



Rapport technique (Activité 2). Résultats sur les
changements climatiques -
**Résilience des composantes d'infrastructures de
transport et de logistique du Port de Montréal :**
**compilation, analyse et options d'aide à la décision
dans un contexte de changement climatique**

Résilience des composantes d'infrastructures de transport et de logistique du Port de Montréal : compilation, analyse et options d'aide à la décision dans un contexte de changement climatique. *Rapport technique* présenté à l'Université de Montréal. Montréal. 93 pages. + annexes.

Rapport final
Novembre 2022

COORDINATION DU PROJET:

Stéphanie Bleau, précédemment à l'emploi d'Ouranos
Diane Chaumont, Ouranos
Hélène Côté, Ouranos

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Stéphanie Bleau, précédemment à l'emploi d'Ouranos
Diane Chaumont, Ouranos
Hélène Côté, Ouranos
Travis Logan, Ouranos
Pascal Bourgault, Ouranos
Sébastien Biner, précédemment à l'emploi d'Ouranos
Dominique Paquin, Ouranos
Patrick Grenier, précédemment à l'emploi d'Ouranos
David Huard, Ouranos

RÉVISION LINGUISTIQUE ET MISE EN PAGE

Marie-Anta Diop, précédemment à l'emploi d'Ouranos

Numéro du projet Ouranos: 701300

Citation suggérée : Ouranos (2022). Rapport technique Activité 2. Résultats sur les changements climatiques. Dans projet : Résilience des composantes d'infrastructures de transport et de logistique du Port de Montréal : compilation, analyse et options d'aide à la décision dans un contexte de changement climatique. Rapport présenté à l'Université de Montréal. Montréal. 93 p. + annexes.

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

REMERCIEMENTS

Le modèle MRCC5 a été développé par le Centre pour l'étude et la simulation du climat à l'échelle régionale (centre ESCER) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM; www.escer.uqam.ca) en collaboration avec Environnement et Changement climatique Canada (ECCC).

Les simulations du MRCC5 ont été effectuées sur le supercalculateur *Guillimin* de l'Université McGill, sous la gouverne de Calcul Québec et Calcul Canada. L'exploitation de ce supercalculateur est financée par la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), le Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation du Québec (MESI), et le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQ-NT).

Nous remercions le *Working Group on Regional Climate* du *World Climate Research Program* ainsi que le *Working Group on Coupled Modelling*, ancienne instance de coordination de CORDEX et responsable de CMIP5. Nous tenons aussi à remercier les groupes et les centres de modélisation climatique (dont la liste apparaît au Tableau B-1 de l'Annexe B) d'avoir produit et fourni les données provenant de leurs modèles respectifs. L'accès à ces données fut possible grâce aux infrastructures de la *Earth System Grid Federation*, supportées par un regroupement international mené par le *U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison*, le *European Network for Earth System Modelling* ainsi que d'autres partenaires faisant partie de la *Global Organisation for Earth System Science Portals* (GO-ESSP).

Le chapitre 2 de ce rapport est basé sur des ensembles de projections probabilistes fournis par Jeremy Fyke, Adrian Raftery et Iñigo Capellán-Pérez. Des figures incluent des données du Global Carbon Budget, de obs4MIPs, d'ECCC et de Copernicus Climate Change Service.

Le chapitre 4 et l'Annexe G contiennent des figures qui proviennent – ou qui sont basées sur:

- La Base de données nationale sur les tornades du Canada : Événements vérifiés (1980-2009) – Public d'ECCC (contient de l'information visée par la Licence du gouvernement ouvert – Canada).
- La Climatologie des ouragans pour l'Est du Canada, 1951-2008 du Centre canadien de prévision des ouragans d'ECCC.
- La Base de données canadienne des catastrophes de Sécurité publique Canada. La BDC sert à diffuser des renseignements sur les catastrophes en s'appuyant sur de nombreuses sources. Ces sources comprennent des institutions fédérales, des gouvernements provinciaux et territoriaux, des organisations non gouvernementales et d'autres sources accessibles au public. La BDC compile les données et les affiche, mais ne devrait pas être considérée comme source primaire de ces données.
- Les données du Northern Tornadoes Project. Les figures ont été produites avec la plateforme NTP.

Le chapitre 5 et l'Annexe H contiennent des figures provenant de l'Atlas des glaces de mer – Côte Est 1981-2010 ainsi que de l'Atlas des glaces de lac -Grands Lacs 1981-2010 produit par le Service canadien des glaces d'ECCC.



RÉSUMÉ

Le réchauffement climatique se démarque particulièrement à la hauteur des latitudes nordiques où s'écoule le fleuve Saint-Laurent et ne va que s'amplifier dans les prochaines décennies. Au Québec, le littoral du système maritime laurentien compte 34 infrastructures maritimes par lesquelles transitent plus de 100 millions de tonnes de fret annuellement. À leur arrivée dans les ports comme celui de Montréal (**38,9 mégatonnes**), ces marchandises sont redistribuées à travers l'Amérique du Nord. Malgré l'importance névralgique de ce secteur pour l'économie et les emplois des Canadiens et des Québécois, les connaissances concernant les changements climatiques et leurs impacts sur plusieurs aspects liés aux infrastructures, aux opérations, à la gestion des systèmes portuaires de même que leur gouvernance demeurent limitées et diffuses.

Dans le cadre du programme de l'évaluation des risques liés aux ressources de transport (É RAT) lancé par Transport Canada, l'initiative intitulée « Résilience des composantes d'infrastructures de transport et de logistique du Port de Montréal: compilation, analyse et options d'aide à la décision dans un contexte de changement climatique » permet de progresser sur le sujet. L'étude propose de mesurer les impacts des changements climatiques pour les trois dimensions du port de Montréal: ses infrastructures, ses opérations et ses chaînes d'approvisionnement. Le but est d'évaluer la résilience du port de Montréal et d'identifier les mesures d'adaptation permettant de répondre aux incidences futures prévues des changements climatiques.

Sur les 4 activités de l'initiative, Ouranos est responsable de l'activité 2. Cette activité consiste à évaluer l'évolution des variables et indicateurs climatiques pouvant affecter le transport maritime, portuaire et multimodal du port. Dès janvier 2020, un processus de consultations s'est activé entre les équipes de recherche de l'Université de Montréal, les équipes de recherche d'Ouranos et les gestionnaires du port de Montréal afin de saisir les grands enjeux logistiques et opérationnels. De plus, le choix des RCP (Representative Concentration Pathways) pertinents a été discuté pour tenir compte du cycle de vie des infrastructures existantes à Montréal et des investissements liés à de nouvelles installations à Contrecoeur, l'extension portuaire de Montréal.

Les principaux résultats de l'activité 2 sont présentés ci-après de manière succincte afin de faciliter la lecture et tirer en un coup d'œil les faits saillants pour les probabilités de RCP, les différents indicateurs et les tendances pour les conditions de glace et les tempêtes dans le système laurentien.

Principaux résultats

Probabilités de RCP

La revue de littérature et les analyses réalisées dans le projet ne permettent pas de favoriser un scénario de concentration de gaz à effet de serre. Ainsi, on constate que, bien que les

hypothèses sous-jacentes au scénario RCP8.5 soient peu probables (par exemple, augmentation d'un facteur cinq de l'utilisation du charbon), le scénario de concentration RCP8.5 reste plausible. Cette nuance est attribuable à la mécanique de calculs utilisée pour convertir le scénario d'émissions en concentrations, qui utilise un modèle simple qui sous-estime les rétroactions positives du cycle du carbone. Cette évaluation est cohérente avec celle de Christensen, Gillingham et Nordhaus (2018), qui évaluent à 35% la probabilité que les concentrations de GES en 2100 soient plus élevées que celles du RCP8.5.

De plus, on rappelle que, selon Pedersen et coll. (2020), il est plus sage de se fier à une gamme large de scénarios pour anticiper le futur que de ne considérer que le scénario estimé le plus probable. L'histoire regorge de prédictions erronées concernant les prix de l'essence ou la consommation d'énergie, et il existe plusieurs avenues via lesquelles les émissions pourraient continuer de croître : poursuite des subventions aux énergies fossiles, nouveaux gisements en Afrique et dans l'Arctique, croissance de la consommation énergétique dans les pays en transition, etc.

Température

- Les plages de valeurs des résultats de la majorité des indicateurs relatifs aux températures sont **comparables pour le site du port de Montréal et du terminal de Contrecoeur et évoluent de façon similaire d'une période à l'autre d'ici 2100, tant pour le RCP4.5 que le RCP8.5** (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.1).
- Sans surprise, les **changements sont plus marqués pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5**, particulièrement **vers 2071-2100** (section 3.4.1).
- Au port de **Montréal** et au terminal de **Contrecoeur**, on s'attend à **une quasi-disparition des jours avec une température minimale inférieure à -25°C vers 2071-2100, peu importe le RCP**. En **décembre et en février**, le **déclin se fait sentir dès 2041-2070** puisque les températures minimales inférieures à -25°C y seront beaucoup plus rares qu'en 1981-2010. En **janvier**, selon le **RCP4.5**, il ne resterait en moyenne à **Contrecoeur que 1,2 jour en 2041-2070 et 0,7 jour en 2071-2100** comparativement à **3,8 jours en 1981-2010** tandis qu'à **Montréal** on passerait **successivement de 3,0 jours à 0,7 jour puis à 0,4 jour** (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.1; Figure E-1 et Figure F-1).
- On s'attend à une **réduction de la fréquence, de la durée ainsi que de la sévérité des vagues de froid à Montréal et à Contrecoeur**. Cette réduction sera plus **drastique et rapide selon le RCP8.5** que pour le RCP4.5. D'après les 4 définitions utilisées dans cette étude, **les vagues de froid seraient quasi disparues vers 2071-2100 selon le RCP8.5**. Seules les **vagues définies** selon les critères les moins stricts (**-20°C, 3 jours**) **résistent** quelque peu **au réchauffement** des températures, surtout à **Contrecoeur, mais avec des fréquences et des durées considérablement réduites** (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.1; Figure E-6 et Figure F-6).

