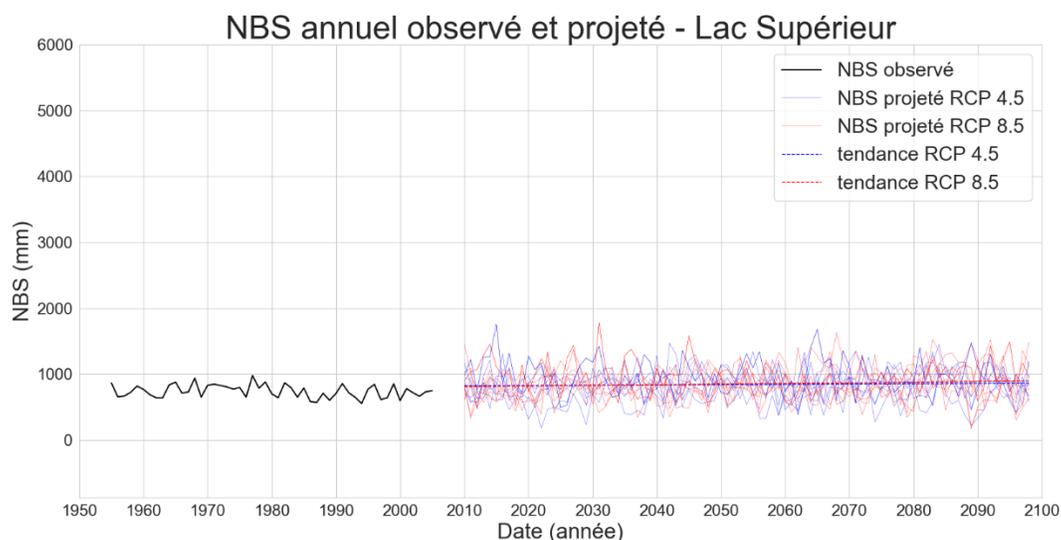


Figure 42: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Supérieur, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5.

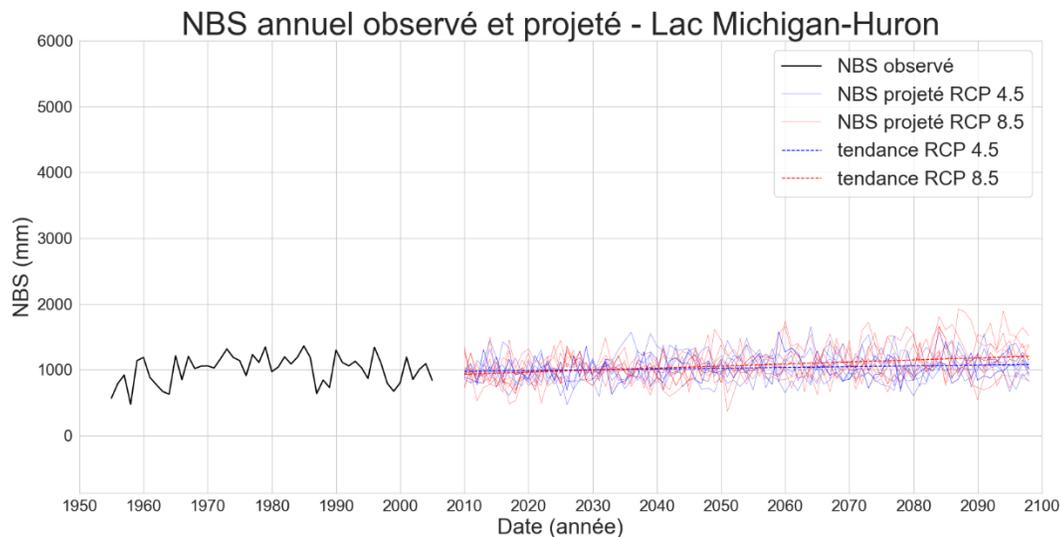


Figure 43: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Michigan-Huron, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5

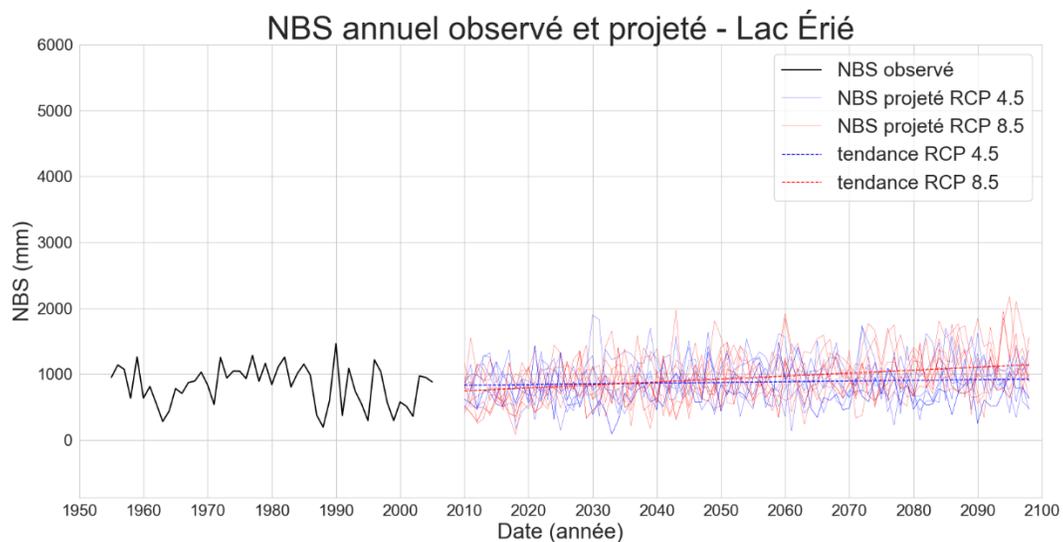


Figure 44: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Érié, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5

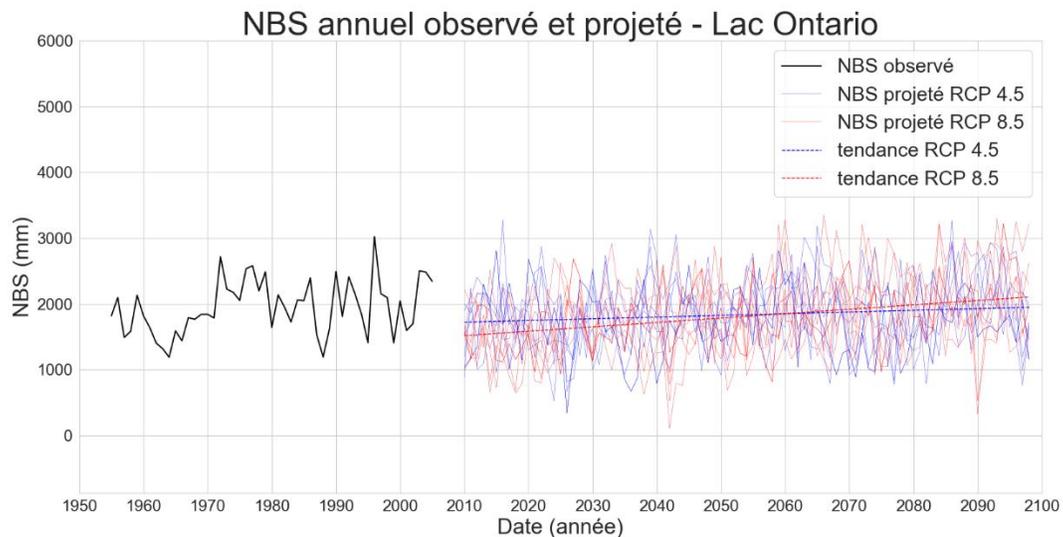


Figure 45: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Ontario, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5

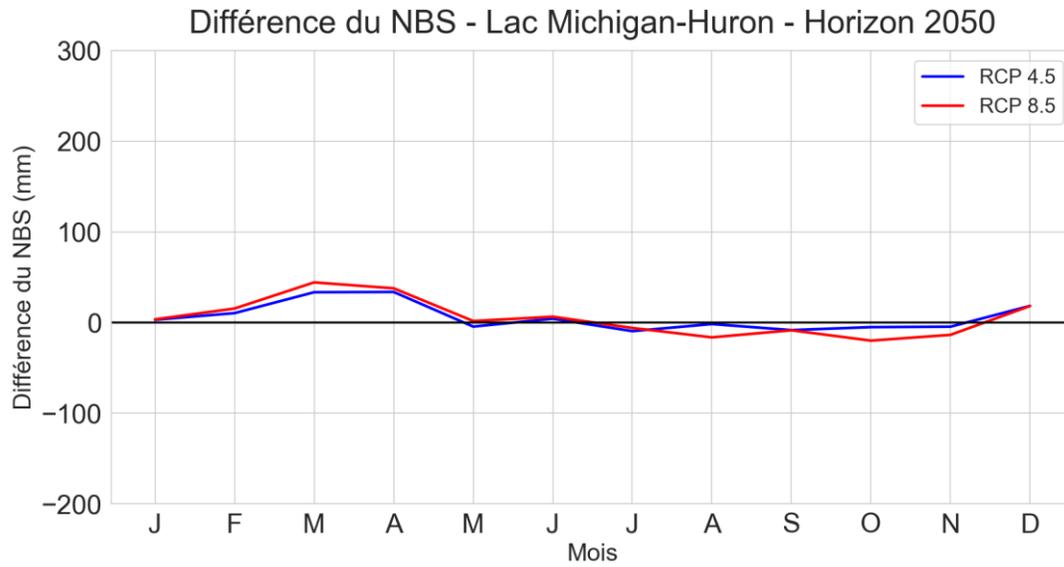


Figure 46: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Michigan-Huron.

3.2 Apport net au bassin résiduel

Une autre méthode de calcul de l'apport net en eau au bassin fait appel à la variation du stockage en eau d'un lac et à la différence entre le débit entrant et le débit sortant. Cette méthode permet d'estimer l'apport net au bassin résiduel (NBS_R).

$$NBS_R = Q_{out} - Q_{in} + \Delta S \quad (2)$$

où, NBS_R – Apport net bassin au bassin résiduel

Q_{out} – débit sortant

Q_{in} – débit entrant

ΔS – variation du stockage d'eau dans le lac (fluctue en fonction du niveau du lac)

Un ensemble de données de l'apport net au bassin résiduel a été coordonné entre les États-Unis et le Canada depuis 1900 et est accessible sur le site Web du Comité de coordination de la base de données hydrologiques et hydrauliques des Grands Lacs (www.greatlakescc.org).

Une nouvelle correction de biais a été effectuée, cette fois pour l'apport net au bassin résiduel en utilisant l'ensemble de données coordonnées de référence. Comme précédemment, la période choisie pour l'ensemble de données de référence était de 1961 à 2000.

Pareillement à l'apport net au bassin calculé par la méthode des composantes, les valeurs de l'apport net au bassin résiduel suggèrent une augmentation de la moyenne. Par conséquent, une augmentation des plages de valeurs dans le climat futur. Cependant, l'amplitude des fluctuations est différente selon le lac (Figure 47 à Figure 50). De plus, jusqu'à la fin du siècle, les scénarios du RCP 4.5 et du RCP 8.5 étaient très semblables. Ce n'est qu'à la fin du siècle que les scénarios du RCP 8.5 affichent invariablement des valeurs plus élevées.

Les anomalies saisonnières de l'apport net au bassin résiduel à l'horizon 2050 du lac Michigan-Huron sont indiquées à la Figure 51. C'est donc la différence entre l'intervalle de temps future et la période de référence du climat actuel qui est mise en évidence. Les différences les plus importantes sont observées en hiver et au début du printemps. De plus, le climat de l'avenir est plus humide comme observé précédemment dans l'analyse des résultats de l'apport net au bassin calculé par la méthode des composantes. Pendant les mois d'été, les valeurs futures du climat suggèrent une tendance plus sèche que pour le climat actuel. Cependant, l'étendue de la plage des valeurs serait moins importante dans le cas de l'apport net au bassin résiduel. Cela montre encore une fois de plus que, les valeurs du NBS dans l'ensemble sont généralement plus élevées dans les projections climatiques futures. Toutefois, il existe des périodes de l'année où la moyenne des valeurs du NBS projetées peuvent être plus faibles que celles enregistrées pendant la période de référence.

Les tendances des anomalies saisonnières pour d'autres périodes du siècle sont similaires et ce, pour tous les lacs. Cependant, elles ne sont pas présentées dans cette section. Elles sont néanmoins disponibles à l'annexe C du présent rapport pour des raisons de commodité.

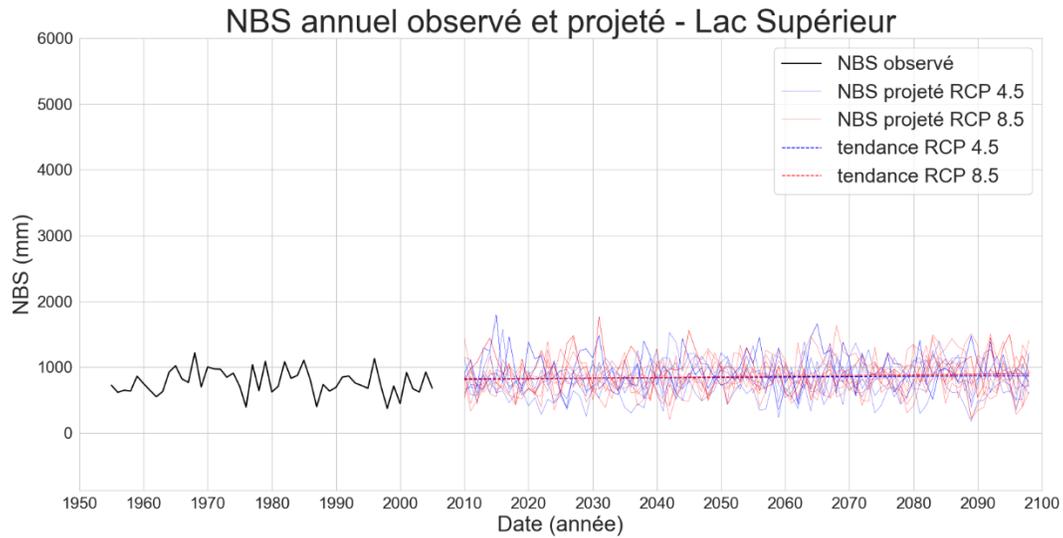


Figure 47: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Supérieur, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5

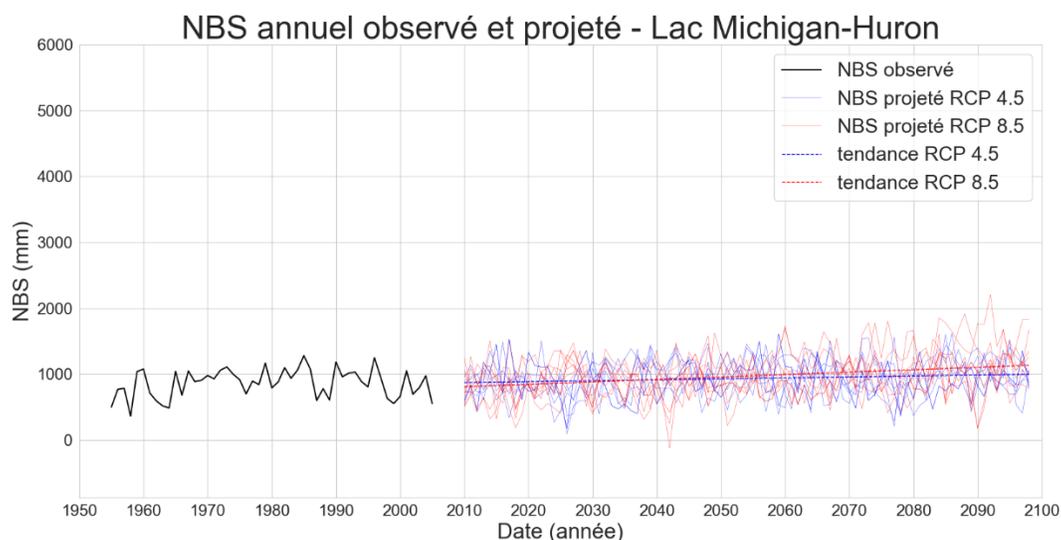


Figure 48: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Michigan-Huron, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5

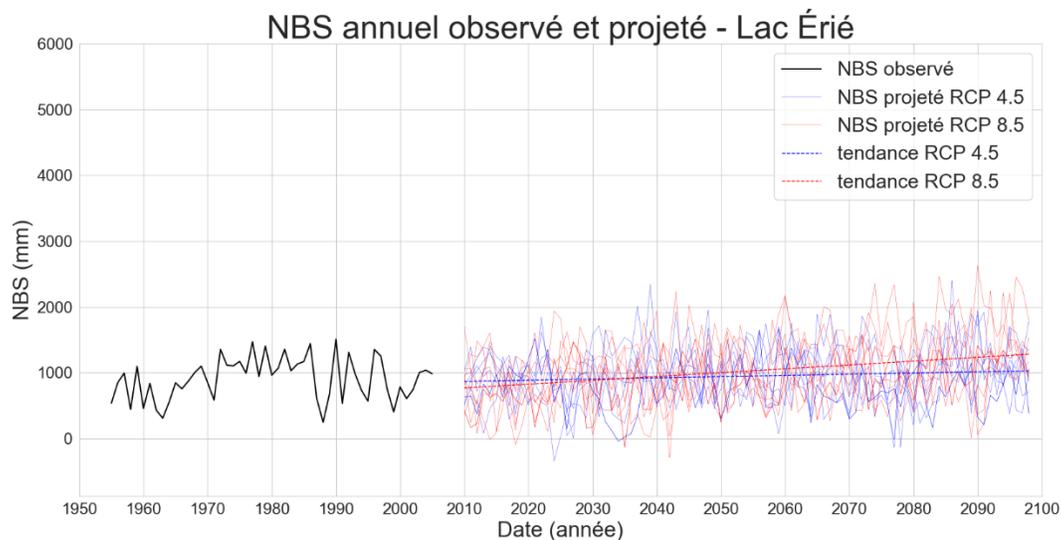


Figure 49: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Érié, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5

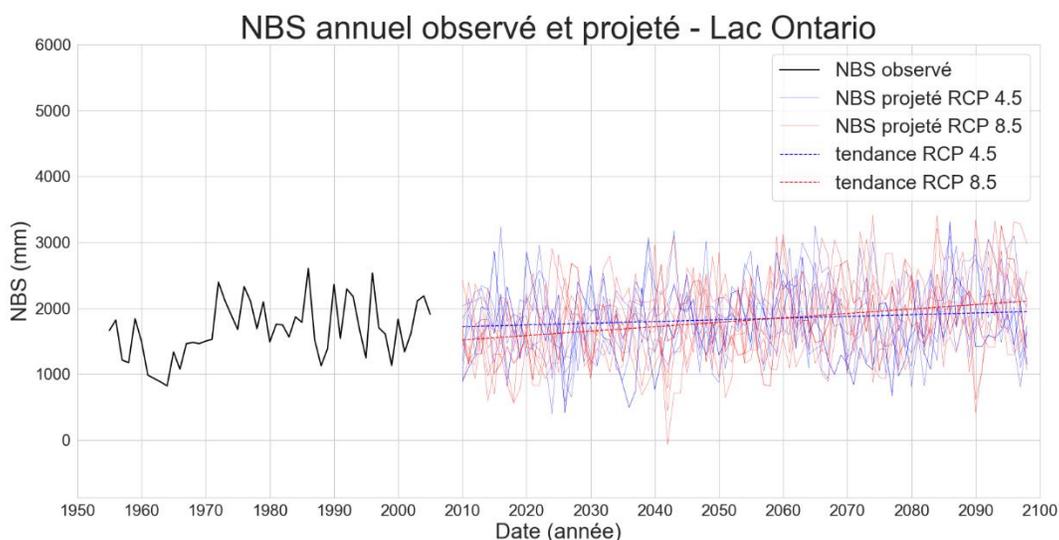


Figure 50: Variabilité annuelle de l'apport net en eau du bassin avec correction de biais (NBS) du lac Ontario, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes continues bleues – Projections du modèle RCP 4.5, lignes continues rouges – Projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5.

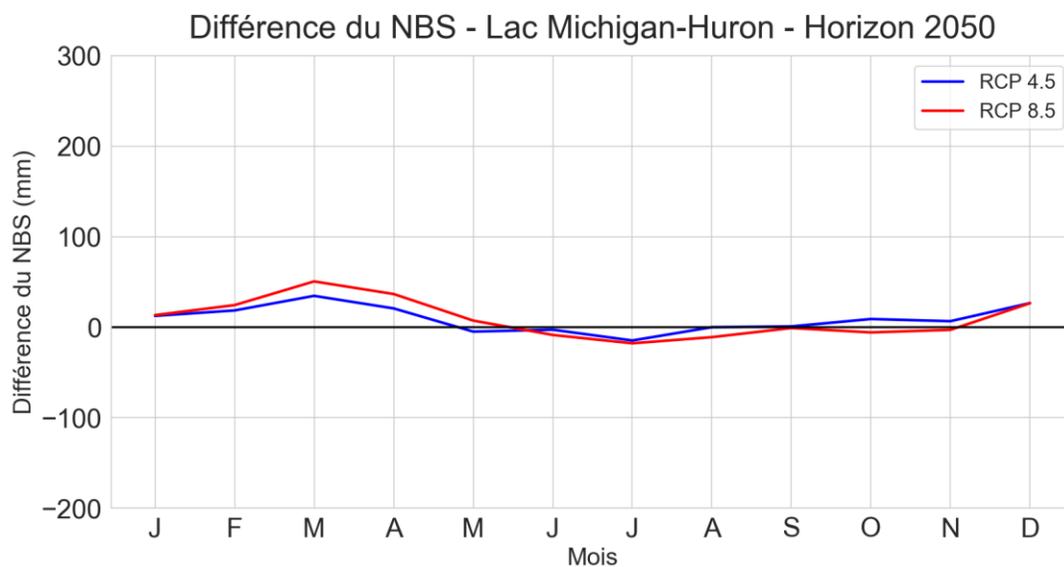


Figure 51: Figure 52: Variabilité mensuelle des anomalies du NBS résiduel à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Michigan-Huron.

3.3 Comparaison des NBS

Une comparaison a été effectuée entre les valeurs futures de l'apport net au bassin estimées par la méthode des composantes et la méthode résiduelle. Le

Tableau 2 montre que les valeurs des lacs Supérieur et Ontario sont assez proches indépendamment de la méthode de calcul utilisée (les calculs de l'apport au bassin réalisés par la méthode des composantes (NBS_C) et l'apport au bassin résiduel (NBS_R)). Dans le cas du lac Michigan-Huron, les valeurs de l'analyse du NBS_C sont généralement plus élevées que les valeurs du NBS_R , tandis que l'inverse est vrai pour le lac Érié. Dans tous les cas, les valeurs du scénario du RCP 8.5 sont plus élevées que les valeurs correspondantes aux mêmes horizons temporels du scénario du RCP 4.5. Cependant, même si les valeurs de l'horizon 2080 sont toujours plus élevées que celles de l'horizon 2050 dans le scénario du RCP 8.5, la plage des valeurs est très proche d'une période à l'autre dans le scénario du RCP 4.5.

Les tendances générales observées dans la plage des valeurs futures de l'apport net au bassin résiduel sont semblables à celles estimées par la méthode des composantes (NBS_C). Il est également possible de constater que les valeurs moyennes résultantes sont généralement semblables pour les deux méthodes invoquées ci-avant. Dès lors que l'apport net au bassin a été estimé, il peut être sélectionné comme donnée d'entrée dans les modèles hydrologiques qui sont utilisés pour calculer les niveaux futurs des lacs.

Tableau 2: Comparaison du NBS mensuel moyen projeté en mm en utilisant à la fois l'analyse de l'apport net au bassin calculé par la méthode des composantes (NBS_C) et par la méthode résiduelle (NBS_R).

Lac Supérieur		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	70.4	70.5	70.5	70.4
		78.7	78.8	82.1	81.8
Horizon 2080	Écart-type moyen	72.8	73.2	73.6	73.8
		79.9	80.2	85.7	85.8

Lac Michigan-Huron		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	88.3	80.2	86.4	77.4
		68.1	75.4	72.4	79.7
Horizon 2080	Écart-type moyen	87.3	80.4	95.8	88.6
		68.6	75.5	78.7	86.9

Lac Érié		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	76.3	82.9	76.1	81.3
		112.4	114.9	116.6	117.8
Horizon 2080	Écart-type moyen	74.3	80.3	87.6	97.3
		110.6	112.6	124.2	123.9

Lac Ontario		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	156.3	156.8	146.4	146.9
		144.4	144.5	149.8	150.1
Horizon 2080	Écart-type moyen	156.4	155.5	165.7	165.6
		147.1	146.1	162.1	162.3

4 Niveaux des lacs

Le modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs (*Coordinated Great Lakes Regulation and Routing Model*, Clites et Lee, 1998) a été utilisé pour calculer les niveaux d'eau et les débits des tributaires des lacs situés en amont du bassin des Grands Lacs (du lac Supérieur au lac Érié). Le modèle prend en compte le plan de régularisation actuel pour le lac Supérieur (appelé Plan 2012) dans le calcul des débits des tributaires, tandis que les données d'entrée principales dans le modèle sont les valeurs du NBS estimé pour chaque lac. Les résultats du modèle sont considérés probants et ont été utilisés pour simuler les niveaux d'eau des lacs. Cette approche largement utilisée en modélisation quand il est possible d'associer de façon adéquate les valeurs historiques du NBS (Clites et Lee, 1998) aux simulations des niveaux d'eau. Fait à noter, le modèle fournit des résultats pour le lac Sainte-Claire, bien que ce lac ne fasse pas partie de l'analyse du NBS vue précédemment. L'apport net au bassin du lac Sainte-Claire est donc inclus dans cette section.

Afin de calculer le débit des tributaires, il est possible de formuler dans le modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs des hypothèses sur l'écoulement des eaux de ces tributaires. Attendu que, les effets des changements climatiques sur l'écoulement des eaux ne sont pas connus, il est commun de supposer que les réseaux hydrographiques (morphologie de chenaux) demeurent stables et que les relations entre débits et hauteurs des eaux sont constantes pendant toute la période des simulations. Le modèle comporte également des paramètres ajustant le débit pour les effets de la végétation et de la glace dans le réseau hydrographique. Pour cette étude, il est supposé que les effets de la végétation et de la glace ne changeraient pas tout au long de la période de simulation. Cette hypothèse devrait être examinée plus en détails dans de futures études.

Pour le lac Ontario, un modèle de simulation du plan de régularisation distinct a été utilisé pour calculer le niveau d'eau et le débit sortant et entrant du lac Ontario en fonction des apports nets en eau. Le modèle est basé sur le Plan 2014, le plan de régularisation actuel (<https://ijc.org/sites/default/files/2019-04/Plan2014.pdf>). Ce plan prend aussi en considération, les débits de la rivière des Outaouais et d'autres affluents qui coulent dans le fleuve Saint-Laurent en aval du lac Ontario. Pour de plus amples renseignements sur la régularisation du lac Ontario, veuillez consulter le site <https://ijc.org/fr/clofsl>.

Considérant que, les niveaux des lacs ont une certaine continuité d'un mois à l'autre, le choix du niveau initial dans les modèles pourrait avoir une incidence sur les résultats de la simulation pendant quelques années. Par conséquent, les cinq premières années des simulations du niveau d'eau sont considérées comme une période de démarrage et de stabilisation du modèle et ne sont pas prises en compte dans l'analyse des résultats.

Le choix de la période de référence utilisée pour la correction de biais pourrait également avoir une incidence sur le calcul des niveaux d'eau projetés des lacs. Par exemple, si la période de référence comprend une période de faibles valeurs du NBS, les niveaux d'eau qui en découlent pour les périodes actuelles et futures seraient inférieurs à celles d'une période de référence où les valeurs du NBS sont plus élevées. Toutefois, les niveaux des lacs sont calculés comme une différence entre les niveaux d'eau des lacs futurs et ceux des lacs pendant la période de référence (1961 à 2000). Par conséquent, le choix de la période de référence ne pourrait influencer de façon significative les valeurs finales des niveaux d'eau futurs des lacs. Il faudrait approfondir les recherches sur l'impact du choix de la période de référence sur les tendances futures des niveaux d'eau des lacs, mais cela dépasse largement le cadre de cette étude.

Toutes les élévations de la présente étude sont basées sur le Système de référence (vertical) international des Grands Lacs de 1985, souvent appelé SRIGL85. Pour de plus amples renseignements sur l'historique du système de référence international des Grands Lacs, veuillez consulter le site Web suivant : <http://www.greatlakescc.org/wp36/fr/accueil/mise-a-jour-du-systeme-de-referance-international-des-grands-lacs/>

Les niveaux futurs des lacs projetés pour tous les lacs simulés en tenant compte des scénarios climatiques, et les niveaux historiques des lacs sont présentés au moyen de l'analyse de l'apport net au bassin calculé par la méthode des composantes dans les Figure 58 à Figure 62. Le même exercice appliqué précédemment est réalisé à l'aide de l'analyse de l'apport net au bassin résiduel (Figure 58 à Figure 62). Veuillez noter que toutes les figures sont générées en utilisant la même plage de valeur au niveau de l'axe des coordonnées pour faciliter la comparaison de la fluctuation des variables des différents lacs.

Ces figures montrent un large éventail de projections des niveaux d'eau futurs des lacs, dont certains sont inférieurs ou supérieurs à ceux de la période de référence. En général, la plage des valeurs augmente au fur et à mesure que les simulations avancent dans le siècle. De plus, les valeurs moyennes ont généralement tendance à augmenter dans les dernières séquences des projections.

Une comparaison des niveaux des lacs simulés par la méthode des composantes et la méthode résiduelle (3) montre que les résultats obtenus par ces deux méthodes sont assez similaires en ce qui concerne l'écart moyen et l'écart-type. Les résultats suggèrent une variation des valeurs du NBS dont la plus importante est observée à l'horizon 2080 pour le scénario RCP 8.5 (tant pour l'écart moyen que pour l'écart-type).

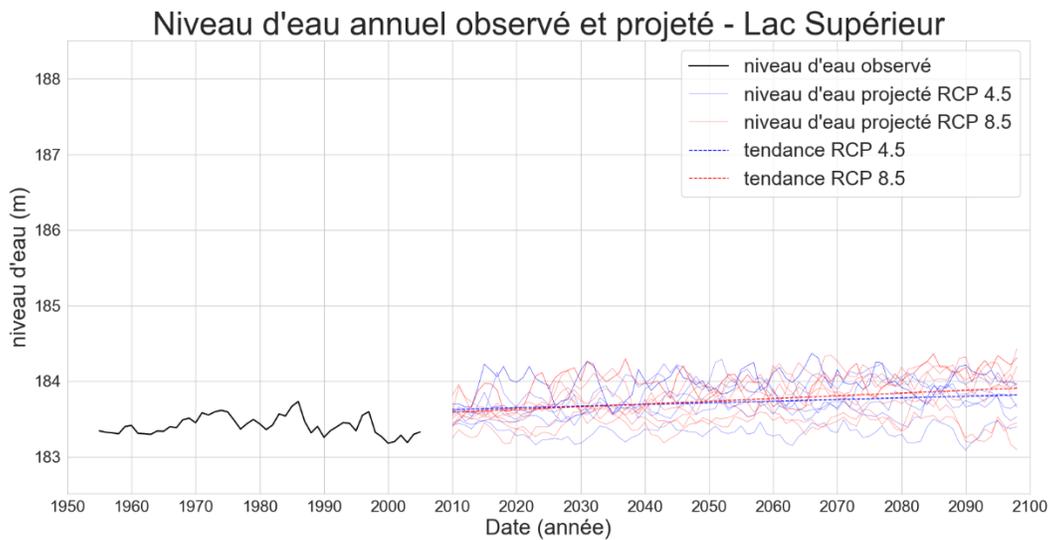


Figure 53: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Supérieur basé sur l'apport net au bassin (NBS), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

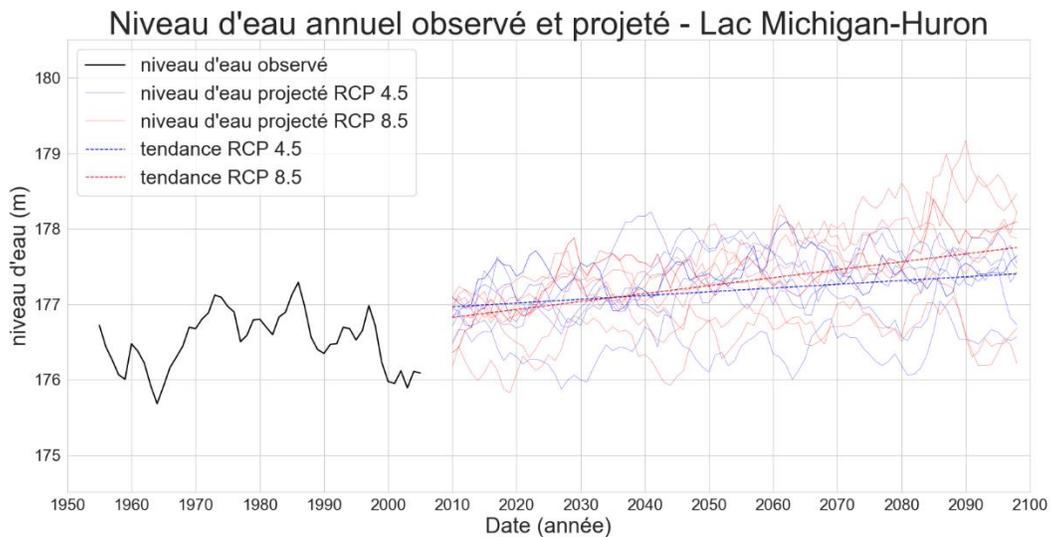


Figure 54: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Michigan-Huron basé sur l'apport net au bassin (NBS), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

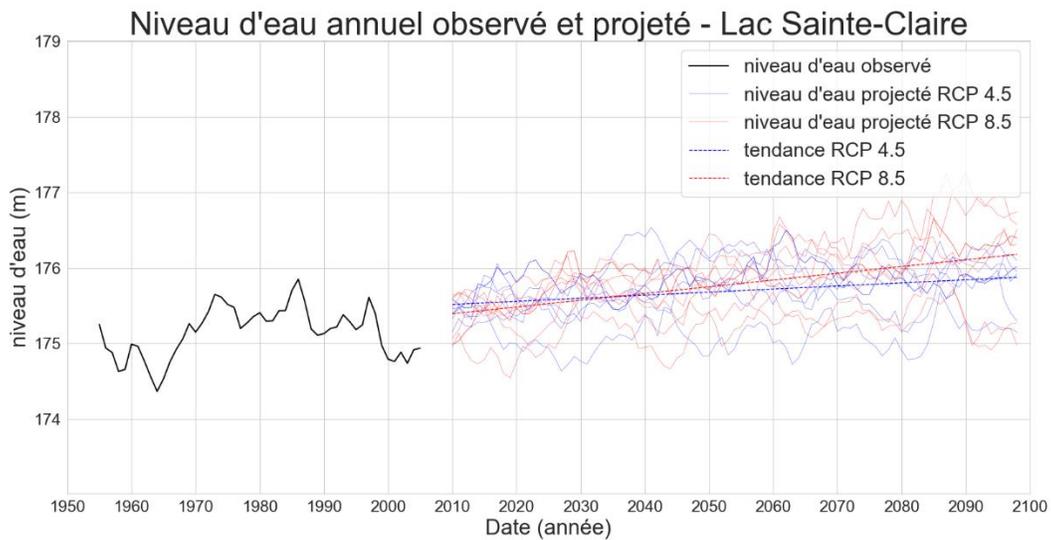


Figure 55: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac St-Clair basé sur l'apport net au bassin (NBS), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

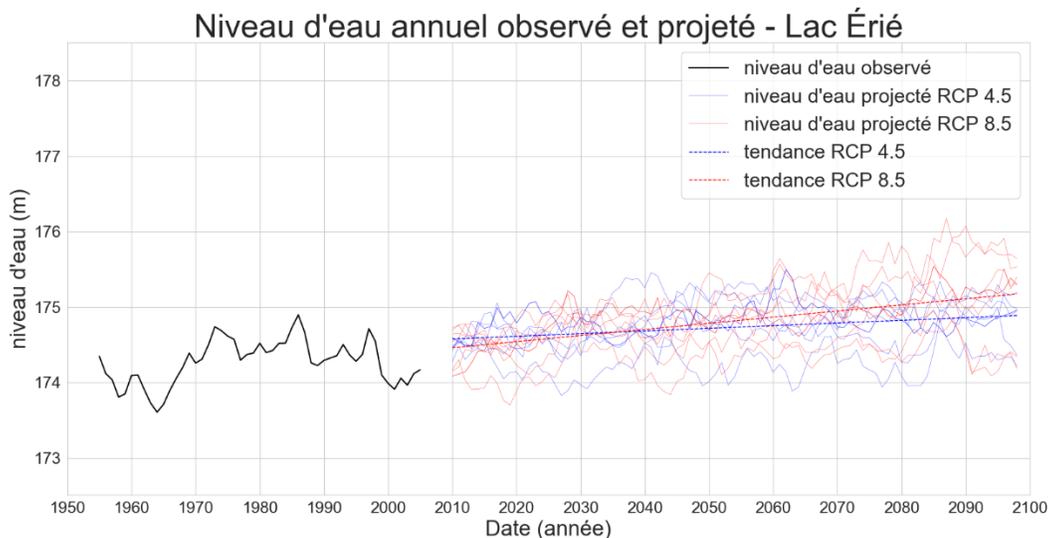


Figure 56: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Érié basé sur l'apport net au bassin (NBS), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