- La **saison de gel** au terminal de **Contrecœur (152,6 jours** en moyenne en **1981-2010**) est légèrement plus longue qu'au port de **Montréal (144,5 jours** en moyenne en **1981-2010**). Ce sera encore le cas pour toutes les périodes et pour tous les RCP. La **saison de gel aux deux sites sera de plus en plus courte**, à la fois en raison des **débuts de saisons de plus en plus tardifs** et des **fins de saisons de plus en plus hâtives**. Ainsi, à **Contrecœur, la saison de gel** ne serait plus que de **100,8 jours en moyenne selon le RCP8.5** (128,8 jours selon RCP4.5) vers **2071-2100** tandis que pour **Montréal on s'attend à une longueur moyenne de 91,8 jours** (119,8 selon RCP4.5) pour la même période (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.1; Figure E-4 et Figure F-4).
- Le **nombre annuel de cycles gel/dégel** est en moyenne **plus élevé à Contrecœur (74,6 jours)** qu'à **Montréal (69,4 jours)** sur la période **1981-2010** et **le demeurera d'ici 2100**, peu importe le RCP. **Aux deux sites**, si le nombre de **cycles gel/dégel diminue durant la période 2041-2070**, on note une **stabilisation de la tendance pour le RCP4.5 vers 2071-2100** tandis que le **déclin du nombre de cycles se poursuit d'ici 2100 selon le RCP8.5**. Ainsi, vers **2071-2100** selon le **RCP8.5**, **Contrecœur** connaîtrait en moyenne **63,3 jours** de cycles gel/dégel et **Montréal 58,8**. Ces résultats sont cohérents avec la réduction de la longueur de la saison de gel (Tableau D-1 et Tableau D-2; Figure 2-1 et section 3.4.1).
- On ne compte **pas de jours dont la température maximale excède 35°C** (mesuré à l'ombre et sans le facteur humidex) **entre mai et septembre pour la période 1981-2010**, à Montréal comme à Contrecœur. On s'attend à ce que de tels épisodes surviennent de façon **très sporadique aux deux sites d'ici 2100 selon le RCP4.5**. Selon le **RCP8.5**, les jours excédant 35°C demeureront très **rares en mai et en septembre**, leur **fréquence augmente en juin, juillet et août vers 2071-2100 à Montréal** (juin : **1,6** ; juillet **2,9** ; août **2,2** jours) et à **Contrecœur** (juin : **1,5** ; juillet **2,7** ; août **2,1** jours). (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.1; Figure E-2; Figure F-2).
- Si les **vagues de chaleur** (définies selon les critères des températures quotidiennes maximales > 30°C et minimales > 22°C pour au moins 3 jours) étaient **très rares en 1981-2010**, leur **fréquence, leurs durées maximale et totale augmentent graduellement dès 2041-2070 selon les RCP4.5 et RCP8.5** à Montréal et à Contrecœur. Ces **tendances semblent se stabiliser vers 2071-2100 selon le RCP4.5** alors qu'elles connaissent des **hausse prononcées selon le RCP8.5**. Ainsi, pour le **RCP8.5 vers 2071-2100**, les **fréquences annuelles moyennes** des vagues de chaleur atteindraient pour **Montréal (Contrecœur) 3,4 (2,7)**, les **durées maximales** seraient de **8,0 jours (6,2 jours)** pour des **durées totales moyennes de 18,7 jours (13,8 jours)** (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.1; Figure E-3 et Figure F-3)
- Les amplitudes thermiques diurnes moyennes et maximales changeront peu, **sauf pour la saison hivernale** (décembre, janvier, février) pour laquelle on s'attend à des diminutions plus marquées pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5. Par exemple, à

Montréal, selon le **RCP8.5**, l'**amplitude moyenne passerait successivement de 8.5°C, à 7.2°C et 6.4°C** pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Quant à l'**amplitude diurne maximale**, elle passerait, en hiver, de **20.3°C en 1981-2010 à 17,6°C en 2041-2070 puis à 15.9°C vers 2071-2100** (Figure E-5 et Figure F-5; section 3.4.1; Tableau D-1 et Tableau D-2)

Précipitations totales

- Tous les indicateurs relatifs aux précipitations présentés dans cette étude présentent une **variabilité interannuelle élevée sur la période 1981-2010 qui se maintient jusqu'à la fin du siècle**. Ce niveau élevé de variabilité **complique et retarde la détection d'une tendance significative**.
- À **Montréal** et à **Contreccœur**, on anticipe une **augmentation graduelle dans les accumulations de précipitations totales pour l'hiver et le printemps d'ici 2100**, celle-ci étant un peu **plus marquée pour le RCP8.5** que pour le RCP4.5. En **été et en automne**, pour les deux RCP, les **accumulations moyennes de la période 2041-2070 sont plus élevées qu'en 1981-2010**, mais **semblent se stabiliser vers 2071-2100 selon RCP4.5** alors que la légère **tendance à la hausse semble persister pour le RCP8.5** (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.2; Figure E-7 et Figure F-7).
- On s'attend à une **hausse de l'intensité des précipitations quotidiennes supérieures à 10mm dès 2041-2070 selon les RC4.5 et RCP8.5 à Montréal et à Contreccœur pour les 4 saisons**. Les intensités de **précipitation semblent se stabiliser vers 2071-2100 selon le RC4.5**. Pour le **RCP8.5** la **tendance à la hausse des intensités de précipitations quotidiennes de plus de 10mm se poursuit en hiver et au printemps**, mais les **valeurs estivales et automnales demeurent stables** à Montréal comme à Contreccœur (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.2; Figure E-8 et Figure F-8).
- Le **maximum annuel des précipitations quotidiennes totales augmenterait graduellement d'ici 2100 à Montréal et à Contreccœur**, de façon **plus marquée selon RCP8.5** que pour le RCP4.5. À **Montréal (Contreccœur)**, ce maximum passerait de **47,4 mm (46.9 mm) en 1981-2010 à 57,7 mm (57,0 mm) en 2071-2100 selon le RCP8.5**. (Tableau D-1 et Tableau D-2; Figure 3-4 de la section 3.4.2).

Verglas

- **Peu importe l'indicateur, la période ou le RCP (4.5 ou 8.5) considérés, il y a très peu de différences entre les valeurs aux sites de Montréal et de Contreccœur** (Tableau D-1 et Tableau D-2).
- Le **nombre d'épisodes de verglas pour toutes les durées décline graduellement d'ici 2100**. Le **déclin est plus marqué pour le RCP8.5**, tandis que pour le **RCP4.5**, le nombre d'épisodes **diminue dès 2041-2070, mais semble se stabiliser** par la suite. (Tableau D-1 et Tableau D-2).

- En raison de l'archivage toutes les 3 heures des précipitations sous forme de verglas **dans les simulations climatiques, le nombre d'occurrences de verglas est d'emblée plus élevé que ce que l'on obtiendrait avec une fréquence horaire** comme celle des stations d'observation (section 3.3.3.)
- Les **quantités de verglas associées aux épisodes de plus de 6 heures diminuent d'ici 2100** de façon **plus marquée pour le RCP8.5** que pour le RCP4.5. (Tableau D-1 et Tableau D-2).
- Les **événements intenses de plus de 10 mm sont rares**, même durant la période 1981-2010. **Leur nombre diminue** pour les périodes 2041-2070 et 2071-2100 selon le RCP4.5 et le RCP8.5 (Tableau D-1 et Tableau D-2).
- Des **événements de plus de 15mm** [de plus de 20 mm ainsi que de plus de 25mm] se produisent dans les simulations, mais ils **sont trop rares pour pouvoir établir une tendance** (Tableau D-1 et Tableau D-2).
- La **confiance dans l'évolution des divers indicateurs de verglas est limitée** par la taille restreinte de l'ensemble des simulations climatiques produites par un seul modèle régional de climat et une seule méthode diagnostique (section 3.3.3.)