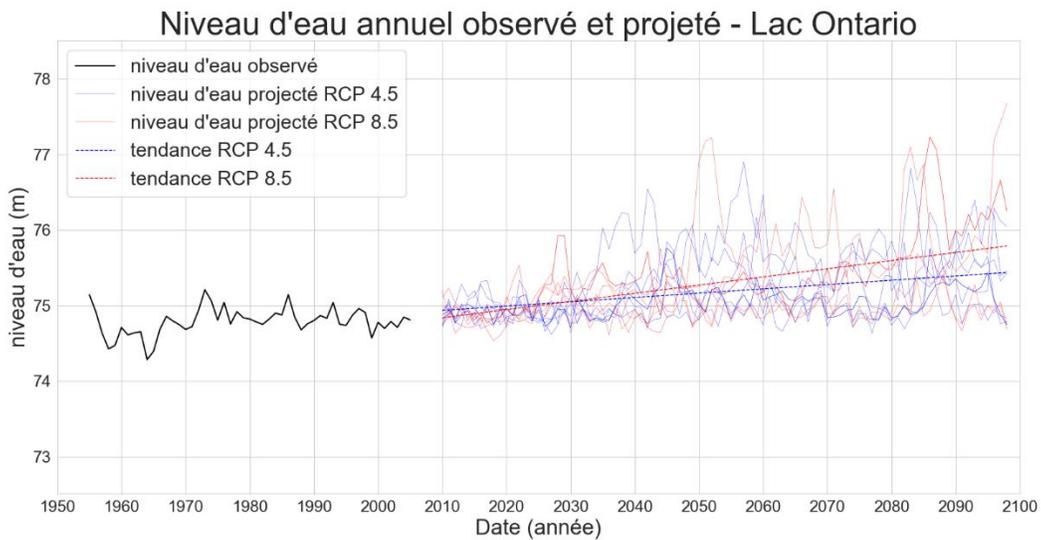


Figure 57: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Ontario basé sur l'apport net au bassin (NBS), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

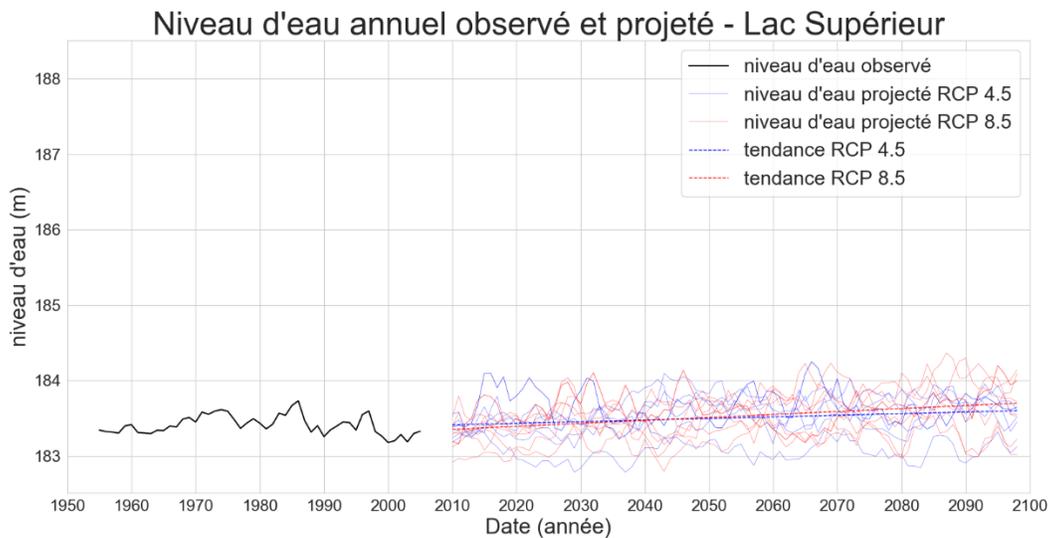


Figure 58: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Supérieur basé sur l'apport net au bassin résiduel (NBS_R), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

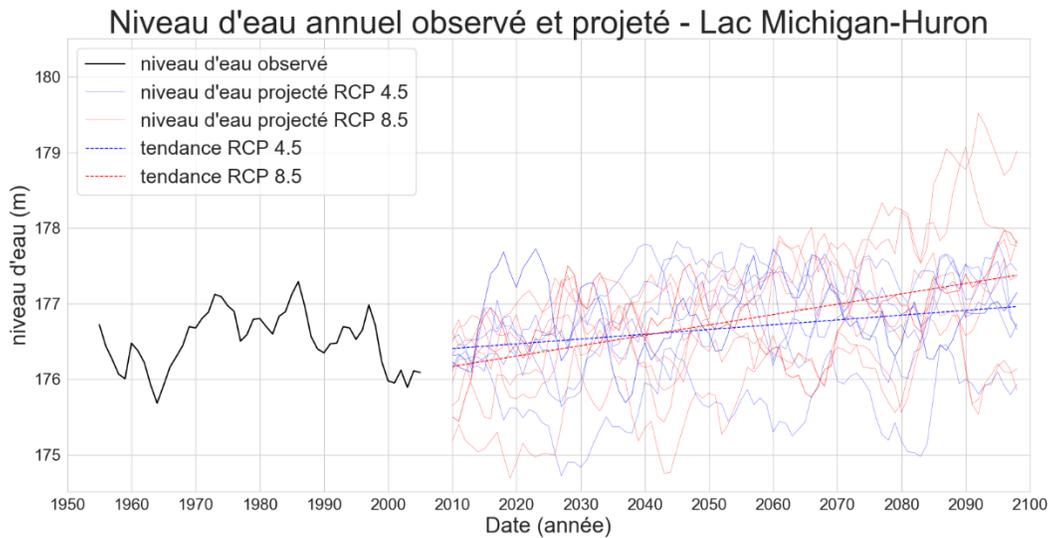


Figure 59: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Michigan-Huron basé l'apport net au bassin résiduel (NBS_R) ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

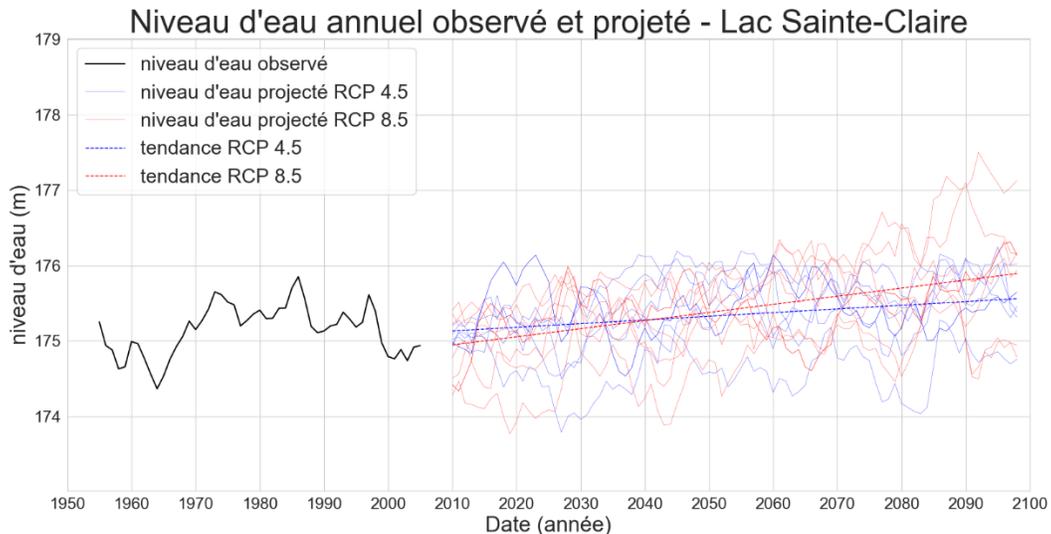


Figure 60: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac St-Clair basé sur l'apport net au bassin résiduel (NBS_R), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

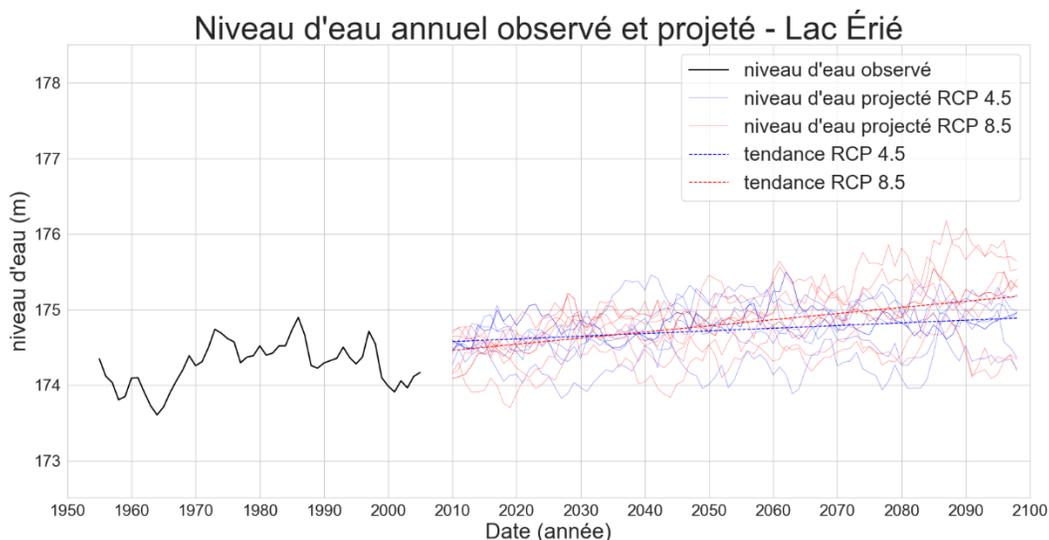


Figure 61: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Érié basé sur l'apport net au bassin résiduel (NBS_R), ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

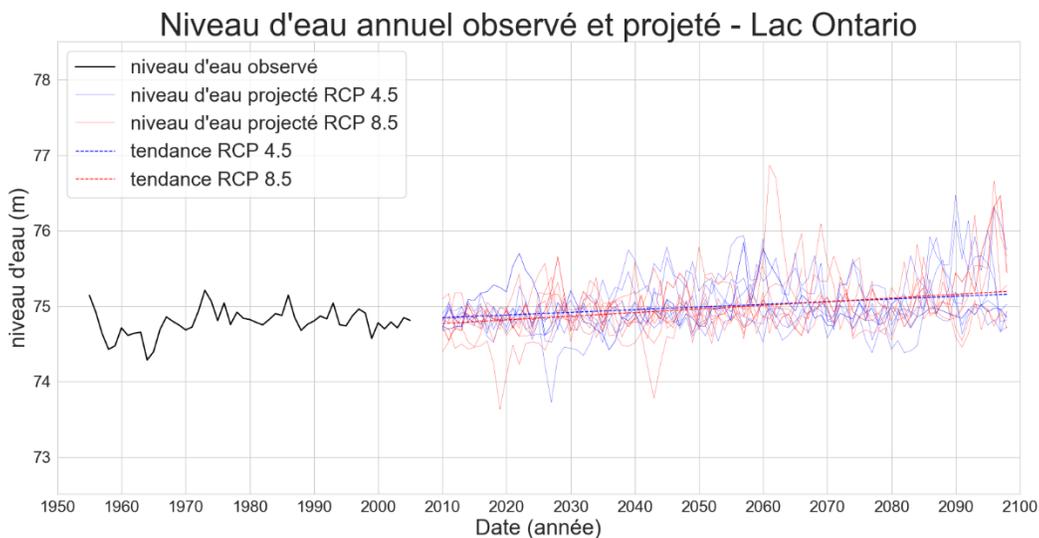


Figure 62: Variabilité des niveaux d'eau annuels du lac Ontario basé sur l'apport net au bassin résiduel, ligne noire – Base de données Hydrométriques du GLERL, lignes bleues continues – projections du modèle RCP 4.5, lignes rouges continues – projections du modèle RCP 8.5, ligne pointillée bleue – tendance des projections RCP 4.5, ligne pointillée rouge – tendance des projections RCP 8.5. Les repères des niveaux d'eau sont basés sur le système de référence international des Grands Lacs (IGLD 85).

Table 3: Comparaison des moyennes mensuelles des niveaux d'eau projetés des lacs basé sur l'analyse de l'apport net au bassin (NBS) calculé par la méthode des composantes (NBS_C) et par la méthode résiduelle (NBS_R).

Lac Supérieur		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	183.8 0.17	183.5 0.21	183.7 0.19	183.5 0.23
Horizon 2080	Écart-type moyen	183.8 0.17	183.6 0.21	183.8 0.18	183.6 0.23

Lac Michigan-Huron		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	177.3 0.29	176.8 0.45	177.2 0.29	176.7 0.43
Horizon 2080	Écart-type moyen	177.3 0.26	176.8 0.39	177.6 0.31	177.1 0.47

Lac St-Clair		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	175.8 0.26	175.4 0.36	175.7 0.25	175.3 0.35
Horizon 2080	Écart-type moyen	175.8 0.23	175.4 0.31	176.0 0.28	175.7 0.38

Lac Érié		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	174.8 0.26	174.6 0.34	174.8 0.26	174.5 0.33
Horizon 2080	Écart-type moyen	174.8 0.24	174.6 0.30	175.0 0.28	174.8 0.36

Lac Ontario		NBS _C	NBS _R	NBS _C	NBS _R
		RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
Horizon 2050	Écart-type moyen	75.3 0.38	75.0 0.38	75.3 0.58	75.0 0.38
Horizon 2080	Écart-type moyen	75.3 0.39	75.1 0.40	75.5 0.53	75.1 0.42

Il est intéressant de constater que les simulations utilisant deux projections des précipitations et de l'apport net au bassin provenant du scénario RCP 8.5 entraînent des niveaux d'eau de lac extrêmes. Ceux-ci sont les plus appréciables dans les projections des lacs Michigan-Huron et Sainte-Claire. Cependant, il est important de souligner que les résultats du présent rapport font appel à toutes les projections de climat, y compris ceux qui montrent des variations extrêmes dans le climat futur. Les variations extrêmes se produisent généralement plus tard au cours du siècle, lorsque les projections climatiques futures sont plus incertaines.

Toutefois, il n'existe aucun moyen établi ou approuvé pour évaluer la fiabilité d'un modèle climatique futur. Il est donc nécessaire de supposer que tous les modèles climatiques futurs sont plausibles. Cependant, l'analyse des séquences futures de l'apport net au bassin et du niveau d'eau des lacs, montre qu'il existe quelques scénarios de climat très humide qui peuvent compromettre la qualité de certains résultats qui semblent très extrêmes. C'est particulièrement le cas, à la fin du siècle. Certaines de ces séquences montrent des apports en eau bien supérieurs aux extrêmes observés pendant de nombreuses années consécutives, voire des décennies. Il s'agirait, en fait, d'une situation sans précédent. Puisque, les niveaux d'eau, les débits des lacs et ceux des tributaires qui en résulteraient ne seront pas compatibles avec les infrastructures actuelles du bassin des Grands Lacs.

Les hypothèses du modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs ne seraient fort probablement pas respectées si les débits extrêmement élevés résultant de certaines des projections climatiques futures devenaient une réalité. Ces modèles ont été générés en fonction des caractéristiques des débits observés dans le passé, et il n'est pas clair que les mêmes relations entre les niveaux d'eau et les débits seraient maintenues dans des conditions extrêmes.

Par exemple, le débit mensuel maximal enregistré de la rivière Détroit était de 7 680 mètres cubes par seconde en janvier 2020. Selon les résultats du modèle hydrodynamique et de régularisation coordonné pour les Grands Lacs, le débit de la rivière Détroit est supérieur à 9 000 mètres cubes par seconde pendant près de 2 ans, et pendant quelques mois il est bien supérieur à 10 000 mètres cubes par seconde. La validité du modèle hydrodynamique et de régularisation est douteuse pour ces débits, puisque les tributaires pourraient ne pas réagir de la même manière que dans le passé. Une modélisation hydraulique serait nécessaire pour évaluer les conséquences de ces débits élevés, mais cette option dépasse la portée de cette étude. Dans la mesure du possible, il serait toutefois intéressant d'envisager la prise en compte de certaines projections climatiques futures extrême dans les modèles hydrodynamiques.

Une autre source d'incertitude est la régularisation du débit sortant des lacs Supérieur et Ontario serait fort probablement modifiée si les débits entrants étaient très élevés. Par exemple, dans certains de ces scénarios extrêmes, les débits entrants du lac Ontario seraient

plus élevés que le débit sortant maximal permis par le plan de régularisation pendant des mois ou des années. Étant donné que des ajustements au plan de régularisation actuel ont été apportés en 2017 et en 2019 pendant les périodes pendant lesquelles les débits dans le réseau hydrographique sont élevés, il est possible de penser que, dans des conditions extrêmes, d'autres ajustements au plan de régularisation pourraient s'avérer nécessaires. Par conséquent, les simulations effectuées dans le cadre de cette étude basées sur les plans de régularisation actuels pourraient ne pas être valides pour quelques-uns des scénarios extrêmes. Il n'a pas été possible compléter toutes les simulations hydrologiques de tous les scénarios extrêmes au lac Ontario. Par exemple, dans le cas de certains scénarios RCP 8.5 très humides (trop de précipitation), la quantité d'eau déversée au-dessus du lac était tellement élevée que quelques simulations du lac Ontario n'ont pas pu être complétées par le modèle du Plan de régulation 2014.

D'après le Plan de régulation 2014 (<https://ijc.org/fr/glam/report-summary-2017-great-lakes-basin-conditions-and-water-level-impacts-support-ongoing>), il n'est pas recommandé d'utiliser les niveaux d'eau simulés si la moyenne du NBS sur six mois pour le lac Ontario plus le débit entrant du lac Érié est supérieure à 9 250 mètres cubes par seconde. Par conséquent, aucun résultat n'a été pris en compte dans l'analyse des résultats lorsque ce critère ne pouvait être respecté. Il convient de noter que cela n'a eu d'incidence que sur deux des projections climatiques du scénario RCP 8.5.

En se basant sur les niveaux d'eau projetés des lacs calculés par la méthode résiduelle (NBS résiduel), le tableau 4 présente les différences de niveau d'eau de chaque lac par rapport à la période de référence (1961 à 2000) pour les probabilités de dépassement suivantes : 1%, 5%, 50%, 95% et 99%. La probabilité de dépassement de 1 % peut être interprétée comme une chance de 1 %, pour une année donnée, que ce niveau d'eau commence à être dépassé, ce qui est parfois appelé le niveau de crue de 1 an sur 100 ans. Ces différences sont présentées pour les horizons temporels 2050 et 2080 des scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5.

Selon les résultats de l'analyse des niveaux des lacs, les niveaux d'eau des Grands Lacs vont varier fréquemment dans le futur. Cette fluctuation se traduira par des extrêmes de niveaux d'eau plus élevés et plus bas dans un contexte de changement climatique. De plus, dans le scénario du RCP 8.5 d'émissions plus élevées, il y a une plus grande augmentation de la plage des niveaux d'eau futurs projetés. Par conséquent, les valeurs moyennes des niveaux d'eau sont plus élevées.

Les valeurs spécifiques des niveaux d'eau futurs des lacs sont basées sur l'ensemble des données projetées disponibles au moment de cette étude. Il est donc possible d'obtenir des valeurs différentes des niveaux d'eau futurs projetés avec d'autres modèles de climat.

Cependant, les connaissances actuelles laissent présumer que les résultats obtenus avec d'autres modèles de climat seraient cohérents avec ceux de la présente étude.

Tableau 4 : Probabilité de dépassement projetée des différences de niveau moyen mensuel des lacs en mètres par rapport à la période de référence (1961 à 2000) pour les horizons temporels 2050 et 2080 des scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5.

Lac Supérieur

Pourcentage de dépassement	Observée (1961-2000)	Horizon 2050		Horizon 2080	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	0.38	0.55	0.57	0.57	0.72
5	0.30	0.44	0.43	0.47	0.57
50	0.00	0.09	0.06	0.12	0.19
95	-0.29	-0.27	-0.31	-0.22	-0.20
99	-0.36	-0.39	-0.45	-0.34	-0.31

Lac Michigan-Huron

Pourcentage de dépassement	Observée (1961-2000)	Horizon 2050		Horizon 2080	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	0.78	1.03	0.96	1.01	1.51
5	0.59	0.88	0.77	0.84	1.27
50	0.00	0.19	0.07	0.22	0.53
95	-0.71	-0.57	-0.69	-0.40	-0.25
99	-0.98	-0.76	-0.87	-0.55	-0.44

Lac Sainte-Claire

Pourcentage de dépassement	Observée (1961-2000)	Horizon 2050		Horizon 2080	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	0.63	0.90	0.86	0.92	1.28
5	0.54	0.76	0.69	0.74	1.06
50	0.00	0.21	0.12	0.22	0.48
95	-0.66	-0.41	-0.49	-0.29	-0.16
99	-0.99	-0.58	-0.65	-0.44	-0.33

Lac Érié

Pourcentage de dépassement	Observée (1961-2000)	Horizon 2050		Horizon 2080	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	0.65	0.92	0.90	0.94	1.23
5	0.51	0.78	0.71	0.75	1.06
50	0.00	0.24	0.16	0.24	0.48
95	-0.58	-0.33	-0.40	-0.26	-0.11
99	-0.86	-0.50	-0.57	-0.42	-0.30

Lac Ontario

Pourcentage de dépassement	Observée (1961-2000)	Horizon 2050		Horizon 2080	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	0.79	1.31	1.25	1.41	1.45
5	0.49	0.96	0.88	0.99	1.08
50	0.00	0.25	0.17	0.26	0.33
95	-0.43	-0.31	-0.37	-0.32	-0.26
99	-0.79	-0.44	-0.56	-0.46	-0.37

5 Conclusions et perspectives

Dans le courant des dernières décennies, une augmentation générale des précipitations et de l'évaporation à la surface des lacs a été observée. Cette tendance à la hausse pourrait se poursuivre sous l'influence des changements climatiques futurs selon les conclusions de la présente étude. Les extrêmes de niveaux d'eau (hauts et bas) pourraient également être plus importants dans les années à venir que ceux historiquement observés, avec une probabilité variable selon la période future considérée.

La conclusion centrale de cette étude recoupe le message précédemment véhiculé par des études antérieures, à savoir une augmentation de la variabilité interannuelle et de l'amplitude des niveaux d'eau extrêmes dans le futur. Ces extrêmes sont d'autant plus importants que le scénario d'émission de carbone considéré est élevé, ce qui est le cas de la trajectoire d'émission propre au RCP 8.5 qui prévoit une très forte augmentation du forçage radiatif d'ici 2100 (comparativement à RCP 4.5).

Deux méthodes distinctes ont été utilisées pour estimer l'apport net au bassin: la méthode dite des composantes et la méthode résiduelle. Dans les deux cas, les résultats obtenus, que ce soit sur le plan des apports nets au bassin ou des niveaux futurs projetés, se sont avérés similaires sur le plan des tendances générales au moment de cette étude.

Il importe de rappeler que les projections produites pour les variables hydroclimatiques et les niveaux moyens reposent sur la compréhension actuelle du système climatique et les hypothèses à l'origine de la création des trajectoires d'émission, qui demeurent largement incertaines. Les projections finales sont donc sujettes à plusieurs sources d'incertitude, lesquelles touchent soit la variabilité naturelle du système, l'incertitude liée aux modèles ou l'incertitude associée à la trajectoire d'émission (Latif, 2011). Une évaluation complète de ces incertitudes dépasse la portée de cette étude. Néanmoins, et compte tenu de ces dernières, les projections futures obtenues devraient servir à évaluer les tendances futures et leur probabilité plutôt que prédire des niveaux d'eau pour une période donnée.

De même, il importe de considérer avec précaution les niveaux d'eau extrêmes projetés selon cette étude par un petit nombre de simulations. Quelques projections sont associées à des précipitations particulièrement élevées et persistantes, lesquelles engendrent des niveaux d'eau nettement supérieurs à tout ce qui a été observé par le passé. Ces niveaux sont associés au scénario de carbone élevé (RCP 8.5) et se produisent essentiellement vers la fin du siècle. L'importance statistique de ces réalisations et leur réalisme physique n'ont pas été évalués dans le cadre de cette étude, comme ce travail dépasse le cadre des objectifs fixés. Néanmoins, des travaux additionnels devraient être entrepris pour éclaircir ces points.

Enfin, la poursuite des travaux devrait se concentrer sur les causes à l'origine des différences observées entre les projections ici obtenues en termes de niveaux moyens et les projections présentées par d'autres études, qu'elles soient actuelles ou passées en accordant une attention particulière aux modèles des lacs. Une analyse plus approfondie de la variabilité future devrait également être entreprise pour l'ensemble des variables directement produites par les modèles régionaux de la matrice NA-CORDEX, incluant celles non exploitées par cette étude (c.-à-d. vitesse des vents, couverture de glace, évaporation à la surface des terres, etc.), ainsi que celles dérivées du modèle hydrologique (p. ex., équivalent en eau de la neige, teneur en eau du sol, écoulement fluvial). Puisqu'un nouvel ensemble de simulations climatiques sera disponible au cours des prochaines années grâce aux travaux du CMIP6, il sera intéressant de mettre à jour les projections, et ainsi préciser les tendances.

Les projections obtenues pour les niveaux moyens des Grands Lacs ont été fournies aux autres équipes qui œuvrent à l'Initiative de Protection des Grands Lacs. Ces projections ont servi à forcer des modèles écohydrauliques dans le but de quantifier l'impact des changements climatiques sur les milieux humides côtiers, ainsi qu'évaluer la vulnérabilité de ces derniers aux modifications anticipées du climat. Les résultats de ces volets de l'IPGL sont présentés dans des rapports distincts. Néanmoins, l'utilité des projections de niveaux d'eau présentées dans ce document va au-delà l'étude de la vulnérabilité des écosystèmes côtiers. Ces projections peuvent servir à guider et planifier les projets de développement ou la création d'activités dans le bassin des Grands Lacs, particulièrement en ce qui a trait à la considération des extrêmes qui risquent d'être plus importants dans l'avenir.

6 Remerciements

Armin Dehghan, d'Environnement et Changement climatique Canada, qui a effectué un premier examen d'un sous-ensemble de données. Une partie de ce travail est la suite du travail qu'elle a commencé. Nous remercions OURANOS d'avoir fourni ses données du CRCM5 pour cette analyse. Diverses personnes ont examiné les versions de ce rapport. Nous les remercions de leurs commentaires et de leurs connaissances. Nous tenons à remercier tout particulièrement Yin Fan d'avoir généré de nombreuses séries du modèle de régularisation du lac Ontario et Alex Cannon pour avoir fourni le code utilisé pour la correction de biais.

7 Références

- Acreman, M.C., J.R. Blake, D.J. Booker, R.J. Harding, N. Reynard, J.O. Mountford, C.J. Stratford, 2009. A simple framework for evaluating regional wetland ecohydrological response to climate change with case-studies from Great Britain. *Ecohydrology*, 2 (1), pp. 1-17, 10.1002/eco.v2:110.1002/eco.37
- Angel, JR., KE. Kunkel, 2010. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *J Great Lakes Res* 36:51–58.
- Cannon, A., 2016. Multivariate Bias Correction of Climate Model Output: Matching Marginal Distributions and Intervariable Dependence Structure. *Journal of Climate* 29:7045–7064. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0679.1.
- Christensen, J.H., F. Boberg, O.B. Christensen, and P. Lucas-Picher, 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L20709. DOI:10.1029/2008GL035694.
- Clites, A. H., and D. H. Lee, 1998. MIDLAKES: A coordinated hydrologic response model for the middle Great Lakes. NOAA Tech. Rep. ERL GLERL-109, 48 pp.
- Croley, T.E., 1990. Laurentian Great Lakes double-CO₂ climate change hydrological impacts. *Climatic Change* 17:27–47.
- ELPC, 2019. An assessment of the Impacts of Climate Change on the Great Lakes. Environment Law and Policy Center. 70 pp.
- Giorgi, F., C. Jones, G. Asrar, 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull* 58:175–183.
- Hartmann, H. C., 1990. Climate change impacts on Laurentian Great Lakes levels. *Climatic Change*, 17, 49–67, doi:10.1007/BF00149000.
- Hayhoe, K., VanDorn J., Croley IIT., Schlegal N., Wuebbles D., 2010. Regional climate change projections for Chicago and the US Great Lakes. *J Great Lakes Res* 36:7–21.
- Hunter, T.S., A.H. Clites, K.B. Campbell, and A.D. Gronewold, 2015. Development and application of a North American Great Lakes hydrometeorological database - Part I: Precipitation, evaporation, runoff, and air temperature. *Journal of Great Lakes Research* 41:1, pp. 65-77.

- Kouwen, N., Soulis, E. D., Pietroniro, A., Donald, J., and Harrington, R. A., 1993. Grouping Response Units for Distributed Hydrologic Modelling, *ASCE J. Water Resour. Manage. Planning*, 119(3), 289–305.
- Krinner, G., Kharin, V., Roehrig, R. et al., 2020. Historically-based run-time bias corrections substantially improve model projections of 100 years of future climate change. *Commun Earth Environ* 1, 29. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00035-0>.
- Latif M., 2011. Uncertainty in climate change projections, *Journal of Geochemical Exploration*, 110(1), 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.011>.
- MacKay, M., F. Seglenieks, 2013. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change. *Clim Chang* 117:55–67.
- Martynov, A., R. Laprise, L. Sushama, K. Winger, L. Šeparović, and B. Dugas, 2013. Reanalysis-driven climate simulation over Cordex North America domain using the Canadian regional climate model, version 5: Model performance evaluation, *Clim. Dyn.*, 41, 2973–3005.
- McDermid, J., Fera, S., and Hogg, A., 2015. Climate change projections for Ontario: An updated synthesis for policymakers and planners. *Climate Change Research Report CCRR-44*, Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, 40 p.
- Mironov, D.V., 2008. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. COSMO Technical Report, No. 11, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany.
- Morin, J., K. Turgeon, S. Martin & O. Champoux, 2006. Modelling changes in aquatic plant communities and wetlands of the Saint-Lawrence River, p : 40-52 In *Water availability issues for the St. Lawrence River : An environmental synthesis*. Tabot A. (ed) Environment Canada. Montreal 204 p.
- Mortsch, L. and F. H. Quinn, 1996. Climate change scenarios for Great Lakes basin ecosystem studies. *Limnol. Oceanogr.*, 41, 903–911, doi:10.4319/lo.1996.41.5.0903.
- Mortsch, L.D., 2006. Impact of climate change on agriculture, forestry and wetlands. J. Bhatti, R. Lal, M. Apps, M. Price (Eds.), *Climate change and managed ecosystems*, Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, FL, USA (2006), pp. 45-67
- Piani, C., J.O. Haerter, and E. Coppola, 2010. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99, 187–192. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>.

Pietroniro, A., V. Fortin, N. Kouwen, C. Neal, R. Turcotte, B. Davison, D. Versegny, E. D. Soulis, R. Caldwell, N. Evora, and P. Pellerin, 2007. Development of the MESH modelling system for hydrological ensemble forecasting of the Laurentian Great Lakes at the regional scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 2007, 11 (4), pp.1279-1294.

Reichler, T., and J. Kim, 2008. How well do coupled models simulate today's climate? *Bulletin of the American Meteorological Society* 89: 303–311.

Smith, J. B., 1991: The potential impacts of climate change on the Great Lakes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 21–28, doi:10.1175/1520-0477(1991)072<0021:TPIOCC>2.0.CO;2.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, and G.A. Meehl, 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93: 485–98.

Teutschbein, C. and J. Seibert, 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, Vol 456-457, Pp 12-29. Doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

Wijayarathne, DB., Coulibaly P., 2020. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. *J Hydrol Regional Stud* 27:100646. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100646>.

Willkofer, F., F.-J. Schmid, H. Komischke, J. Korck, M. Braun, and R. Ludwig, 2018. The impact of bias correcting regional climate model results on hydrological indicators for Bavarian catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 19, Pages 25-41, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.06.010>.

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
AQEGL Lacs	Accord Canada–États-Unis relatif à la qualité de l’eau dans les Grands Lacs
CMIP	Projet d’intercomparaison de modèles couplés
CORDEX-NA	Coordinated Regional Downscaling Experiment – North America
CRCM5	Version 5 du grand ensemble du modèle régional canadien du climat
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
GLERL	Great Lakes Environmental Research Laboratory
IPGL	l’Initiative de protection des Grands Lacs
MCG	Modèles de circulation générale
MCR	Modèles de circulation régionale
NBSC	l’apport net au bassin composantes
NBSR	l’apport net au bassin résiduel
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MPI-ESM	Max Planck Institute Earth System Model
RCP représentatives)	Representative Concentration Pathways (voies de concentration représentatives)
SRIGL85	Système de référence (vertical) international des Grands Lacs de 1985
SHN	Services hydrologiques nationaux

Annexe A: Anomalies saisonnières des variables du NBS

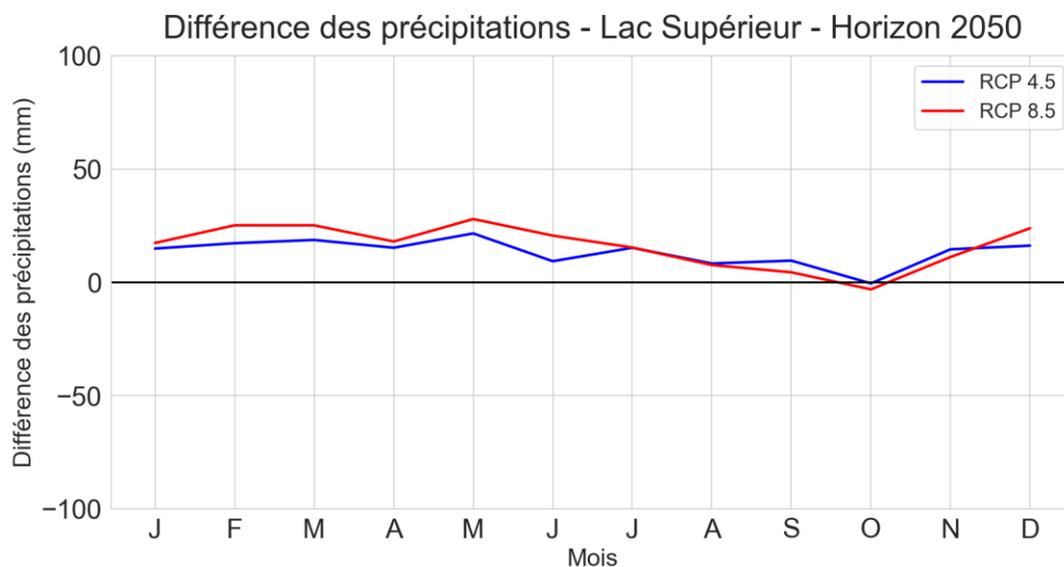


Figure A-1: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Supérieur.

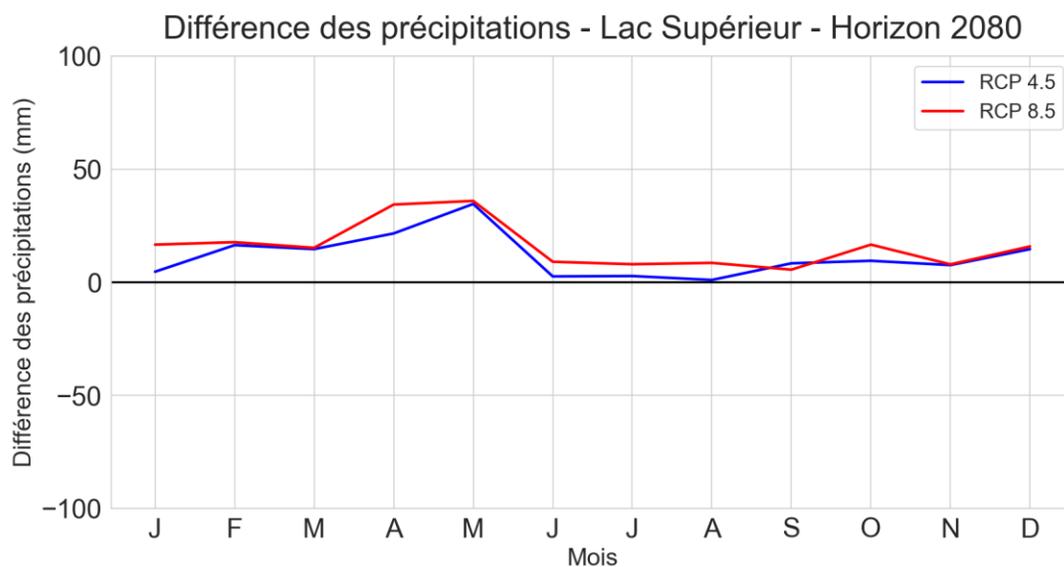


Figure A-2: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Supérieur.