Précipitations neigeuses et neige au sol

- Le nombre moyen de journées avec des **chutes de neige $\geq 25\text{cm}$** demeure stable d'ici la fin du 21^e siècle selon le scénario **RCP4.5** aux sites du port de Montréal et du terminal de Contrecoeur. Les valeurs aux deux sites sont d'ailleurs quasi identiques pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 (section 3.4.4.1; Tableau D-1 et Tableau D-2).
- Selon le scénario RCP8.5, les changements du nombre moyen de journées avec des **chutes de neige $\geq 25\text{cm}$** ne surviennent qu'à la période 2071-2100. Pour cette période, la valeur de la moyenne de l'ensemble des scénarios de l'indicateur est de 0,2 pour le port de Montréal et de 0,3 pour le terminal de Contrecoeur comparativement à 0,5 durant la période 1981-2010. La confiance dans ce résultat est faible puisque la diminution constatée entre ces périodes est inférieure à l'intervalle de valeurs dans l'ensemble généré par un nombre restreint de modèles climatiques régionaux (section 3.4.4.1; Tableau D-1 et Tableau D-2) et par des préoccupations quant à la performance de certains d'entre eux (section 3.4.4.1)
- Selon le scénario RCP4.5, la moyenne de **l'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans** change peu d'ici à 2100 aux sites de Montréal et de Contrecoeur (section 3.4.4.2; Tableau D-1 et Tableau D-2).

- Selon le scénario RCP8.5, la moyenne de **l'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans** diminue sur la période 2041-2070 et décline de façon marquée vers 2071-2100 aux sites de Montréal et de Contrecoeur (section 3.4.4.2; Tableau D-1 et Tableau D-2).

Vents

- Les 18 scénarios de vent pour les sites de Montréal « Quai M-3 » et « Terminal Cast » présentent des moyennes 1981-2010 respectives **de l'ordre de 0,5 jour/an et de 1 jour/an avec vent maximal de force 7** sur l'échelle de Beaufort (50 à 62 km/h). Pour les moyennes de **force 8 et 9** (62 à 75 km/h et 75 à 89 km/h, respectivement), **les normales avoisinent zéro pour les deux sites** (Tableau D-1; section 3.4.4). À noter que dans le présent contexte, un scénario climatique est défini comme une simulation dont les biais dans les séries quotidiennes sont ajustés et dont la représentativité spatiale est ramenée statistiquement à celle des anémomètres de l'Administration portuaire de Montréal (de 50 ou 25 km, selon la simulation, à une échelle quasi ponctuelle).
- Les 18 scénarios de vent pour le site « Contrecoeur » présentent des moyennes 1981-2010 **de l'ordre de 13 jours/an avec vent maximal de force 7** sur l'échelle de Beaufort (50 à 62 km/h). Ces moyennes sont **de l'ordre de 2 jours/an pour les vents de force 8** (62 à 75 km/h) et **de l'ordre de 0,35 jour/an pour ceux de force 9** (75 à 89 km/h) (Tableau D-2; section 3.4.4).
- **À long terme, aucun changement notable** n'est obtenu aux deux sites pour **le nombre de jours avec un vent maximal de force 7, 8 ou 9 sur l'échelle de Beaufort**. En effet, les intervalles intersimulations (du minimum au maximum) chevauchent les intervalles correspondants pour le passé récent (1981-2010), et cela, **peu importe** que l'on considère **la période future 2041-2070 ou 2071-2100**, et **peu importe que l'on considère le forçage anthropique RCP4.5 ou RCP8.5** (Tableau D-1 et Tableau D-2; section 3.4.4).

Tendances des tempêtes dans le système laurentien

Les résultats sont résumés selon les types de tempêtes.

- **Tornades :**
 - o Il y a beaucoup d'incertitudes quant au nombre réel de tornades. Selon les régions, leur nombre pourrait être de 78% à 283% plus élevé que le nombre de tornades rapportées et détectées. La détection au-dessus de l'eau est encore plus difficile. Les tornades sont beaucoup plus fréquentes dans la péninsule ontarienne que le long du fleuve Saint-Laurent. Elles sont très rares dans le golfe du Saint-Laurent (section 4.1).
 - o Il n'y a pas encore d'informations quant à l'évolution du nombre et de la force des tornades, car les modèles climatiques n'ont pas encore la capacité de les simuler et leur nombre sur la période historique 1981-2010 est trop incertain (section 4.1).

- **Les tempêtes tropicales, les ouragans et les cyclones post-tropicaux :**
 - D'après les données climatiques du Centre canadien de prévision des ouragans (CCPO) de la période 1951-2008, **4 tempêtes nommées** (tempêtes tropicales et post-tropicales) et **2 ouragans** transitent typiquement chaque année par la zone d'intervention du CCPO. Il n'y a **pas plus de 4 ouragans majeurs par décennie** dans cette zone (section 4.2; Figure 4-2; Figure G-5).
 - Très peu de ces systèmes d'origine tropicale ont une trajectoire qui leur permet d'atteindre directement le golfe du Saint-Laurent et, dans une moindre mesure, le fleuve Saint-Laurent et même la région des Grands Lacs (section 4.2; Figure 4-3).
 - Les connaissances sont insuffisantes pour se prononcer sur l'effet des changements climatiques sur le nombre, la force et les trajectoires des tempêtes d'origine tropicale dans l'Atlantique Nord. Il n'est pas possible de savoir quel sera leur potentiel à se transformer, ou non, en cyclones post-tropicaux ou à atteindre la grande région du fleuve et du golfe Saint-Laurent (section 4.2).

- **Les dépressions extratropicales, typiques des latitudes moyennes :**
 - **En hiver**, l'évolution des GES selon le RCP4.5 ne semble pas avoir d'effet significatif sur les dépressions pour l'ensemble de la région d'intérêt. Les projections basées sur le RCP8.5, penchent pour une diminution significative des dépressions vers la fin du 21^e siècle. Le consensus est élevé pour les Grands Lacs et la portion fluviale, mais moindre pour l'estuaire. Les changements ne sont pas significatifs pour le golfe (section 4.3.1).
 - **En été**, on s'attend à une diminution des dépressions, en nombre et en intensité, des Grands Lacs jusqu'au golfe. Tant pour le scénario RCP4.5 que pour le RCP8.5, les résultats ne sont significatifs que vers la fin du 21^e siècle. Le consensus entre les modèles et les études est plus élevé pour les Grands Lacs et le fleuve, mais faible pour le golfe (section 4.3.2).
 - Le nombre restreint d'études et les difficultés des modèles climatiques globaux à prendre en compte les effets locaux limitent la confiance dans les résultats. Leurs lacunes dans la représentation des grands modes de variabilité climatique sont une limitation importante.

- En raison des difficultés des modèles climatiques à bien simuler les régimes des tempêtes tropicales et extratropicales et de leur incapacité actuelle à simuler les tornades, il n'est pas encore possible de tirer des conclusions fiables sur les répercussions de l'évolution des divers types de tempêtes sur les épisodes de vents forts.

- Le nombre de tempêtes tropicales et extratropicales fluctue à l'échelle interannuelle et à l'échelle décennale sous l'influence des grands modes de variabilité climatique (NAO, ENSO, etc.). Le fait que les modèles climatiques peinent à bien représenter ces grands modes de variabilité limite la confiance dans les projections climatiques pour ces types de tempêtes (sections 4.2 et 4.3.1).

Tendance des conditions de glace dans le système laurentien

- Durant la période **1981-2010**, la **tendance décennale de la couverture accumulée totale** est de **-3,98%** [-7,77 ; -0.,19] pour le lac **Supérieur**, **-1,5%** [-3,2 ; 0,2] pour le lac **Michigan**, **-2,7%** [-5,97 ; 0,57] pour le lac **Huron**, **-2,04%** [-6,82 ; 2,74] pour le lac **Érié** et de **-1,37%** [-2,57 ; -0,17] pour le **lac Ontario**. Bien que les tendances décennales soient à la baisse pour tous les lacs, elles ne sont **significatives que pour les lacs Supérieur et Ontario**. Dans le cas du lac Érié, il subsiste même un doute sur le signe de la tendance (section 5.1 et Figure H-1; Figure H-3; Figure H-5; Figure H-7; Figure H-9).
- **Les tendances décennales de la couverture maximale de glace de chacun des lacs entre 1981-2010**, bien qu'à la baisse, **ne sont pas significatives et l'erreur sur la tendance est très souvent plus élevée que la tendance** elle-même. Les valeurs sont de **-11,84%** [-25,05 ; 1,37] pour le lac **Supérieur**, de **-6,43%** [-13,65 ; 0,79] pour le lac **Michigan**, de **-9,23%** [-19,11 ; 0,65] pour le lac **Huron**, de **-2,57%** [-15,16 ; 10,02] pour le lac **Érié** et de **-5,68%** [-12,11 ; 0,75] pour le lac **Ontario** (section 5.1; Figure H-2; Figure H-4; Figure H-6; Figure H-8; Figure H-10).
- La **couverture accumulée totale est en déclin pour le golfe du Saint-Laurent sur la période 1981-2010** avec une **tendance décennale significative de -1.94%** [-3,36 ; -0,52] (section 5.4 et Figure H-11).
- Le **déclin de la couverture de glace maximale sur la période 1981-2010** est plus clair avec une **tendance décennale de -4,56%** [-8,1 ; -1,02] dans le **golfe du Saint-Laurent** (section 5.4 et Figure H-12).
- **L'estuaire moyen et l'estuaire maritime** sont les secteurs où les concentrations et les épaisseurs de glace sont les plus élevées et, bien qu'il **devrait y avoir encore de la glace vers le milieu du 21^e siècle**, les **pertes y seront très importantes**. Le déclin sera plus prononcé dans l'estuaire maritime, particulièrement le long des côtes gaspésiennes (section 5.3).
- À l'exception des zones situées le long des côtes à l'ouest du golfe, les quelques simulations climatiques analysées suggèrent que **le golfe Saint-Laurent sera libre de glace marine au milieu du 21^e siècle** (section 5.4).