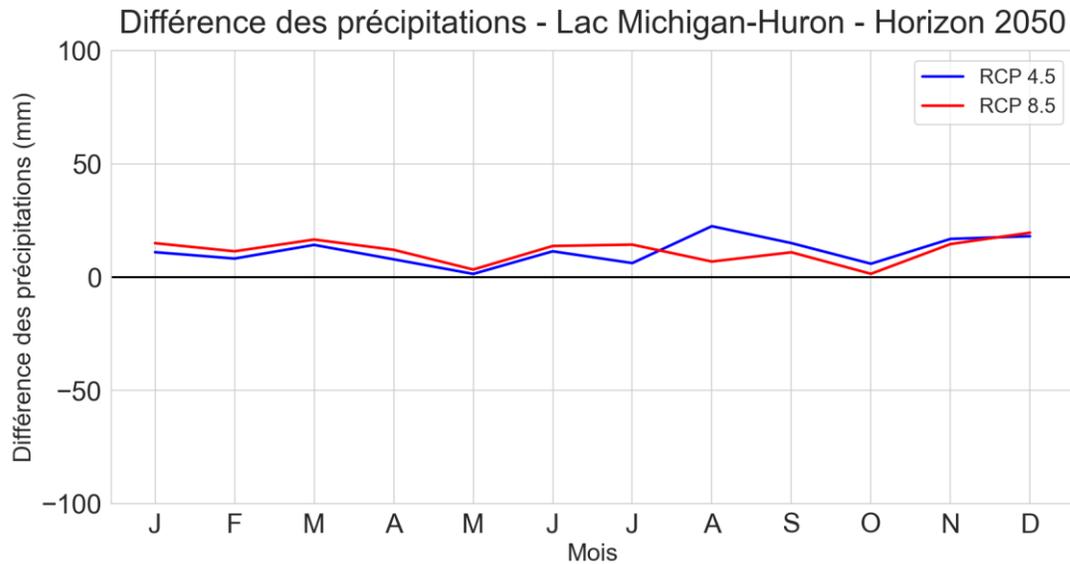


Figure A-3: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Michigan-Huron.

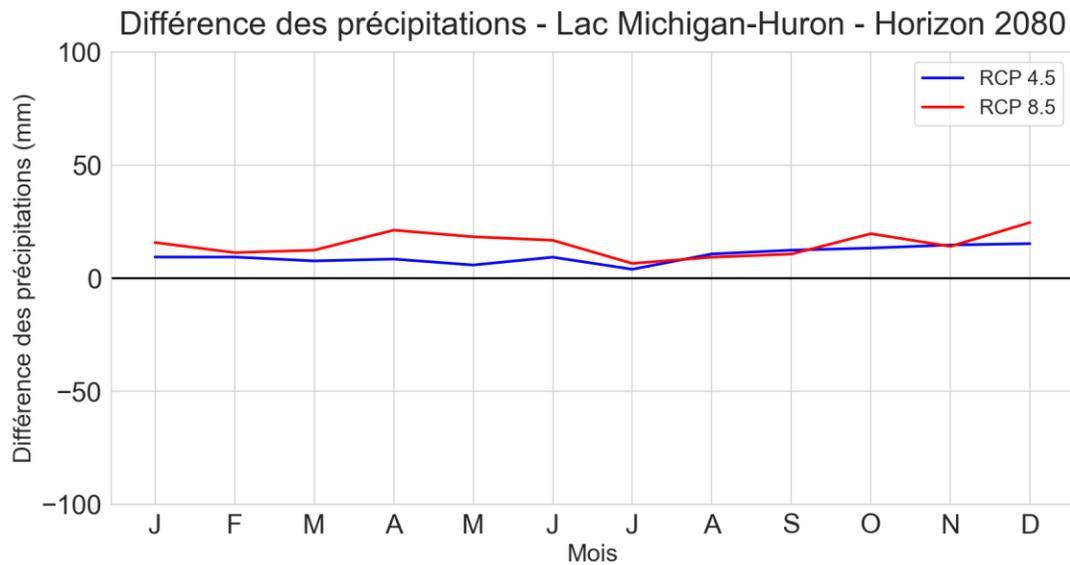


Figure A-4: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Michigan-Huron.

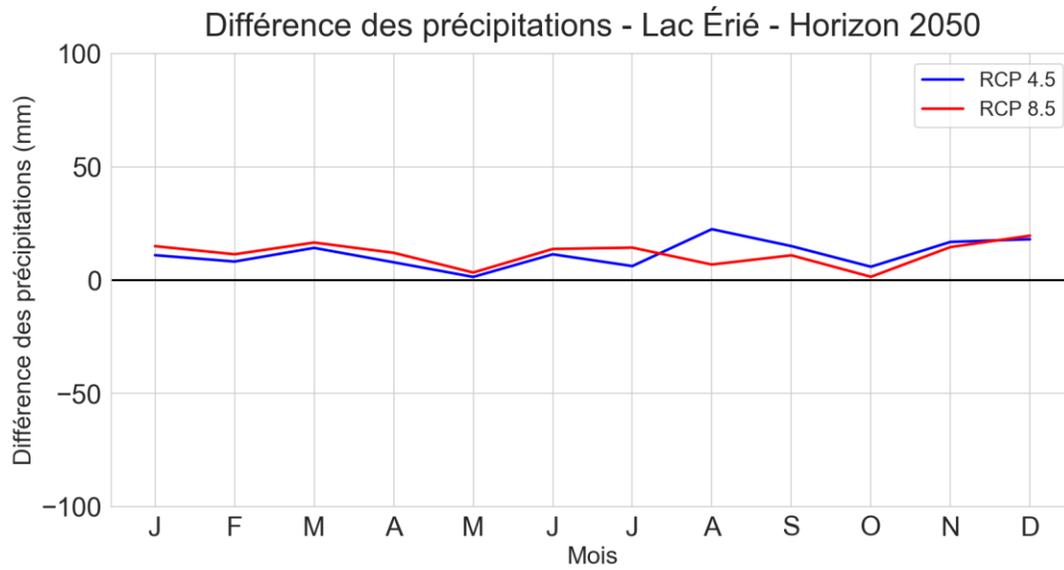


Figure A-5: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Érié.

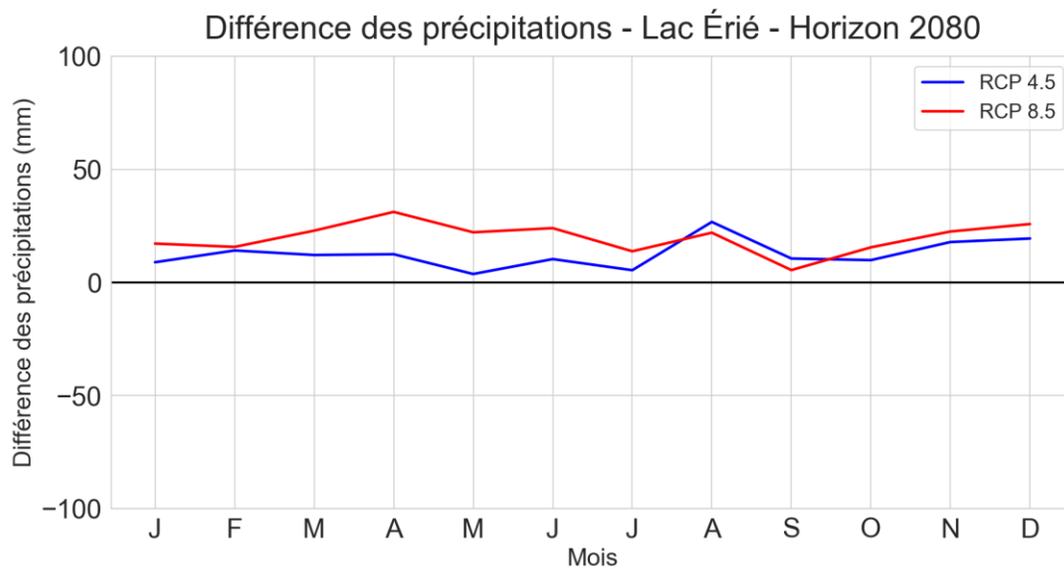


Figure A-6: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Érié.

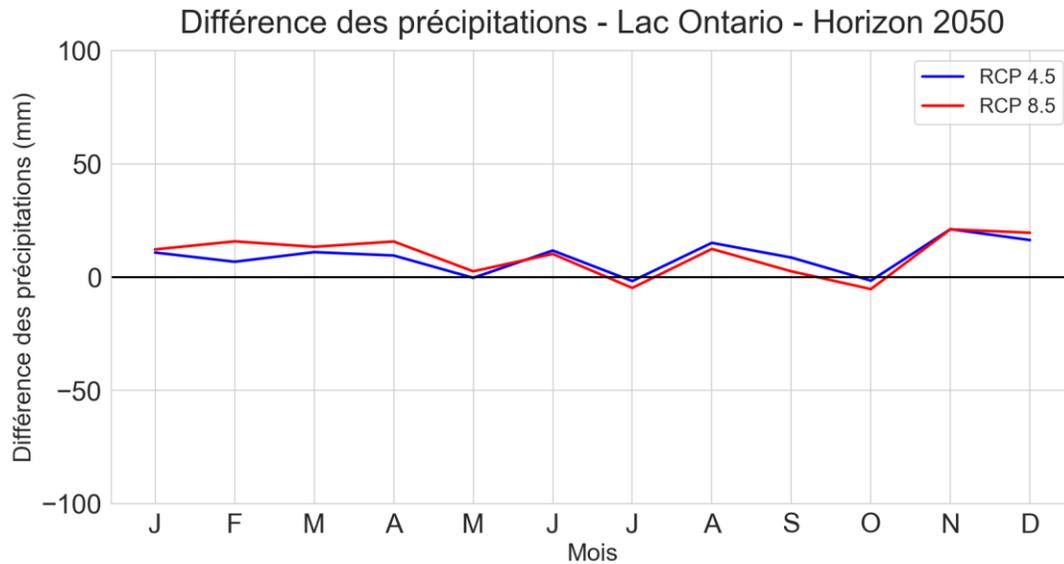


Figure A-7: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Ontario.

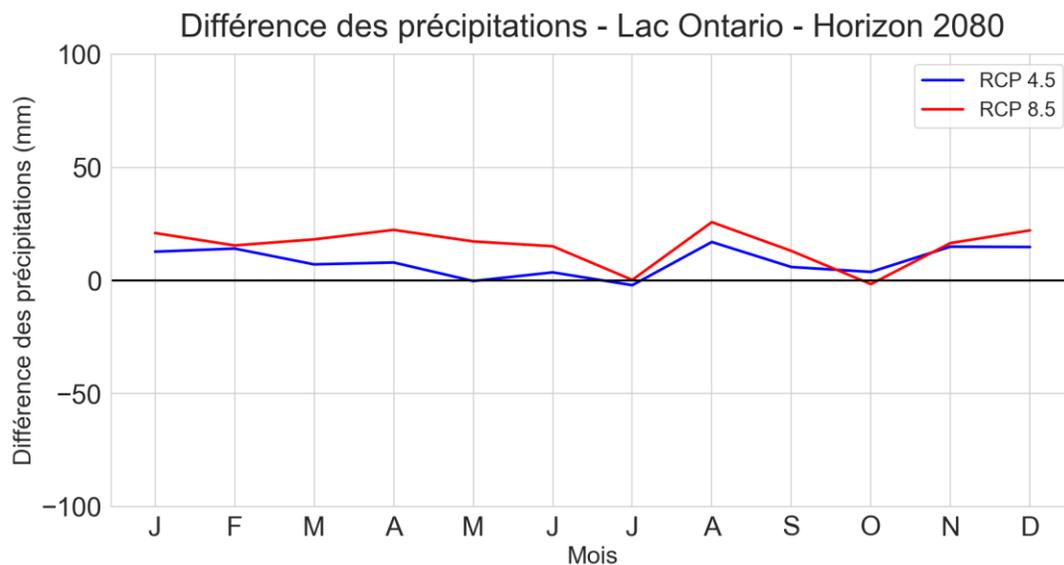


Figure A-8: Anomalies mensuelles des précipitations à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Ontario.

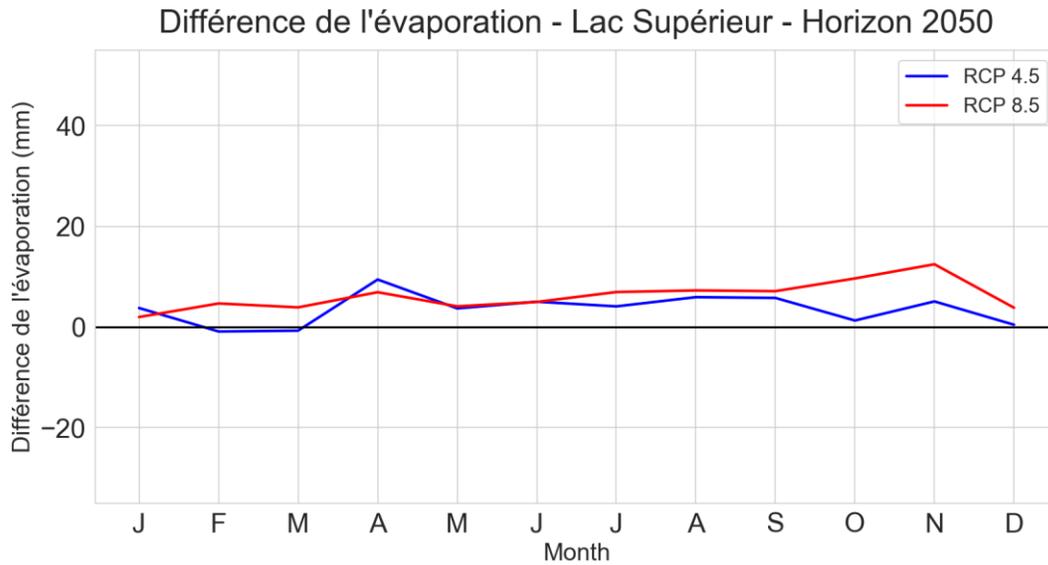


Figure A-9: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac supérieur.

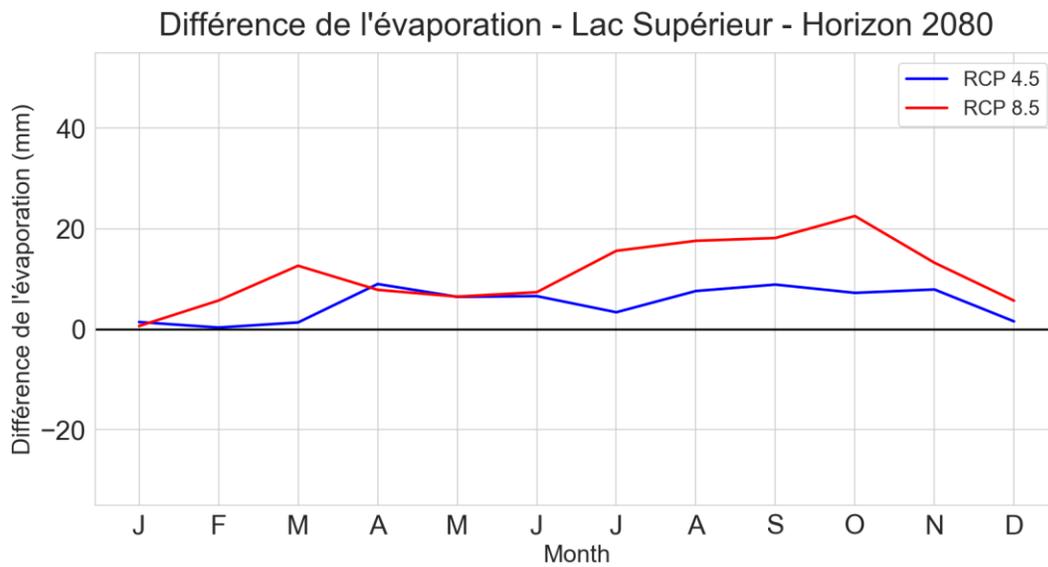


Figure A-10: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac supérieur.

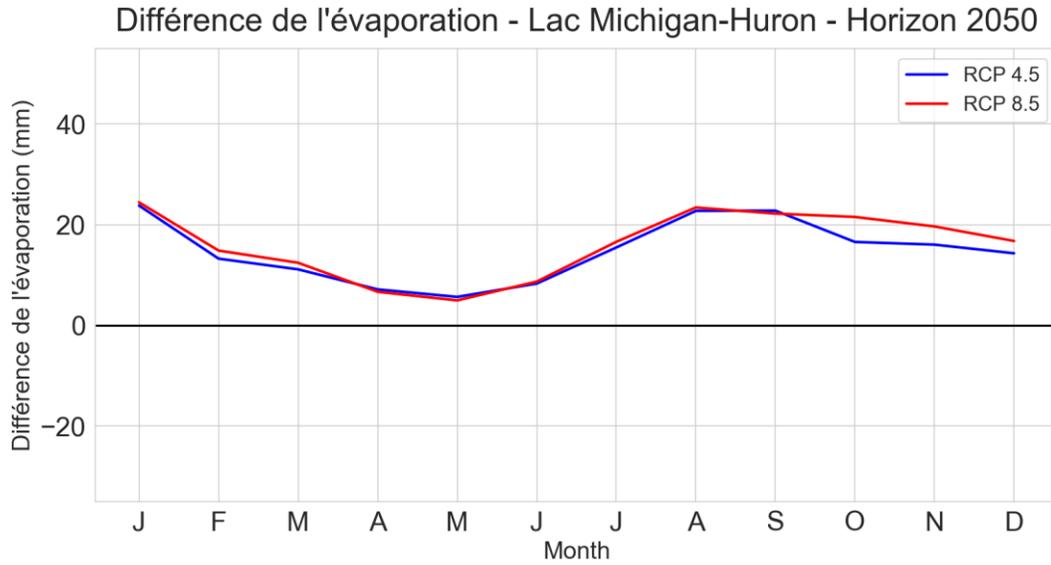


Figure A-11: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Michigan-Huron.

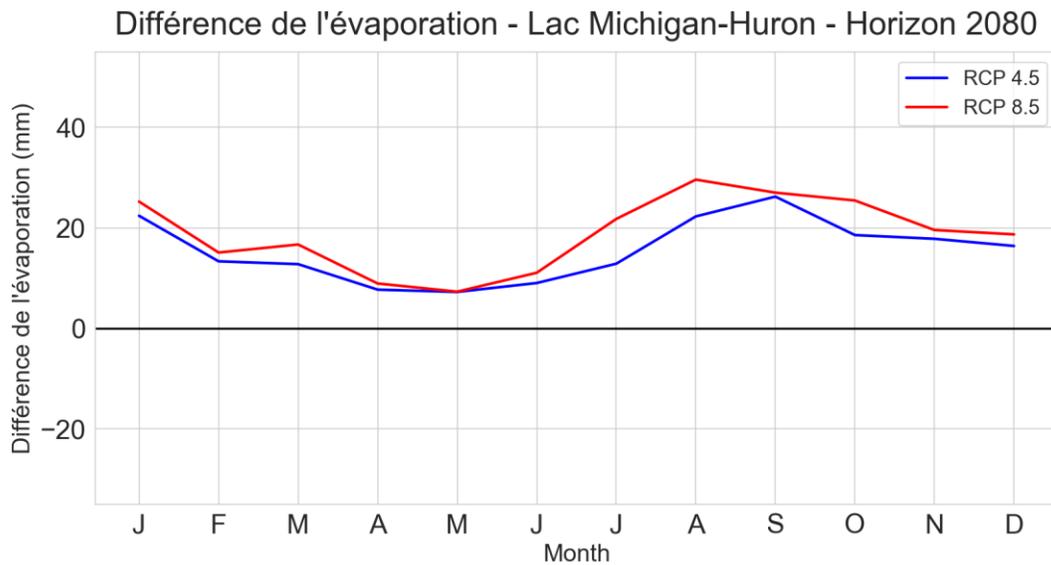


Figure A-12: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Michigan-Huron.