- Conséquemment à la **réduction du couvert de glace**, on peut s'attendre à une **augmentation de la hauteur des vagues dans l'estuaire maritime et dans le golfe** (section 5.4).

Les connaissances développées dans le cadre de cette initiative permettent de combler certaines lacunes et de faire des gains pour à la fois améliorer la vue d'ensemble des caractéristiques du climat influentes de ce secteur et comprendre leur évolution dans le système Saint-Laurent.

Se préparer et en tenir compte à l'échelle du transport maritime et des zones portuaires stratégiques du système laurentien permettra aux décideurs de faire des choix plus éclairés visant à capter les nouvelles occasions d'affaires et favoriser des modèles d'affaires plus résilients et adaptés à la réalité climatique.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	5
TABLE DES MATIÈRES	14
LISTE DES FIGURES	16
LISTE DES TABLEAUX	20
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	21
1 Introduction	23
2 Évaluation de la probabilité des RCP	25
2.1 Scénarios d'émissions vs concentrations.....	29
2.2 Revue de littérature.....	33
2.2.1 Ensembles probabilistes d'émissions.....	33
2.2.2 Publications sur la probabilité des RCP	40
2.3 Estimation de la probabilité des RCP à partir des trajectoires d'émissions.....	43
2.4 Discussion	49
3 Indicateurs climatiques	50
3.1 Mise en contexte.....	50
3.2 Choix des indicateurs climatiques	50
3.3 Méthodologie	53
3.3.1 Les températures.....	55
3.3.2 Les précipitations totales	55
3.3.3 Verglas	56
3.3.4 Précipitations neigeuses et neige au sol	57
3.3.4.2 Scénarios d'épaisseur de la neige au sol pour le calcul de l'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans.....	59
3.3.5 Vents	60
3.4 Résultats et discussions.....	61
3.4.1 Indicateurs relatifs aux températures	61
3.4.2 Indicateurs relatifs aux précipitations totales	64
3.4.3 Indicateurs relatifs au verglas	66
3.4.4 Indicateurs relatifs à la neige	67

3.4.4.2	L'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans	67
3.4.5	Indicateurs relatifs au vent	69
4	Tendances des tempêtes	70
4.1	Les tornades	70
4.2	Les tempêtes d'origine tropicale.....	73
4.3	Dépressions extratropicales	76
4.3.1	Les dépressions extratropicales en hiver	77
4.3.2	Les dépressions extratropicales en été	78
5	Tendances du couvert de glace.....	80
5.1	Les Grands Lacs.....	80
5.2	Le fleuve Saint-Laurent et l'estuaire fluvial	84
5.3	L'estuaire du Saint-Laurent	84
5.4	Le golfe du Saint-Laurent.....	84
6	Recommandations pour travaux futurs.....	88
7	Conclusion	89
	RÉFÉRENCES	89
	Annexe A	94
	Annexe B	95
	Annexe C	100
	Annexe D	109
	Annexe E	116
	Annexe F.....	124
	Annexe G	133
	Annexe H	138

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1.	Les changements de température à l'échelle globale sont approximativement proportionnels aux émissions cumulatives de CO ₂	26
Figure 2-2.	Progression des émissions de CO ₂ dans le monde, au Canada et au Québec entre 1990 et 2019.....	27
Figure 2-3.	Évolution de la concentration moyenne de CO ₂ dans l'atmosphère.	28
Figure 2-4.	Concentration de CO ₂ moyenne en 2019.....	28
Figure 2-5.	Différents MEI génèrent des séries d'émissions qui sont converties en concentrations par le modèle simplifié MAGICC6.	30
Figure 2-6.	Comparaison entre les concentrations de CO ₂ simulées par les modèles de climat de l'expérience esmrcp85 (traits bleus) avec celles du RCP8.5 utilisé dans CMIP5 (trait rouge pointillé).	31
Figure 2-7.	Comparaison entre les émissions diagnostiquées des flux des modèles de climat de CMIP5 pour la période historique (gris) et les quatre RCP (couleurs).	32
Figure 2-8.	Comparaison de la distribution d'émissions avec celle des scénarios SRES.	35
Figure 2-9.	Comparaison des concentrations de CO ₂ de Sokolov et coll. (2009) avec celles de Webster et coll. (2003)	36
Figure 2-10.	Émissions et émissions cumulatives probabilistes comparées aux RCPs.....	37
Figure 2-11.	Densité de probabilité des émissions et du forçage radiatif comparé aux estimations de l'IPCC-AR5.....	38
Figure 2-12.	Émissions simulées comparées aux RCP.	39
Figure 2-13.	Évaluation de la vraisemblance des SSP par des avis d'experts.	41
Figure 2-14.	Émissions projetées en fonction des engagements des pays dans le cadre de l'accord de Paris.	42
Figure 2-15.	L'émission de carbone fossile augmente initialement le stock de carbone dans l'atmosphère, mais est éventuellement partiellement redistribuée dans l'océan et le sol.	44
Figure 2-16.	Moyenne (ligne pleine) et déviation standard (enveloppe) des lois normales décrivant le lien entre concentrations des RCP et émissions compatibles diagnostiquées à partir des simulations climatiques de l'ensemble CMIP5.	45
Figure 2-17.	Schéma de la méthodologie développée dans ce chapitre.	46
Figure 2-18.	Simulations stochastiques d'émissions de CO ₂ par trois MEI probabilistes.	47
Figure 2-19.	Vraisemblance des RCP selon les émissions cumulatives probabilistes de Fyke et Matthews (2015).....	48
Figure 2-20.	Vraisemblance des RCP selon les émissions cumulatives probabilistes de Capellán-Pérez et coll. (2016).....	48
Figure 2-21.	Vraisemblance des RCP selon les émissions cumulatives probabilistes de Raftery et coll. (2017).....	48
Figure 3-1.	Les étapes du processus d'élaboration d'un ensemble de scénarios climatiques à partir d'un ensemble de simulations produites par des modèles climatiques.....	53

Figure 3-2.	Carte des deux zones d'analyse : Montréal (a) et Contrecoeur (b).....	54
Figure 3-3.	Évolution du total annuel des cycles gel-dégel 24h pour (a) le port de Montréal et (b) le terminal Contrecoeur.	63
Figure 3-4.	Maximum annuel de précipitations totales quotidiennes pour (a) le port de Montréal et (b) le terminal de Contrecoeur.	65
Figure 4-1.	Tornades détectées entre 2017 et 2021 selon la base de données du <i>Northern Tornadoes Project</i> pour les occurrences survenant : a) en Ontario dans les environs des lacs Huron, Érié et Ontario, b) au Québec et c) dans les provinces de l'Atlantique.	72
Figure 4-2.	Nombre de cyclones tropicaux dans l'Atlantique dont la trajectoire s'est trouvée dans la zone d'intervention du Centre canadien de prévisions des ouragans d'ECCC pour chaque décennie de la période 1951-2008 d'après les données de la <i>Climatologie des ouragans pour l'est du Canada</i>	74
Figure 4-3.	Nombre de désastres causés par des tempêtes tropicales et des ouragans en Ontario, au Québec, au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse, à l'Île-du-Prince-Édouard d'après la base de données canadiennes sur les catastrophes de Sécurité publique Canada entre 1950 et 2014.	75
Figure 5-1.	Dates de l'englacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.	82
Figure 5-2.	Dates du déglacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.	83
Figure 5-3.	Dates de l'englacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.....	86
Figure 5-4.	Dates du déglacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.....	87
Figure E-1.	Évolution annuelle du nombre de jours ayant des températures journalières minimales inférieures à 25°C au site du port de Montréal en (a) décembre, (b) janvier et (c) février	116
Figure E-2.	Évolution du nombre de jours avec des températures maximales supérieures à 35°C pour les mois de (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août et (e) septembre pour le site du port de Montréal.....	117
Figure E-3.	Évolution annuelle des vagues de chaleur d'au moins 3 jours pour le site du port de Montréal avec en (a) l'évolution du nombre de vagues par année, (b) la durée de la vague la plus longue de l'année et (c) le nombre total de jours en condition de vagues par année, (b) la durée de la vague la plus longue de l'année et (c) le nombre total de jours en condition de vague de chaleur.	118
Figure E-4.	Évolution annuelle des caractéristiques de la saison de gel au site du port de Montréal.	119
Figure E-5.	Évolution annuelle de l'amplitude thermique diurne au site du port de Montréal.	120
Figure E-6.	Évolution annuelle des vagues de froid au port de Montréal.	121
Figure E-7.	Évolution annuelle du total saisonnier des précipitations pour le port de Montréal pour (a) l'hiver, (b) le printemps, (c) l'été et (d) l'automne.....	122