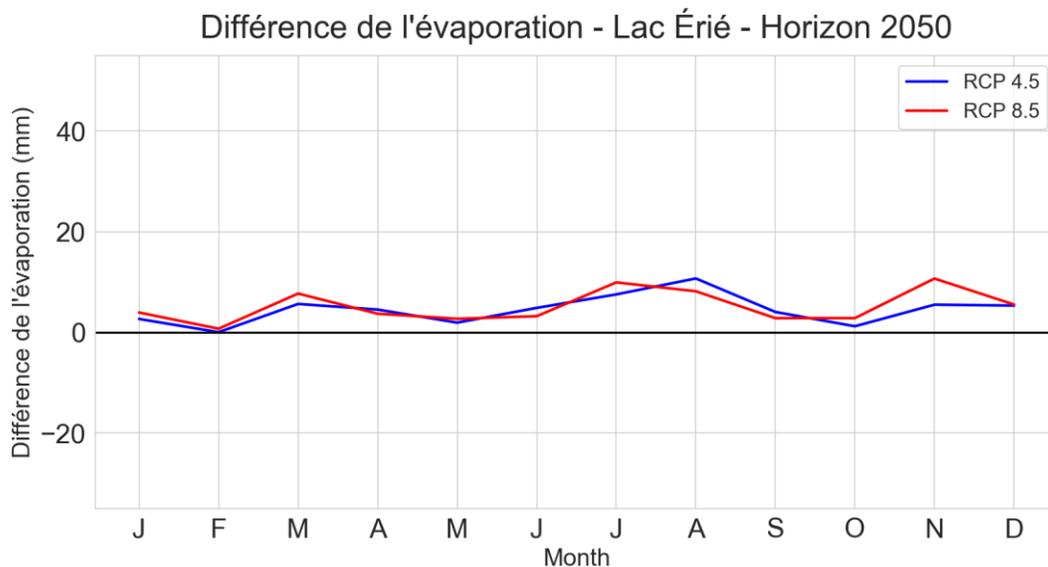


Figure A-13: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Érié.

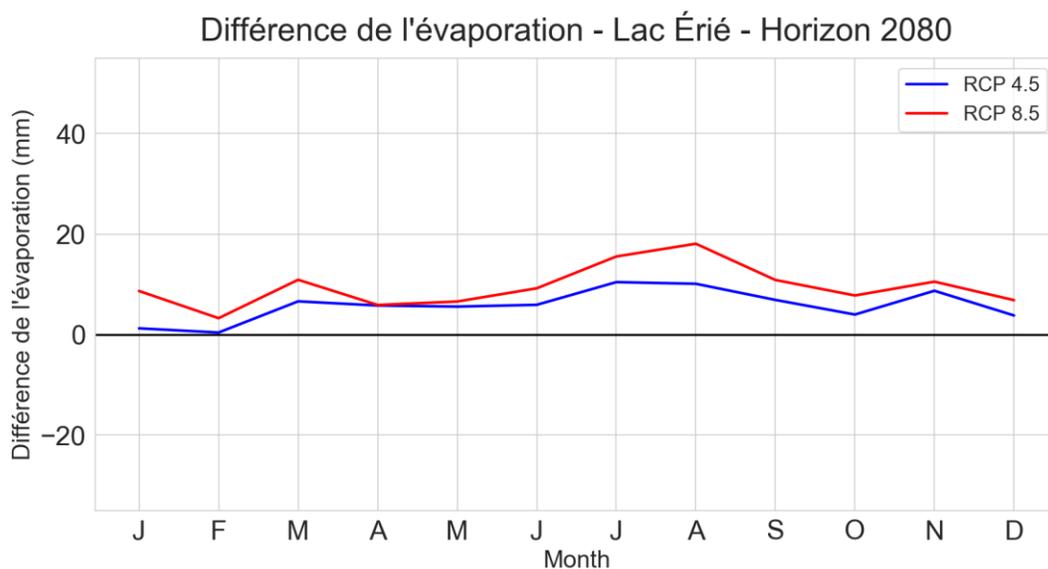


Figure A-14: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Érié.

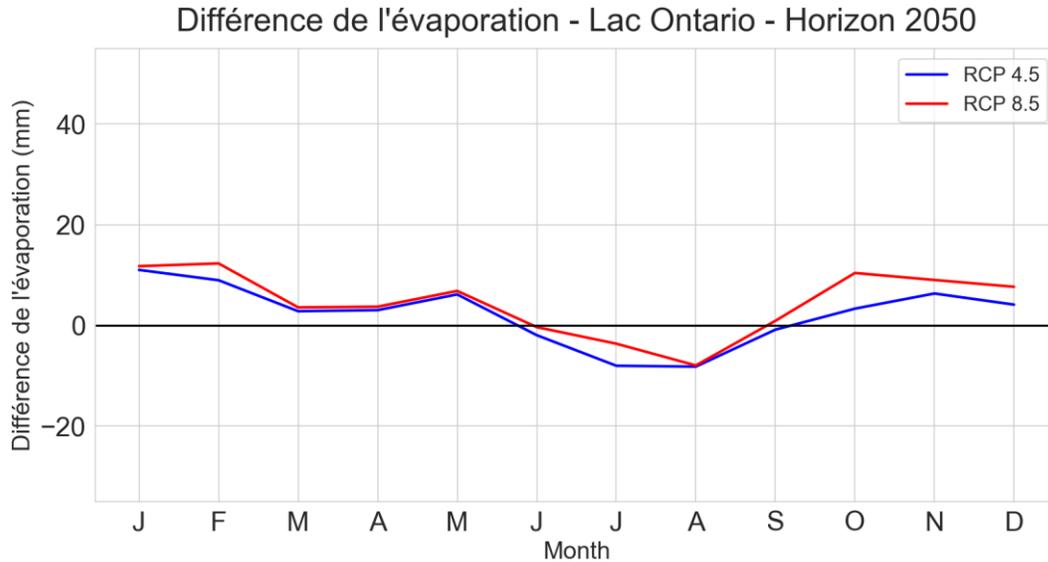


Figure A-15: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Ontario.

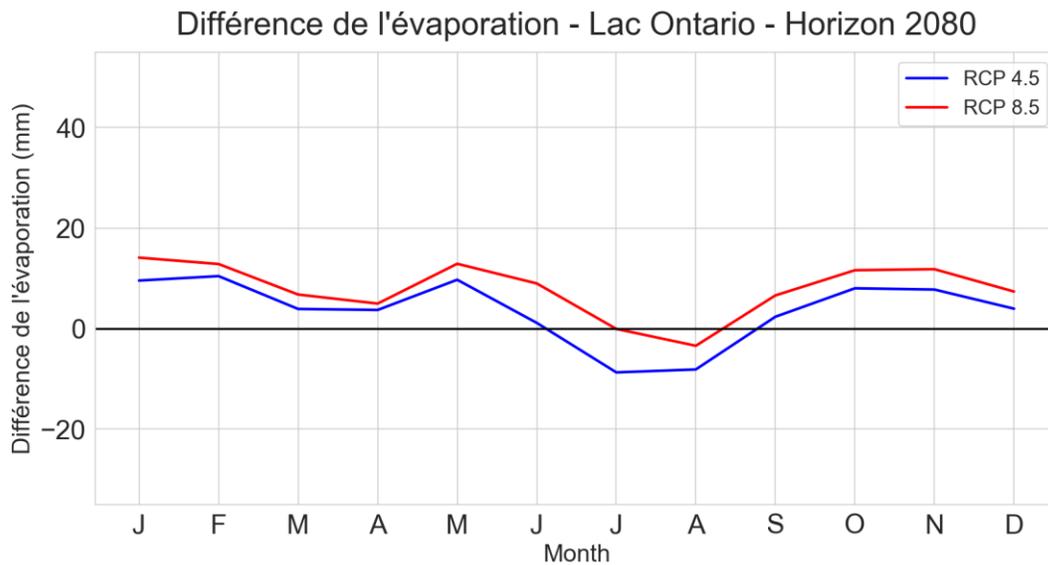


Figure A-16: Anomalies mensuelles de l'évaporation à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Ontario.

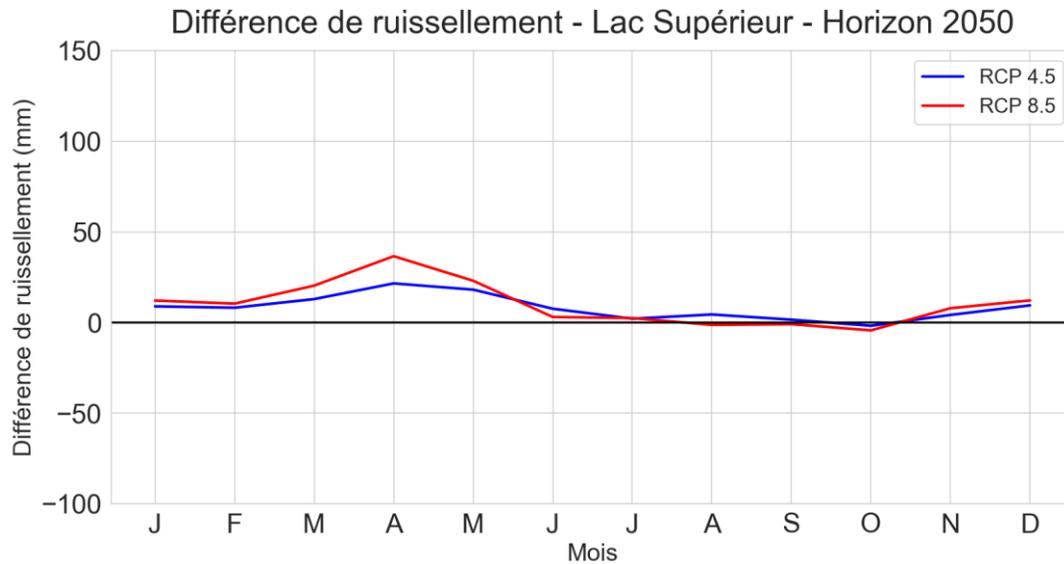


Figure A-17: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Supérieur.

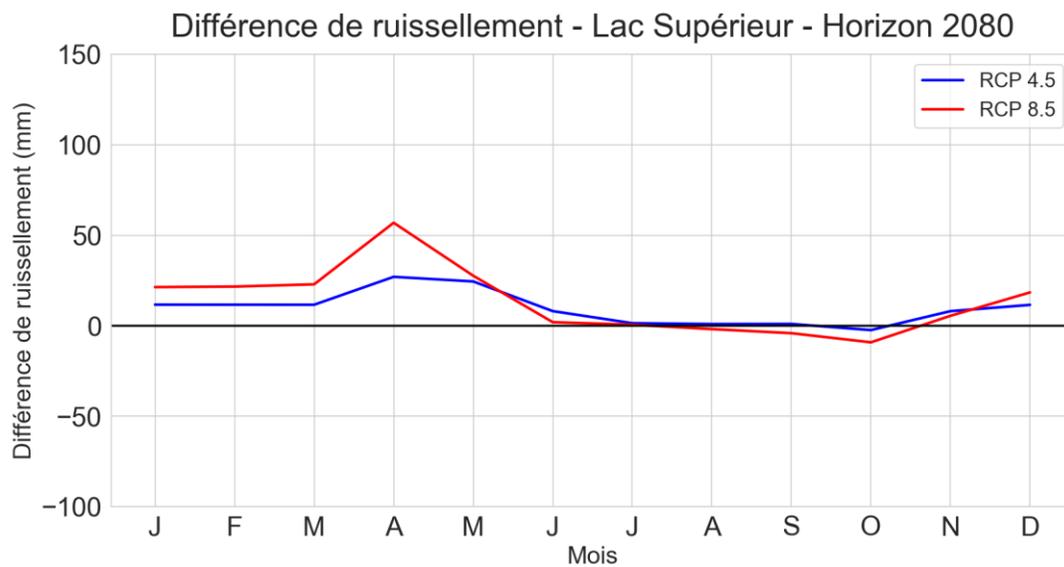


Figure A-18: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Supérieur.

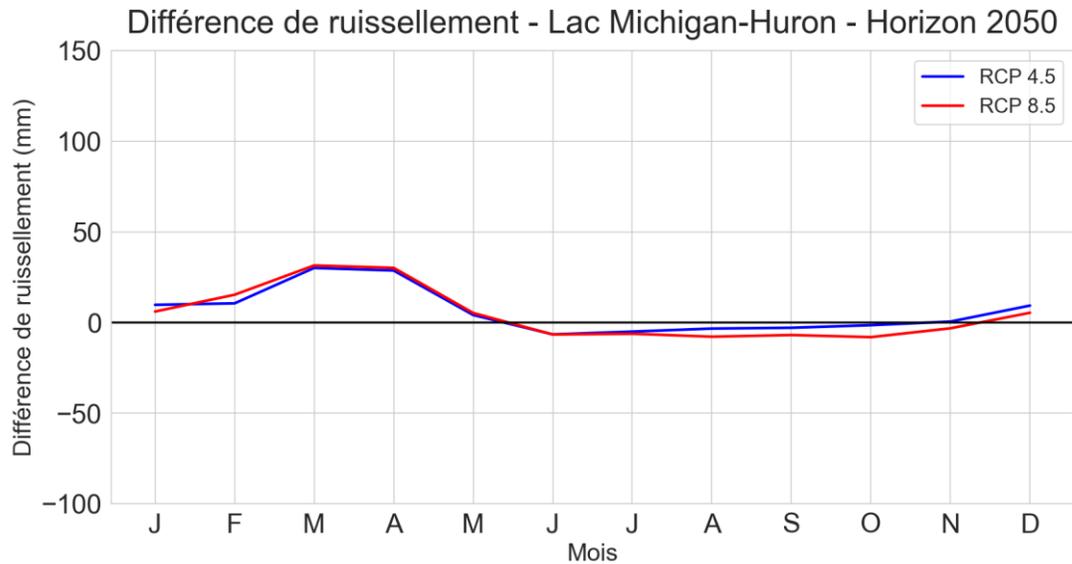


Figure A-19: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Michigan-Huron.

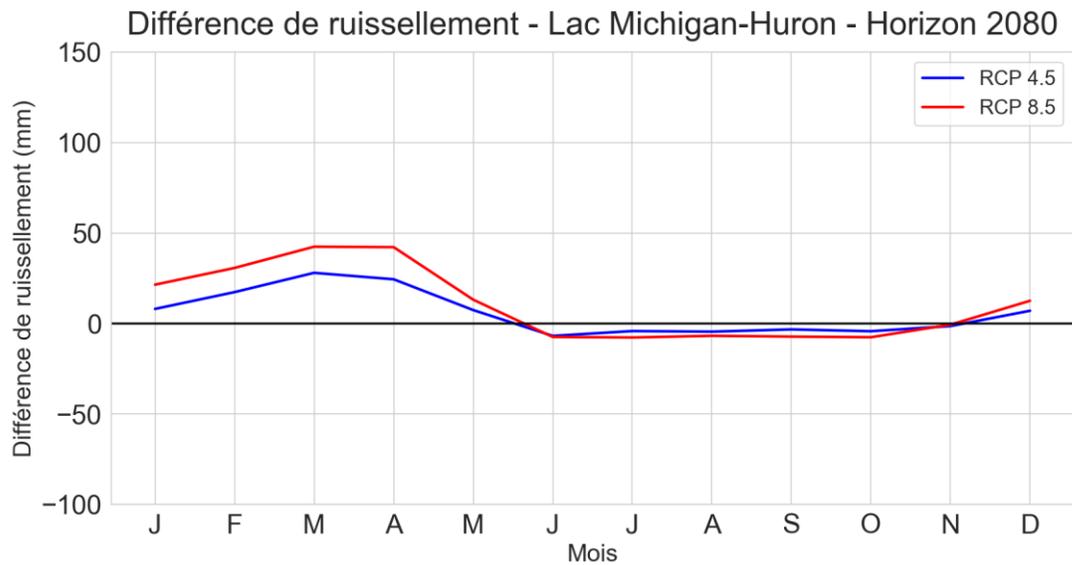


Figure A-20: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Michigan-Huron.

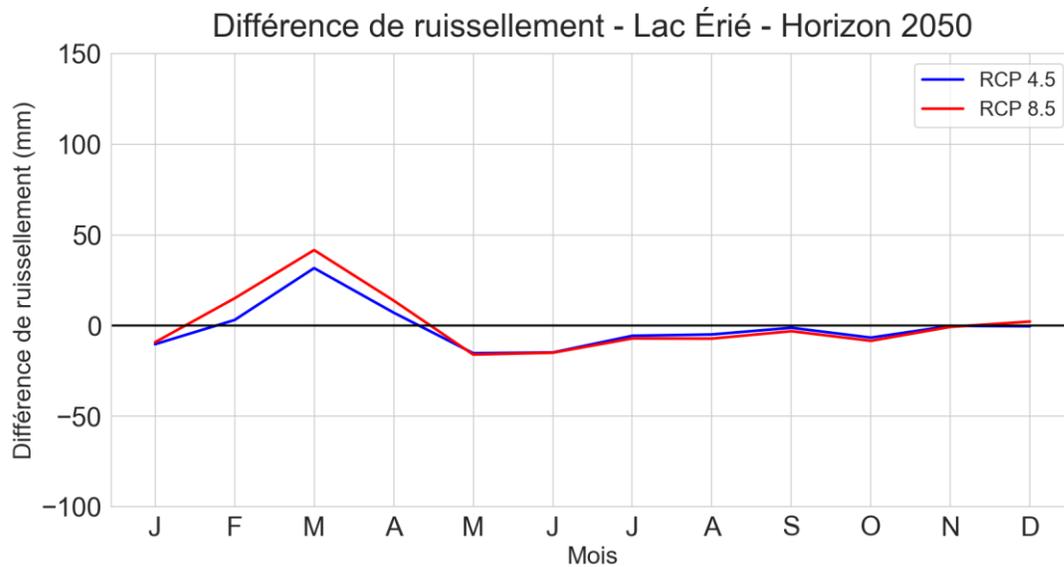


Figure A-21: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Érié.

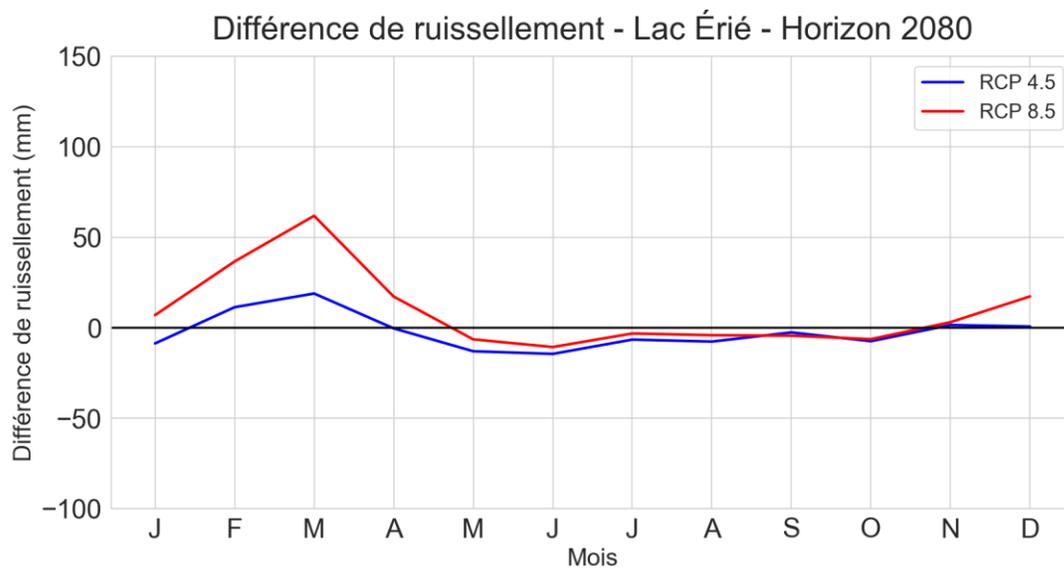


Figure A-22: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel du lac Érié.

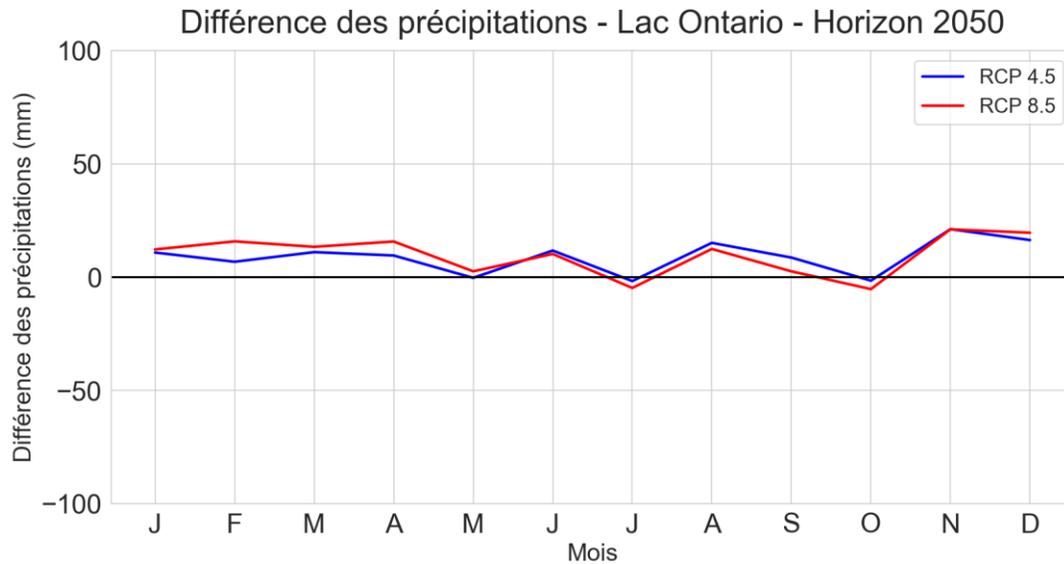


Figure A-23: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Ontario.

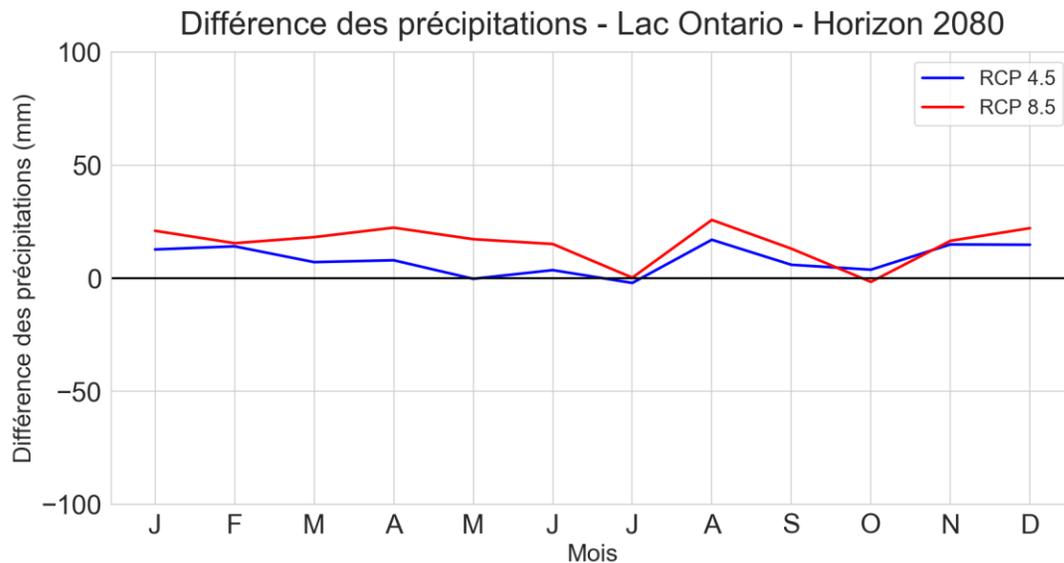


Figure A-24: Anomalies mensuelles du ruissellement entrant à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 et le climat actuel au-dessus du lac Ontario.

Annexe B: Anomalies saisonnières du NBS

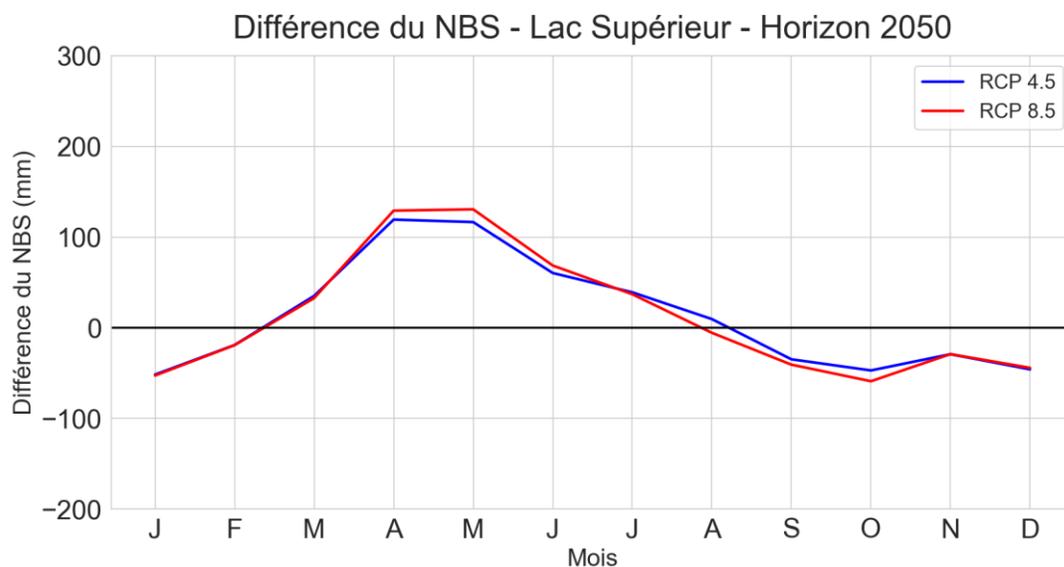


Figure B-1: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Supérieur.

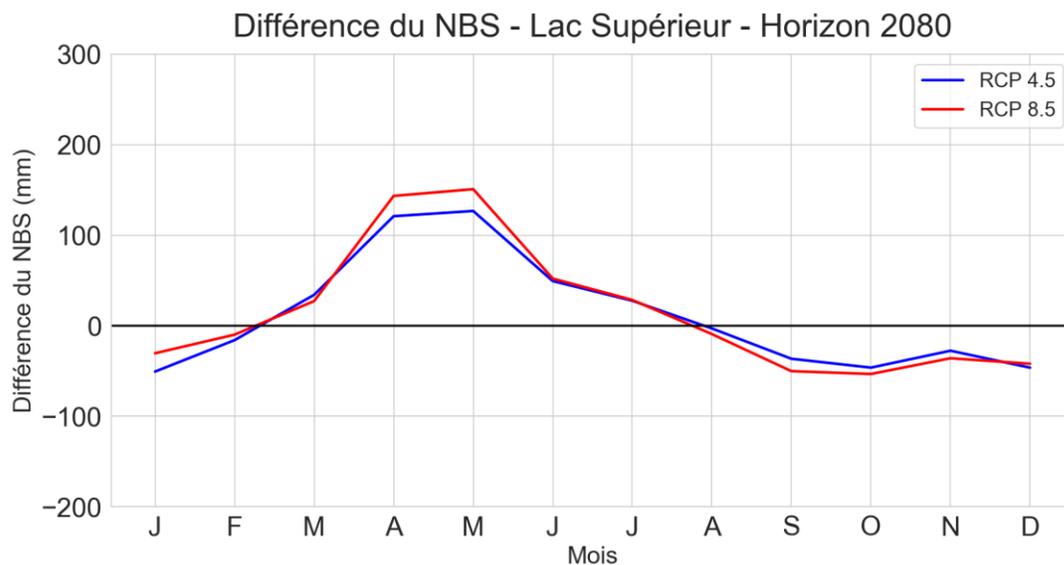


Figure B-2: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Supérieur.

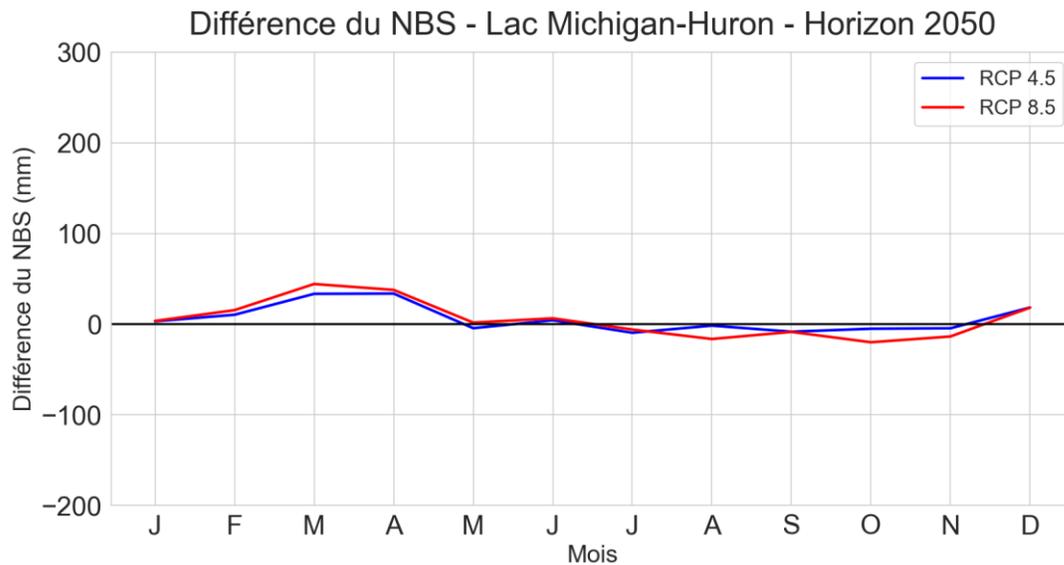


Figure B-3: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Michigan-Huron.

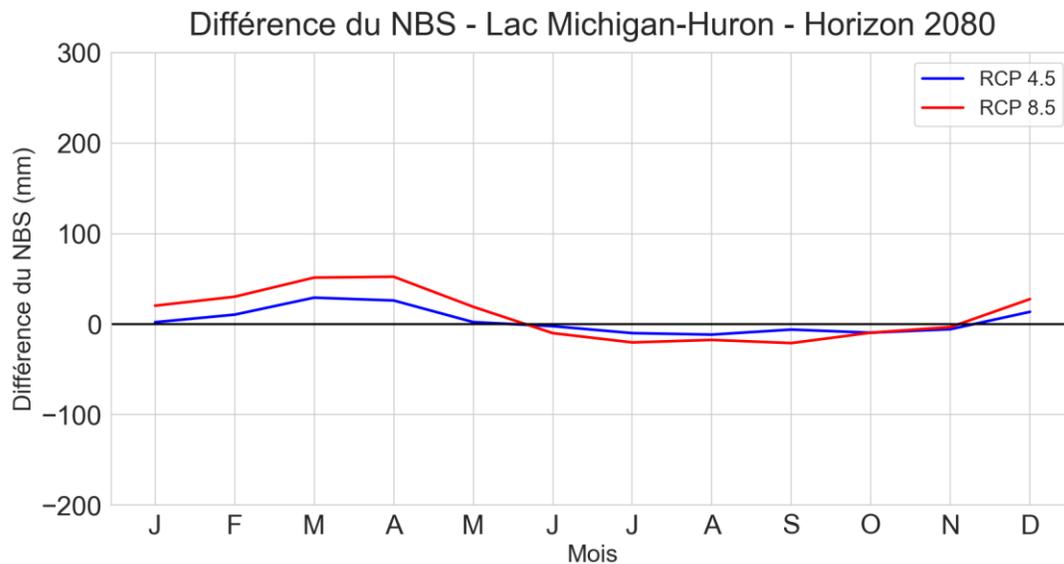


Figure B-4: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Michigan-Huron.

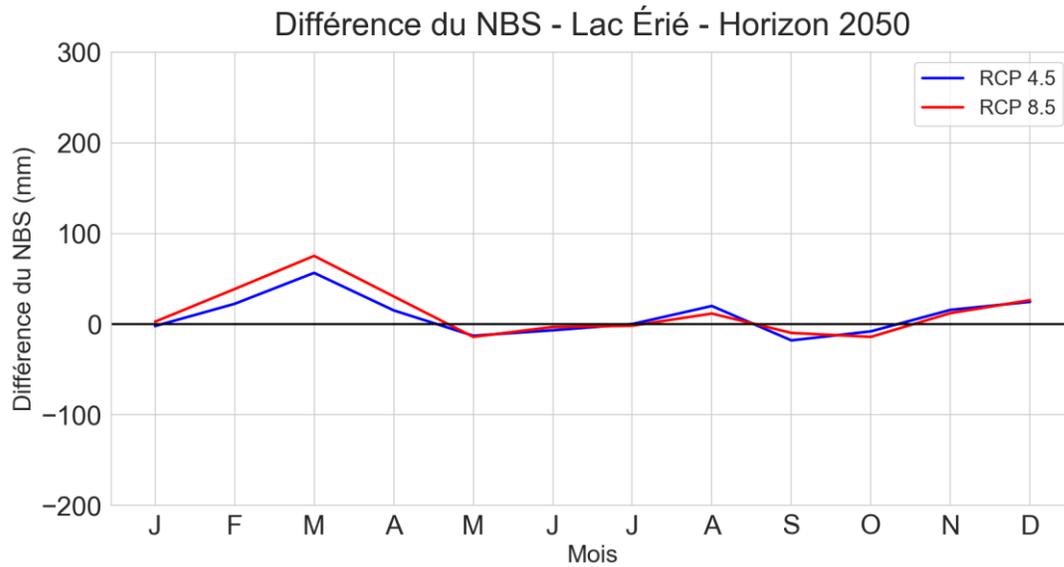


Figure B-5: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Érié.

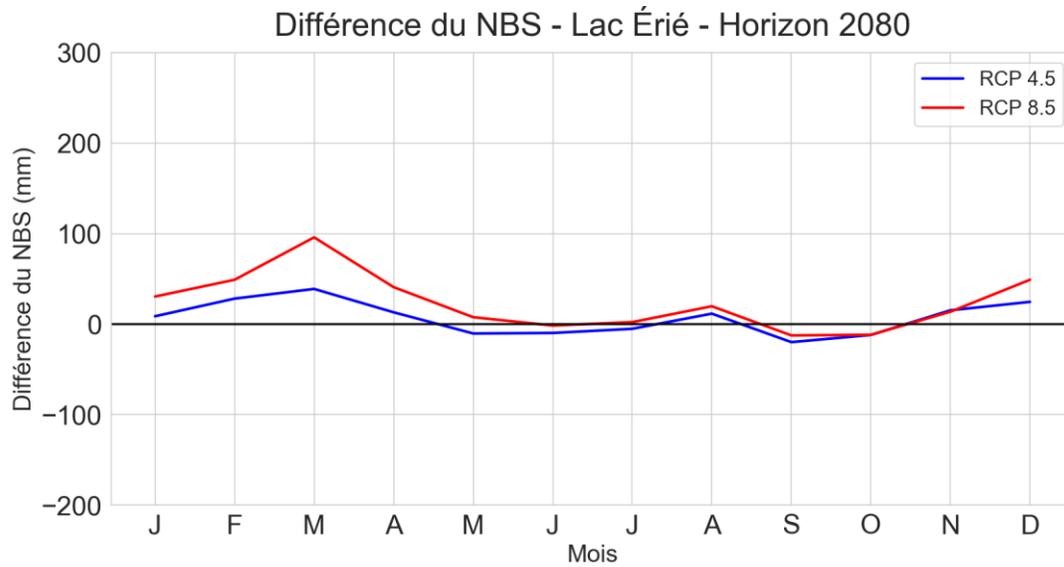


Figure B-6: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Érié.

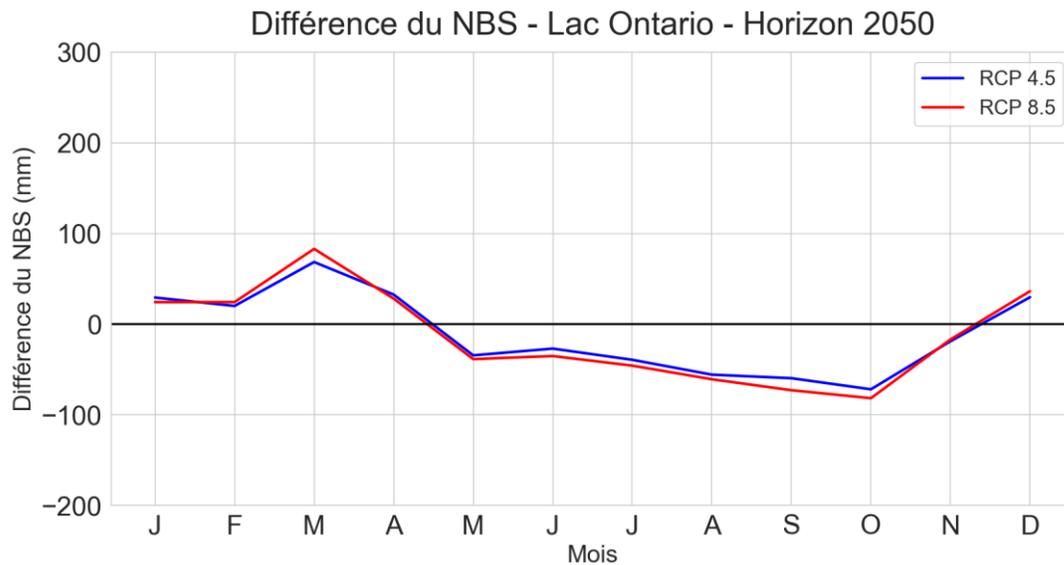


Figure B-7: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Ontario.