Figure E-8. Évolution annuelle de l'intensité moyenne des précipitations quotidiennes lorsqu'elles sont supérieures à 10mm en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d) pour le site du port de Montréal.....	122
Figure E-9. Évolution annuelle de la durée maximale d'une période sèche pour le site du port de Montréal en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d).....	123
Figure F-1. Évolution annuelle du nombre de jours ayant des températures journalières minimales inférieures à -25°C au site terminal de Contrecoeur en (a) décembre, (b) janvier et (c) février.	124
Figure F-2. Évolution du nombre de jours avec des températures maximales supérieures à 35°C pour les mois de (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août et (e) septembre pour le site du terminal de Contrecoeur.	125
Figure F-3. Évolution annuelle des vagues de chaleur d'au moins 3 jours pour le site du terminal de Contrecoeur avec en (a) l'évolution du nombre de vagues par année, (b) la durée de la vague la plus longue de l'année et (c) le nombre total de jours en condition de vague de chaleur.	126
Figure F-4. Évolution annuelle des caractéristiques de la saison de gel au site du terminal de Contrecoeur.	127
Figure F-5. Évolution annuelle de l'amplitude thermique diurne au site du terminal de Contrecoeur.	128
Figure F-6. Évolution annuelle des vagues de froid au terminal de Contrecoeur.	129
Figure F-7. Évolution annuelle du total saisonnier des précipitations pour le terminal Contrecoeur pour (a) l'hiver, (b) le printemps, (c) l'été et (d) l'automne.	130
Figure F-8. Évolution annuelle de l'intensité moyenne des précipitations quotidiennes lorsqu'elles sont supérieures à 10mm en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d) pour le site du terminal Contrecoeur.	131
Figure F-9. Évolution annuelle de la durée maximale d'une période sèche pour le site du terminal Contrecoeur en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d).	132
Figure G-1. Nombre de tornades vérifiées selon l'échelle Fujita en Ontario entre 1980 et 2009 d'après la Base de données nationale sur les tornades du Canada :	133
Figure G-2. Nombre de tornades vérifiées selon l'échelle Fujita au Québec entre 1980 et 2009 d'après la Base de données nationale sur les tornades du Canada:	134
Figure G-3. Nombre de tornades vérifiées selon l'échelle Fujita au Nouveau Brunswick, en Nouvelle-Écosse, à l'Île-du-Prince-Édouard et à Terre-Neuve et Labrador entre 1980 et 2009 d'après la Base de données nationale sur les tornades du Canada.	135
Figure G-4. Zone de responsabilité du Centre canadien de prévision des ouragans (tirets) et limites des régions de prévisions maritimes d'ECMC (lignes bleues).....	136
Figure G-5. Nombre de cyclones tropicaux dont la trajectoire s'est trouvée dans la zone d'intervention du Centre canadien de prévision des ouragans (CCPO) d'ECMC pour chaque année entre 1951 et 2008.	137
Figure H-1. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Supérieur.	138
Figure H-2. Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Supérieur.	139

Figure H-3.	Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Michigan.....	140
Figure H-4.	Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Michigan.	141
Figure H-5.	Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Huron.	142
Figure H-6.	Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Huron.....	143
Figure H-7.	Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Érié.	144
Figure H-8.	Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Érié.....	145
Figure H-9.	Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Ontario.	146
Figure H-10.	Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Ontario.....	147
Figure H-11.	Total accumulé de la couverture des glaces entre le 12 novembre et le 27 août pour chaque année de la période 1981-2010 pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. 148	
Figure H-12.	Couverture de glace maximale entre le 12 novembre et le 27 août pour chaque année de la période 1981-2010 pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. ..	149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1.	Liste des indicateurs climatiques analysés et définitions	51
Tableau 4-1.	Comparaison entre les vitesses du vent de l'échelle F et celles de l'échelle EF (adaptée pour Environnement Canada) avec les catégories de dommages	71
Tableau B-1.	Liste et caractéristiques des simulations climatiques régionales retenues pour chaque variable à des fins de scénarisation climatique.	98
Tableau C-2.	Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour la précipitation totale.	104
Tableau C-3.	Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour le verglas.	105
Tableau C-4.	Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour les précipitations neigeuses.	106
Tableau C-5.	Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour la neige au sol.	107
Tableau C-6.	Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour la vitesse du vent à la hauteur de l'anémomètre.	108
Tableau D-1.	Port de Montréal.....	109
Tableau D-2.	Terminal de Contrecoeur	113
Tableau G-1.	Classification des cyclones tropicaux de l'OMM pour le nord-est du Pacifique et le nord de l'Atlantique, incluant les seuils de vitesses de vents utilisés par le Centre canadien de prévisions des ouragans (CCPO).....	136

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
CC	Changements climatiques
CCPO	Centre canadien de prévision des ouragans
CEPMMT / ECMWF	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme/ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
CIRRELT	Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project <i>en français : Projet d'intercomparaison des modèles couplés</i>
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
DICE	Dynamic Integrated Climate Change
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
EF	Enhanced Fujita <i>en français : Échelle de Fujita modifiée</i>
ENSO	El Nino/Southern Oscillation
EPPA	Emissions Predictions and Policy Analysis
Era	ECMWF Re-Analysis <i>en français : Réanalyses du CEPMMT</i>
ÉRAT	Évaluation des risques liés aux actifs de transport
FUND	Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution
GCAM	Global Change Analysis Model

GES	Gaz à effet de serre
GIEC/	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MAGICC	Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change
MEI/	Modèles d'évaluation intégrée
IAM	Integrated Assessment Models
MERGE	Model for Evaluation Regional and Global Effects
MGC	Modèles globaux de climat
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MIT-IGSM	Massachusetts Institute of Technology Integrated Global System Model
MRC	Modèles régionaux climat
MRCC5 / CRCM5	Modèle régional canadien du climat version 5 / Canadian Regional Climate Model version 5
NAO	Northern Atlantic Oscillation
NTP	Northern Tornadoes Project
PIB	Produit intérieur brut
RCP	Representative Concentration Pathway
SCG	Service canadien des glaces d'ECCC
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSP	Statistical signal Processing
UdeM	Université de Montréal
WITCH	World Induced Technical Change Technical Change Hybrid

1 INTRODUCTION

Le système saint-laurentien offre un réseau de navigation et portuaire unique et compétitif au cœur du continent nord-américain. Son développement se caractérise par une accélération des processus de libéralisation des transports maritimes (p. ex. flux, routes, structure tarifaire, etc.) et une plus grande autonomie des administrations portuaires dans l'organisation de leurs opérations. Des bouleversements profonds s'additionnent à ces derniers tels que l'arrivée des technologies de rupture, la décarbonisation du secteur et le besoin pressant de s'adapter aux conditions liées à l'évolution de la saisonnalité et des extrêmes climatiques.

En outre, pour pallier la quasi-absence de connaissances intégrées, un premier travail a été entrepris entre 2017 et 2019 par le Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT) de l'Université de Montréal (UdeM) en partenariat avec Ouranos pour dégager la vulnérabilité des ports stratégiques du Saint-Laurent, dont celui de Montréal, aux changements climatiques. Les principaux objectifs visaient à documenter l'état des connaissances en matière d'impacts et opportunités potentiels des changements climatiques et environnementaux pour le transport maritime et le système portuaire du Saint-Laurent et dresser un cadre d'analyse préliminaire permettant d'évaluer de manière plus approfondie les risques associés. Ce rapport technique a notamment permis d'identifier les variables et indicateurs climatiques qui peuvent affecter les composantes du transport maritime et portuaire du Saint-Laurent et d'en estimer quelques-uns en climat historique (1981-2010) et futur (2041-2070).

Dans le cadre du programme d'évaluation des risques liés aux actifs de transport (É RAT) lancé par Transports Canada, l'initiative intitulée « Résilience des composantes d'infrastructures de transport et de logistique du port de Montréal: compilation, analyse et options d'aide à la décision dans un contexte de changement climatique » permet d'aller plus loin. L'étude propose de mesurer les impacts des variables et indicateurs climatiques pour les trois dimensions du port de Montréal: ses infrastructures, ses opérations et ses chaînes d'approvisionnement. Ouranos est responsable de l'activité 2 qui consiste à évaluer l'évolution des indicateurs climatiques pouvant affecter le transport maritime, portuaire et multimodal du port.

Dès janvier 2020, un processus de consultations s'est activé entre les équipes de recherche impliquées et les gestionnaires du port de Montréal afin de saisir les grands enjeux logistiques et opérationnels. Le choix des scénarios de concentration de gaz à effet de serre (RCP- Representative Concentration Pathways-) a été discuté. On voulait s'assurer de leur plausibilité à long terme pour tenir compte du cycle de vie des infrastructures existantes à Montréal et des investissements liés à de nouvelles installations à Contrecoeur, l'extension portuaire de Montréal. De plus, cinq regroupements d'indicateurs climatiques ont été retenus et s'appliquent aux données de températures, précipitations, neige au sol, verglas et vent. Une revue de littérature, en complément à ces informations, apporte un éclairage sur les

connaissances les plus à jour sur les tempêtes et les conditions de glace dans le système laurentien.

La présente synthèse des connaissances techniques est divisée en cinq chapitres. L'analyse sur la probabilité des RCP4.5 et 8.5 dans la prise de décision et de planification du secteur portuaire et maritime est abordée dans le chapitre 2. Les résultats des différents indicateurs en passé récent (1981-2010) et les tendances futures pour 2041-2070 et 2071-2100 sont présentés au chapitre 3. Deux revues de littérature sur les tendances des tempêtes et sur les conditions de glace du système laurentien (chapitres 4 et 5) complètent l'acquisition de connaissances sur le climat. Les deux dernières sections portent sur les recommandations en lien avec les travaux futurs et les principales conclusions (chapitres 6 et 7).