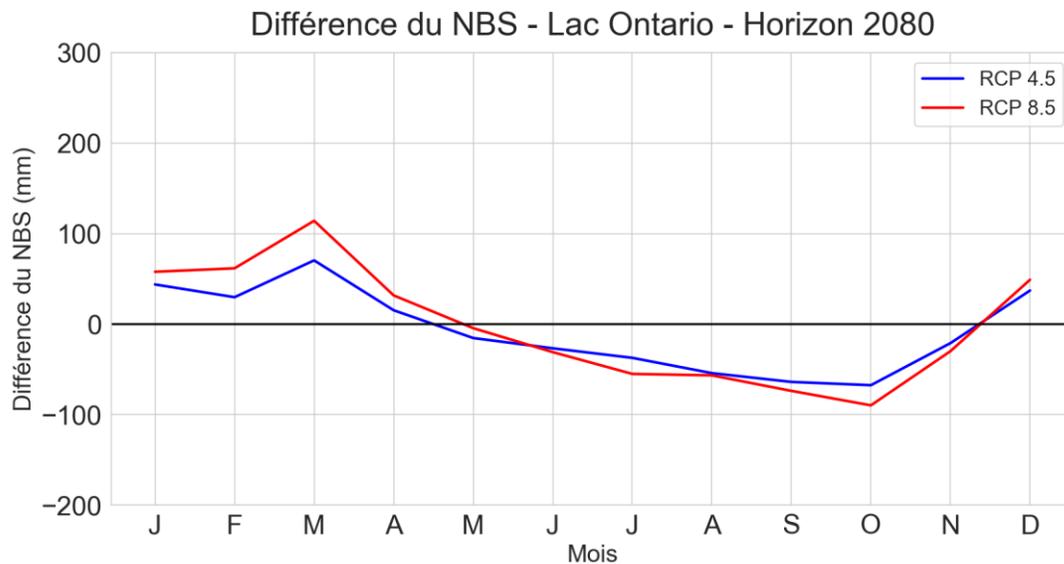


Figure B-8: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Ontario.

Annexe C: Anomalies saisonnières du NBS résiduel

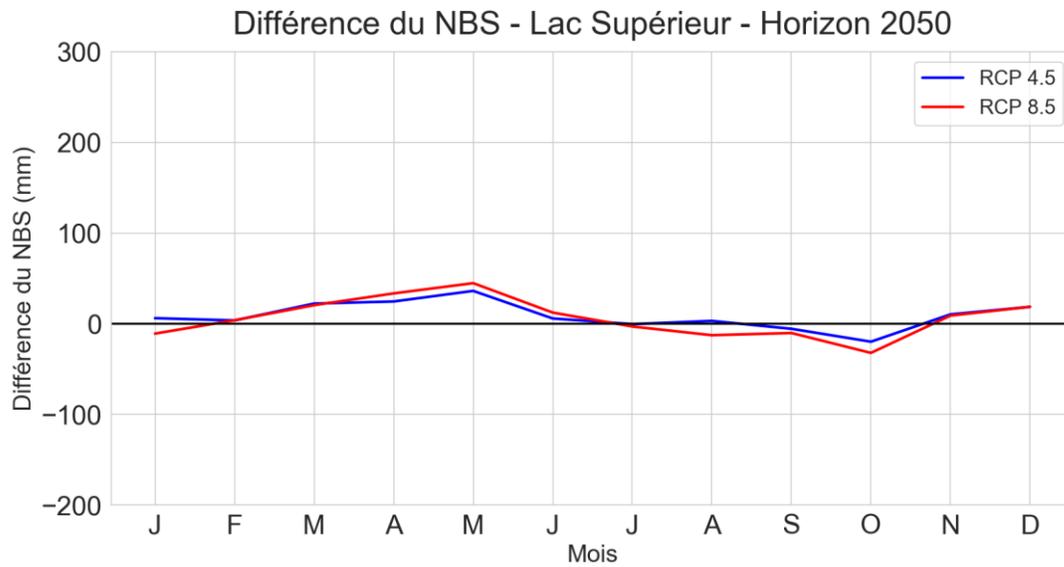


Figure C-1: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Supérieur.

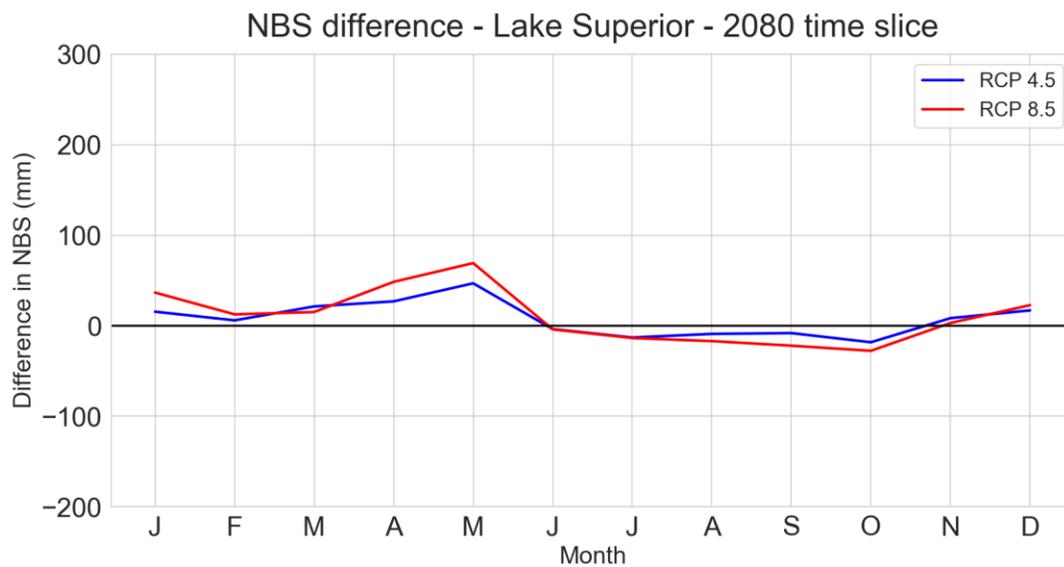


Figure C-2: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Supérieur.

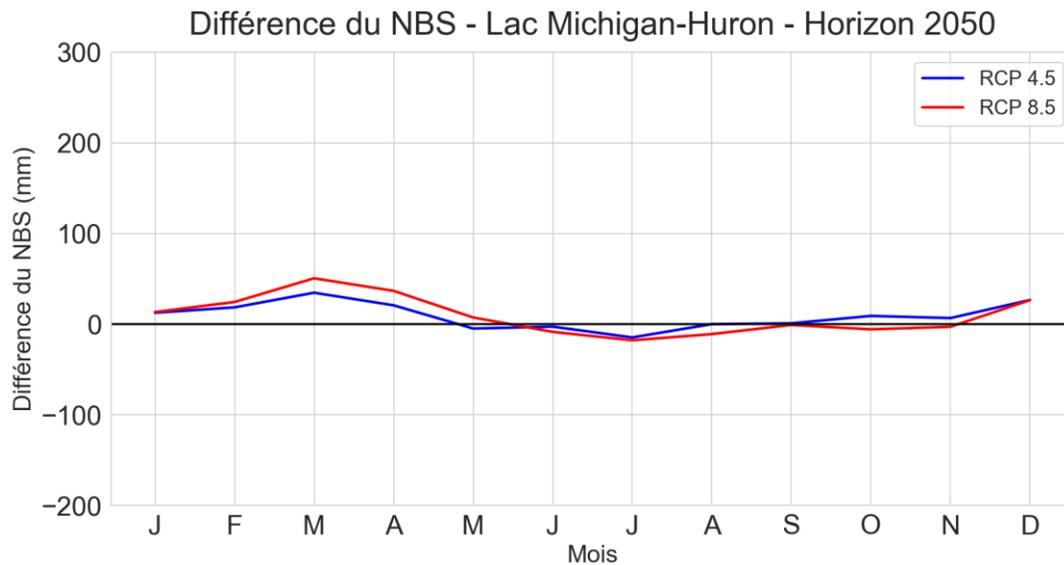


Figure C-3: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Michigan-Huron.

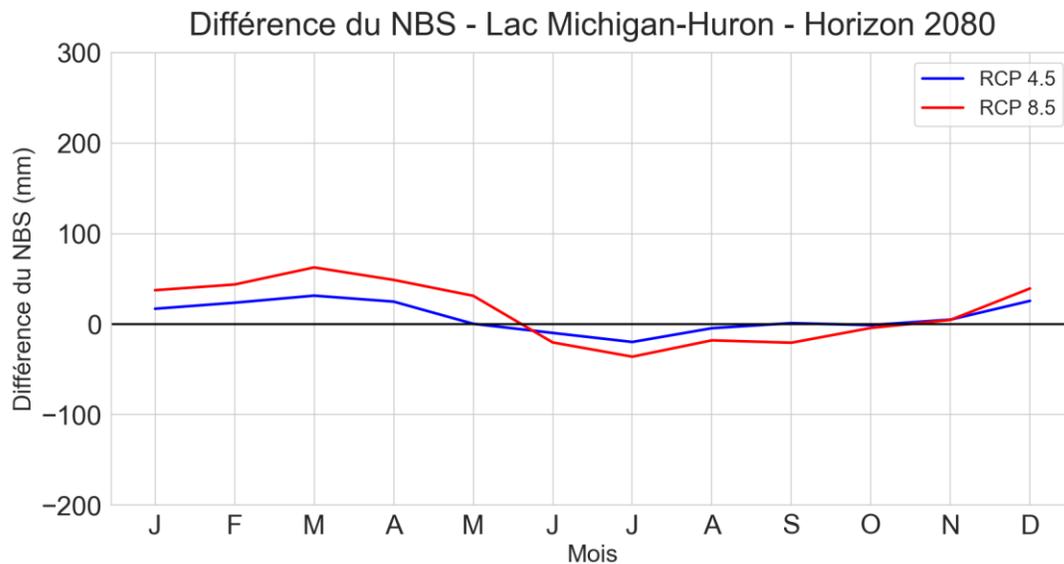


Figure C-4: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac.

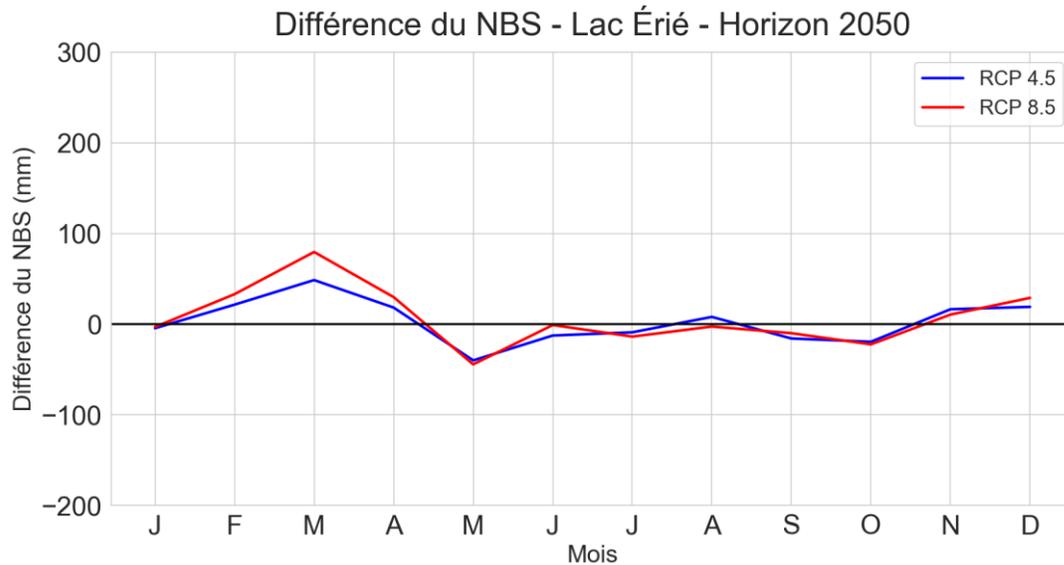


Figure C-5: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Érié.

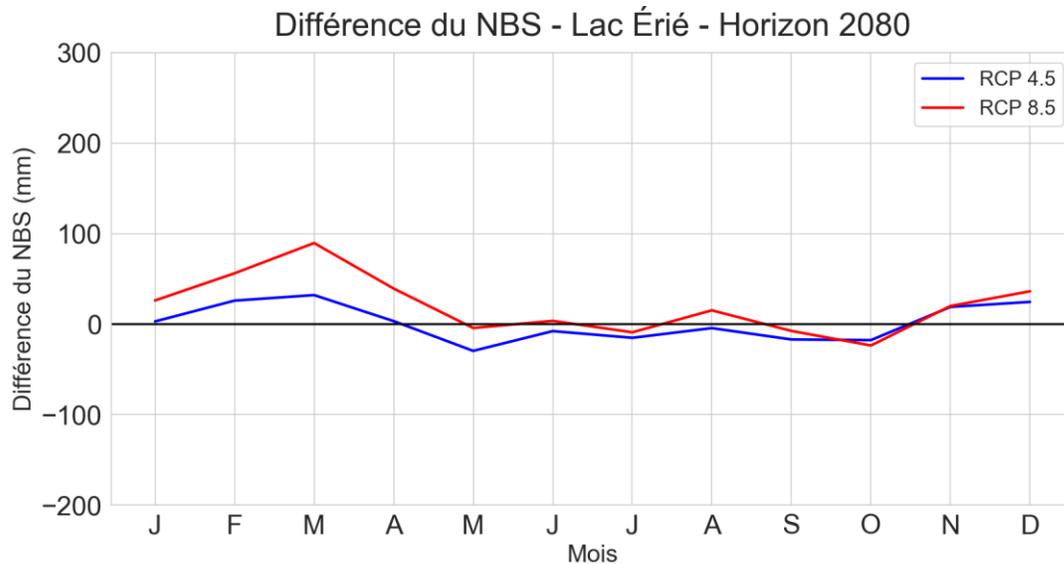


Figure C-6: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Érié.

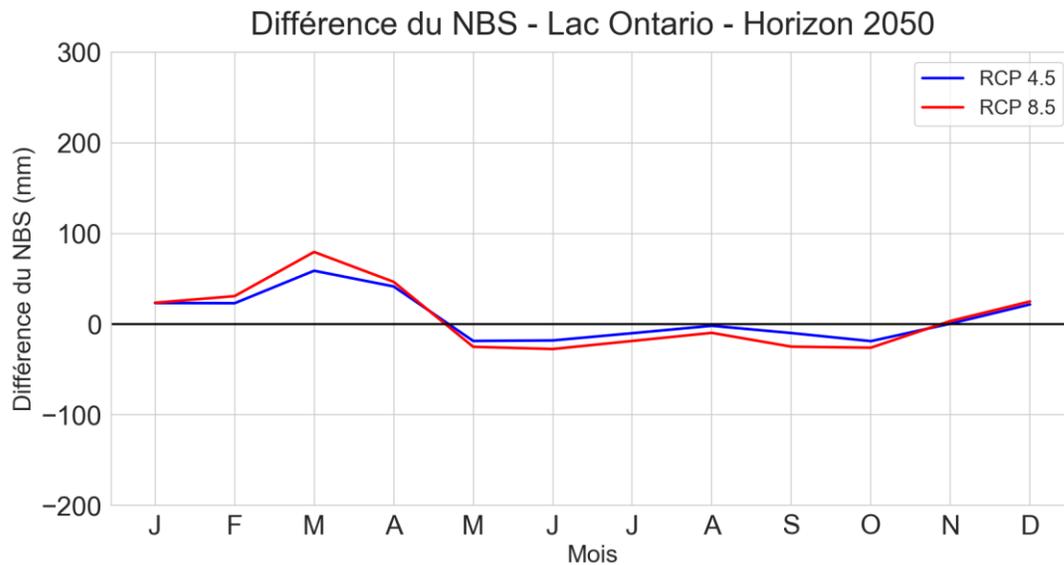


Figure C-7: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2050 (2036 à 2065) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Ontario.

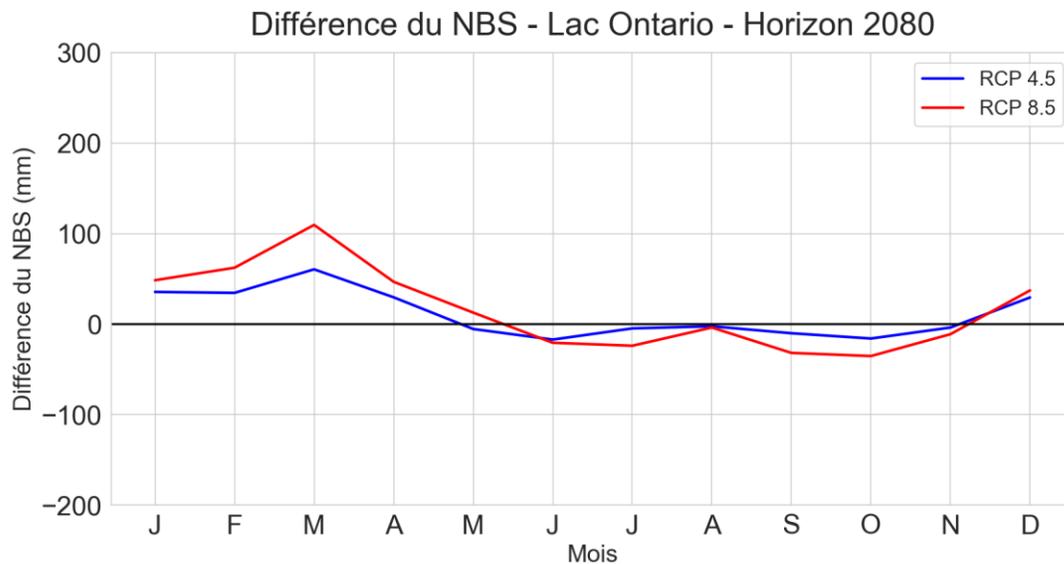


Figure C-8: Variabilité des anomalies mensuelles du NBS résiduel à l'horizon 2080 (2066 à 2095) de toutes les séquences RCP 4.5 et RCP 8.5 basée sur le climat actuel (1960 à 2010) du lac Ontario.