2 ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ DES RCP

Auteur principal : David Huard (Ouranos)
Auteurs/collaborateurs : Gaëtan Lafrance (INRS-EMT), Jeremy Fyke (ECCC), Antti-Ilari Partanen (FMI), Diane Chaumont (Ouranos)

La grande majorité des études en changements climatiques, y compris celle fournie dans ce rapport, sont conditionnées par un ou plusieurs scénarios de concentrations de GES. Un scénario de concentration de GES est une série temporelle de l'évolution de la concentration du dioxyde de carbone et des autres GES et aérosols dans l'atmosphère. Les modèles de climat dérivent les conséquences climatiques de ces scénarios, sous la forme de séries spatio-temporelles de variables comme la température, la pression, les vents, la précipitation, etc. On doit donc interpréter ces changements du climat comme étant *conditionnels* au scénario de GES utilisé.

Les scénarios de GES ont une influence déterminante sur les projections de changements climatiques. En effet, les changements globaux de température suivent une relation quasi linéaire avec les émissions cumulatives de carbone (Figure 2-1). Cette relation implique que chaque térationne de carbone émis dans l'atmosphère augmente la température globale d'environ 1.9°C (Spafford & MacDougall, 2020), peu importe la rapidité avec laquelle ce carbone est émis. La trajectoire des émissions historiques (Figure 2-2) illustre la progression constante de ces émissions à l'échelle mondiale, et ce, malgré plusieurs ententes internationales visant à réduire les émissions. Malgré l'absorption d'une partie du carbone dans l'océan et la surface terrestre, ces émissions font progressivement augmenter la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (Figure 2-3). Il est important de noter que les GES sont bien mélangés dans l'atmosphère, si bien que les différences régionales des émissions sont rapidement gommées (Figure 2-4). En conséquence, même si une région du monde n'émettait plus aucun carbone dans l'atmosphère, elle ferait néanmoins face aux impacts des changements climatiques.

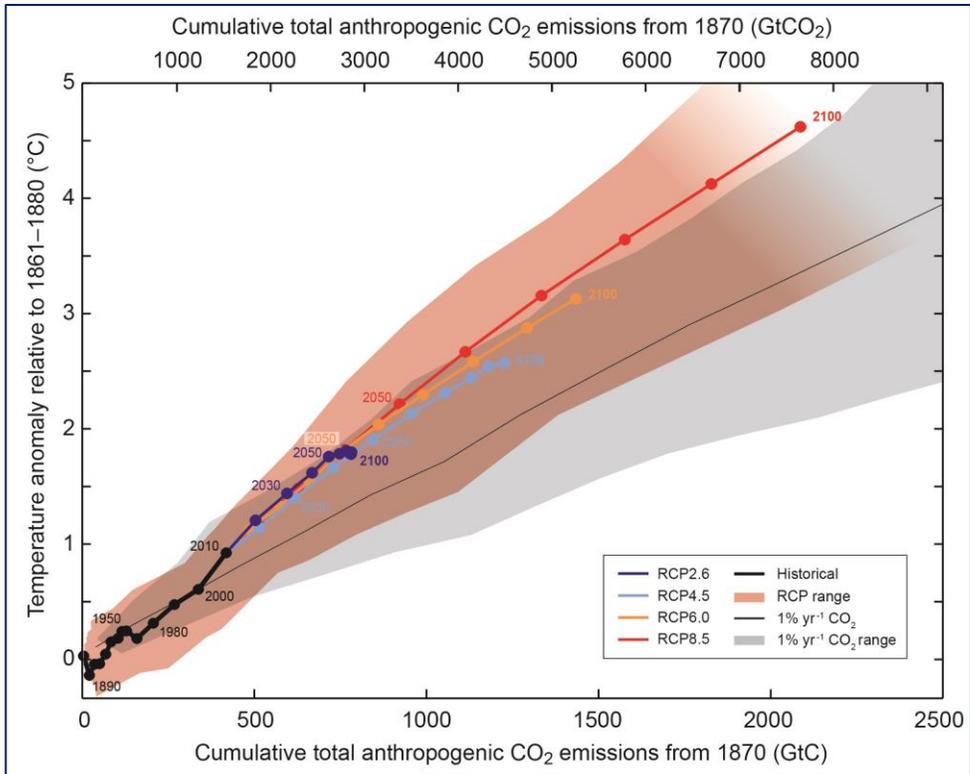


Figure 2-1. Les changements de température à l'échelle globale sont approximativement proportionnels aux émissions cumulatives de CO₂. Cette relation tient non seulement pour les émissions historiques observées, mais également pour les scénarios futurs évalués par les modèles de climat. Tiré de GIEC (2013).

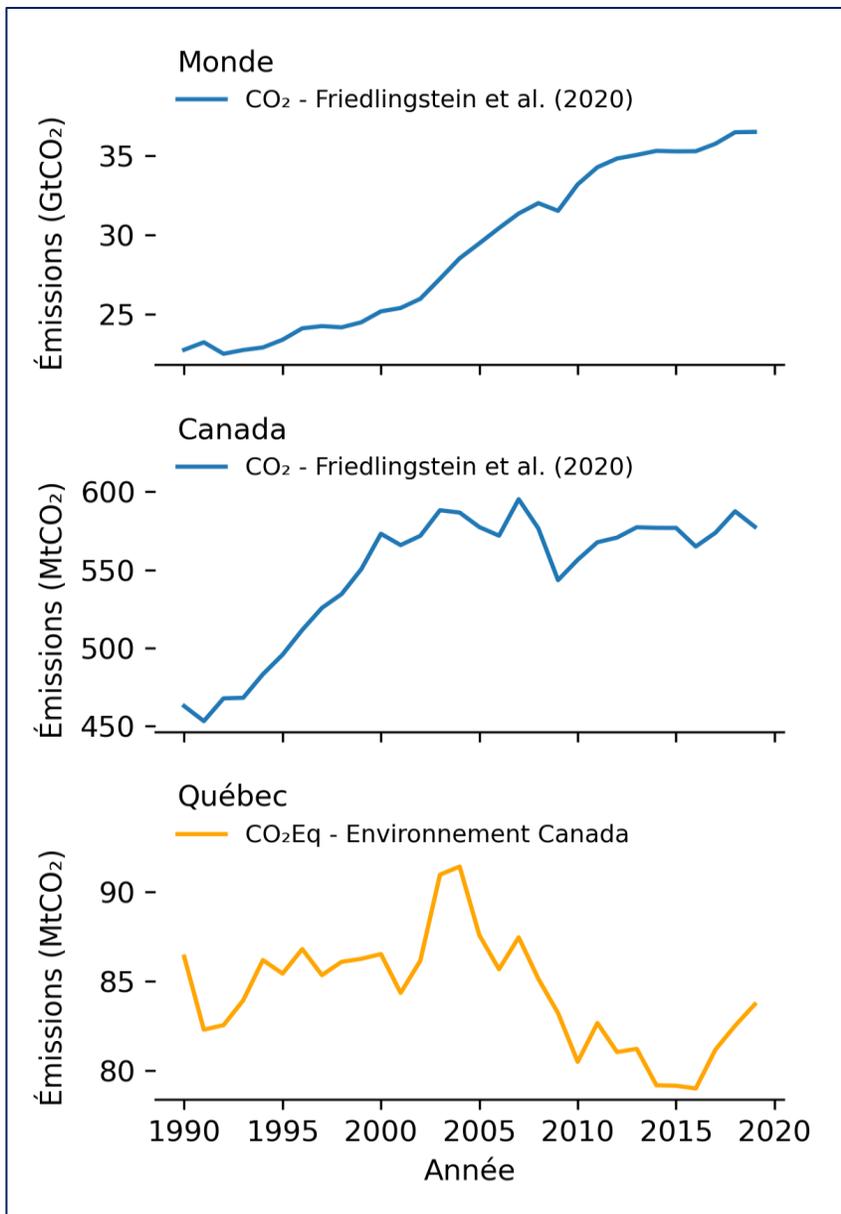


Figure 2-2. Progression des émissions de CO₂ dans le monde, au Canada et au Québec entre 1990 et 2019.

Les émissions au Québec sont calculées en CO₂ équivalent, ce qui inclue les effets des autres GES. Données tirées de Friedlingstein et coll. (2020) et d'Environnement et Changements climatiques Canada.

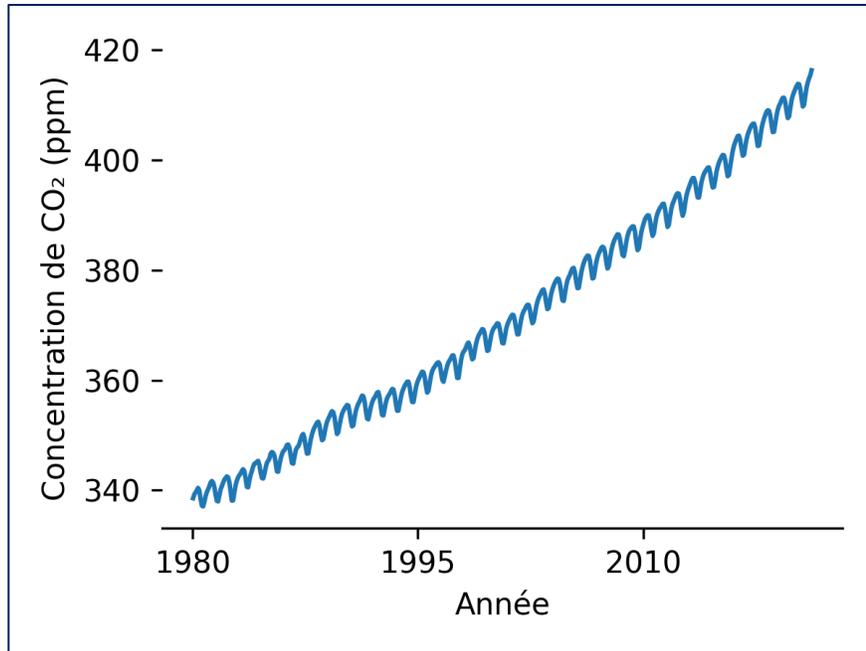


Figure 2-3. Évolution de la concentration moyenne de CO₂ dans l'atmosphère. Données tirées du Global Monitoring Observatory (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>)

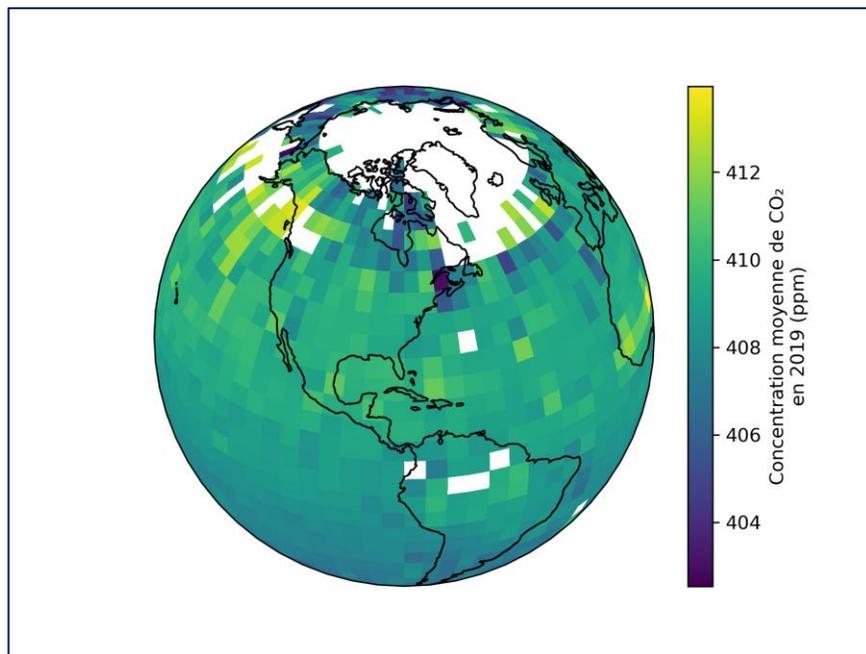


Figure 2-4. Concentration de CO₂ moyenne en 2019. Malgré que les émissions soient concentrées dans les régions densément peuplées des pays industrialisés, les concentrations sont relativement uniformes en raison des processus de mélange de l'atmosphère. Données C3S XCO₂ (obs4MIPs) obtenues via Copernicus Climate Change Service.

Dans une perspective d'analyse de risque, il serait utile d'obtenir la probabilité des différents scénarios de concentrations de GES afin de pouvoir mieux évaluer le risque des impacts en découlant (King et coll. 2015). Or, la science du climat comme telle ne se prononce pas sur la vraisemblance des différents scénarios d'émissions de GES, la question se situant davantage à l'intersection de l'économie, de la démographie et du climat.

Les chercheurs qui créent les différents scénarios de GES développent un type de modèle appelé modèles d'évaluation intégrée (MEI). Ces modèles permettent de poser des hypothèses sur les politiques publiques, la géopolitique, l'évolution démographique et le développement technologique, pour en dériver les conséquences en termes d'émissions de GES. Il existe plusieurs dizaines de MEI, chacun décrivant à sa manière les interactions socioclimatiques. Chacun de ces modèles étudie différents récits narratifs (en anglais « story lines »), chaque récit étant composé d'un bouquet d'hypothèses socio-économiques. La combinaison de plusieurs dizaines de modèles et de récits narratifs aboutit en plusieurs centaines de scénarios d'émissions différents, sans toutefois que cet ensemble de scénarios ait une interprétation probabiliste. Dans le cadre de CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), la communauté climatique a sélectionné quatre scénarios provenant de MEI couvrant une large gamme d'émissions. Ces quatre scénarios représentatifs, appelés profils représentatifs d'évolution de concentration ou scénarios RCP (van Vuuren et coll., 2011), sont convertis en concentrations de GES et utilisés par les modélisateurs pour simuler l'évolution du climat.

L'objectif de ce chapitre est d'offrir un point de vue sur la vraisemblance des RCP utilisés dans le cadre de ce projet, soit les RCP4.5 et RCP8.5. Ce point de vue est fondé sur une revue de la littérature, ainsi que sur une analyse probabiliste de scénarios stochastiques d'émissions de GES.

2.1 SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS VS CONCENTRATIONS

Les travaux présentés dans le chapitre visent à répondre à la question: « Quelle est la probabilité que les scénarios de *concentrations* de GES décrits par les RCP se réalisent? » Il est important de noter que cette question est différente de « Quelle est la probabilité de suivre la trajectoire *d'émissions* décrites par les RCP? » La nuance entre scénarios d'*émissions* et scénarios de *concentrations* est importante et mérite d'être approfondie.

Les indicateurs climatiques, décrits dans les chapitres suivants, sont basés sur les simulations de modèles climatiques auxquelles on impose des concentrations de GES, calculées à partir des émissions décrites par les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Dans ces simulations, les concentrations de GES jouent le rôle de conditions aux frontières. Ce choix méthodologique, l'imposition de concentrations de GES, est en partie justifié par le fait que plusieurs modèles de climat n'incluent pas de cycle du carbone, et donc ne peuvent pas utiliser une série d'émissions de GES en intrant.

Les changements climatiques estimés dans ce rapport à partir des modèles forcés par RCP4.5 et RCP8.5 sont donc conditionnels à des scénarios de concentrations, plutôt que des scénarios d'émissions. La différence est critique, car il existe des incertitudes importantes sur le cycle du carbone (Friedlingstein et coll., 2014), particulièrement dans ses composantes terrestres. Le même scénario d'émission peut, en fonction de la représentation du cycle du carbone par les modèles, mener à des valeurs contrastées de concentrations. Par exemple, un modèle qui, suite à un réchauffement du pergélisol, libère des quantités importantes de carbone, verra sa concentration de GES s'élever beaucoup plus rapidement qu'un modèle dont le pergélisol est plus stable.

Les MEI à partir desquels les RCP sont construits génèrent des séries d'émissions de GES, qui sont converties en concentrations de GES par le modèle MAGICC6 (de l'anglais : Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change), un modèle climatique de complexité réduite. La description du cycle du carbone de MAGICC6 est considérablement simplifiée comparée à celle des modèles de climat ayant produit les simulations de l'ensemble CMIP5. Dans une autre expérience CMIP5, appelée *esmrcp85* (Figure 2-5), les modèles climatiques se voient imposer des *émissions* de GES (Booth et coll., 2012; Friedlingstein et al., 2014). Les modèles de climat peuvent ainsi calculer les concentrations de GES découlant de ces émissions de GES, plutôt que de se voir imposer des concentrations de GES comme dans les expériences RCP4.5 et RCP8.5. Lorsqu'on compare les concentrations de GES du RCP8.5 estimées par MAGICC avec celles estimées par les modèles globaux dans le cadre de l'expérience *esmrcp85* (Booth et coll., 2012), on constate que, relativement à la majorité des modèles ayant participé à l'expérience *esmrcp85*, MAGICC6 tend à sous-estimer considérablement les concentrations de GES (Figure 2-6).

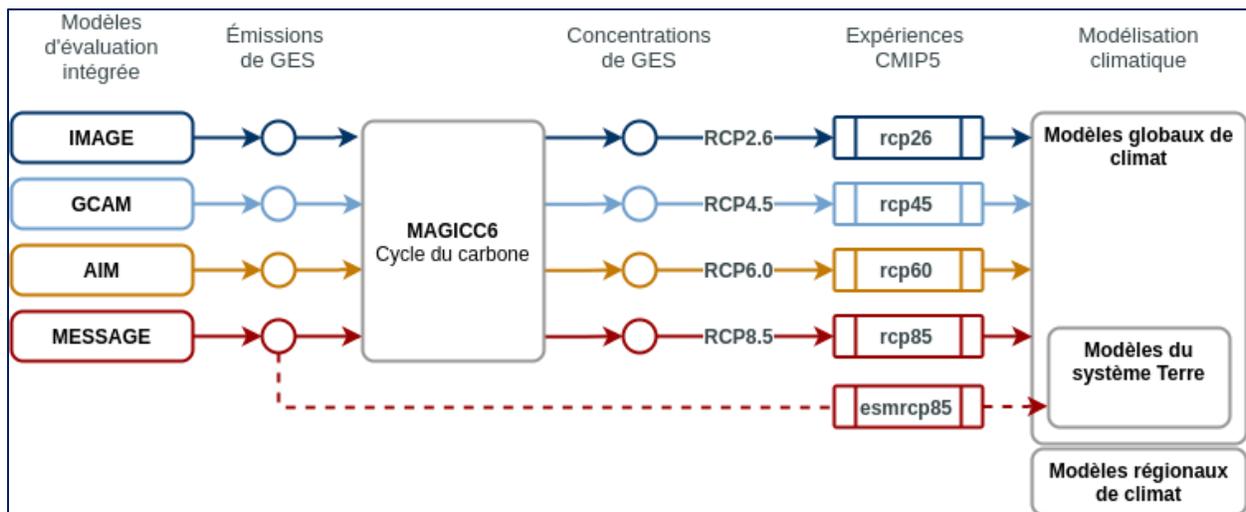


Figure 2-5. Différents MEI génèrent des séries d'émissions qui sont converties en concentrations par le modèle simplifié MAGICC6.

Ces concentrations sont imposées aux modèles climatiques dans le cadre des expériences de CMIP5. L'expérience *esmrcp85* se différencie du fait qu'elle impose aux modèles de climat des séries d'émissions de GES, plutôt que des séries de concentrations.

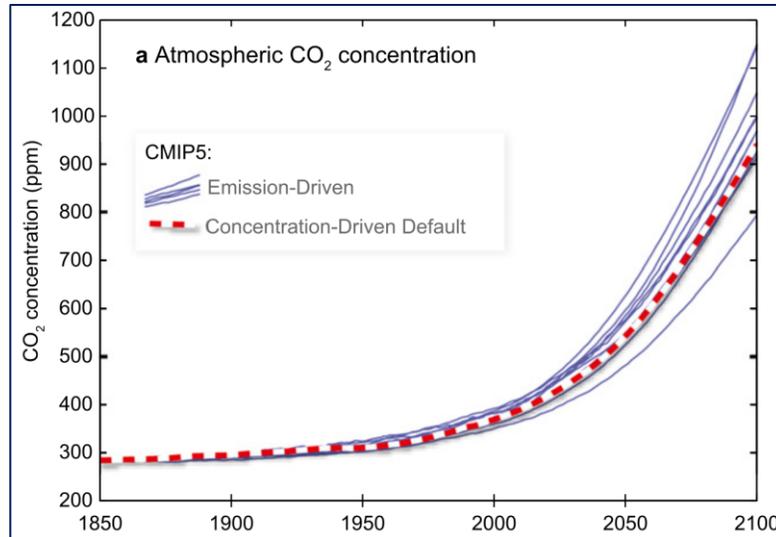


Figure 2-6. Comparaison entre les concentrations de CO₂ simulées par les modèles de climat de l'expérience esmrp85 (traits bleus) avec celles du RCP8.5 utilisé dans CMIP5 (trait rouge pointillé).
Tiré de Friedlingstein et coll. (2014).

Si pour les émissions de GES de RCP8.5 les modèles de climat simulent des concentrations plus élevées que MAGICC6, on peut supposer que pour reproduire les concentrations calculées par MAGICC6, ces mêmes modèles requièrent des émissions de GES plus faibles que celles décrites par RCP8.5. Cette déduction peut être vérifiée en diagnostiquant les émissions de GES à partir des concentrations de GES. En effet, les modèles de climat globaux de l'ensemble CMIP5 simulent les flux de carbone entre l'atmosphère, l'océan et les sols. À l'aide de ces flux et de la série de concentration imposée par les RCP, il est possible d'inférer les émissions de GES d'origine fossile. La Figure 2-7 présente ces émissions diagnostiquées par Jones et coll. (2013). Comme anticipé, pour RCP8.5, les émissions diagnostiquées à partir des concentrations sont plus faibles que les émissions définies par RCP8.5.

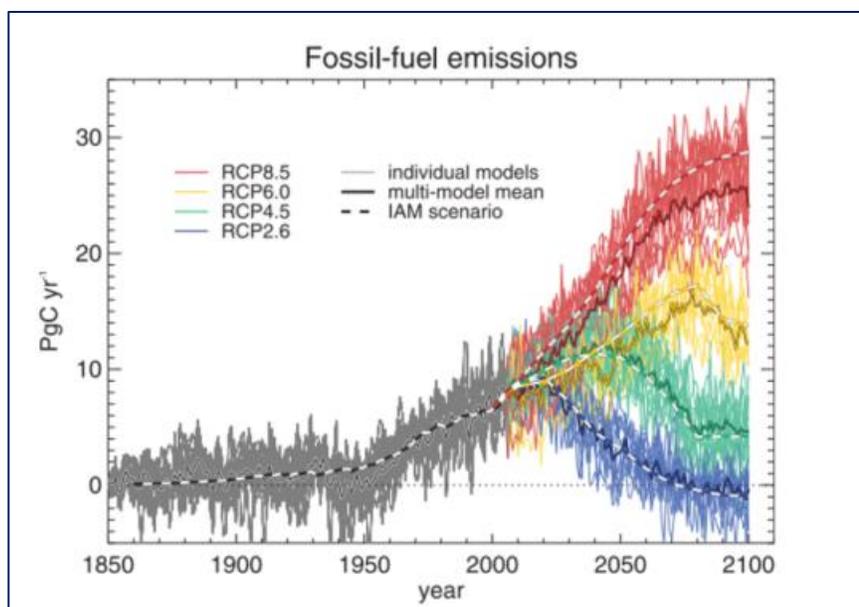


Figure 2-7. Comparaison entre les émissions diagnostiquées des flux des modèles de climat de CMIP5 pour la période historique (gris) et les quatre RCP (couleurs).

Le trait large plein montre la moyenne multimodèle, le trait large pointillé montre le scénario RCP. Tiré de Jones et coll. (2013)

Cette discussion cherche à illustrer l'idée qu'il ne suffit pas d'évaluer la probabilité des émissions des scénarios RCP pour statuer sur la probabilité des impacts découlant de ces scénarios. La démarche d'évaluation des probabilités doit tenir compte du lien entre concentrations et émissions, car ce sont ultimement les scénarios de concentrations qui sont imposés aux modèles climatiques¹.

¹ Un argument analogue peut également être appliqué en amont des scénarios d'émissions. En effet, les scénarios d'émissions sont bâtis sur des hypothèses socio-économiques, et il est tentant d'analyser ces hypothèses afin d'évaluer leur propre vraisemblance et statuer sur la probabilité des scénarios en découlant (King et coll., 2015). Il serait possible, par exemple, de questionner les scénarios de croissance démographique, d'intensité énergétique ou de croissance économique pour rejeter les trajectoires d'émissions résultants. Il faut toutefois noter qu'une erreur d'estimation de la démographie peut compenser une autre erreur de croissance économique et mener à un scénario réaliste, même si les hypothèses sous-jacentes sont irréalistes.

Les scénarios RCP ayant été conçus il y a presque 20 ans, il est assuré que plusieurs des hypothèses formulées à l'époque sont aujourd'hui discréditées. Or, les impacts dérivés des simulations climatiques sont agnostiques à ces hypothèses socio-économiques. Plutôt que de faire une critique de ces hypothèses (voir Riahi et coll. (2011) pour une description des hypothèses derrière RCP8.5), il nous semble plus fructueux de tenter d'estimer directement la probabilité des concentrations utilisées pour estimer les impacts.

2.2 REVUE DE LITTÉRATURE

Une revue de littérature a été réalisée afin d'identifier les articles discutant d'une interprétation probabiliste des scénarios d'émissions de GES. Des précisions sur la méthodologie employée pour identifier et trier les articles sont données en Annexe A. Les articles choisis sont ceux dont les auteurs ont généré des ensembles probabilistes d'émissions avec des MEI. En posant des distributions a priori pour les différents paramètres du modèle, distributions reflétant un niveau de confiance, il est possible d'utiliser des méthodes Monte-Carlo pour générer des ensembles de trajectoires d'émissions stochastiques pouvant être interprétés comme une densité de probabilité. Cette idée de définir des densités de probabilités pour les paramètres des MEI n'est pas nouvelle, mais ne semble pas être devenue la norme, et relativement peu de modèles peuvent se targuer de générer des ensembles probabilistes.

Les deux prochaines sections décrivent donc des publications où les MEI sont utilisés de manière à soutenir une interprétation probabiliste de leurs résultats. Dans la première section, cette interprétation est utilisée pour évaluer des politiques, alors que dans la deuxième, les modèles génèrent, entre autres, des ensembles probabilistes d'émissions de GES qui pourront nous permettre d'estimer la vraisemblance des RCP.

2.2.1 Ensembles probabilistes d'émissions

Une source d'inspiration pour plusieurs des auteurs ayant contribué à la recherche sur les émissions probabilistes est le chapitre de Moss et Schneider (2000) dans un document visant à uniformiser le traitement des incertitudes dans les différentes équipes de rédaction du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le chapitre commence par rappeler la fonction du GIEC:

“The IPCC function is to assess the state of our understanding and to judge the confidence with which we can make projections of climate change and its impacts. These tentative projections will aid policymakers in deciding on actions to mitigate or adapt to anthropogenic climate change, which will need to be re-assessed on a regular basis. It is recognized that many remaining uncertainties need to be reduced in each of [many] disciplines, which is why IPCC projections and scenarios are often expressed with upper and lower limits. These ranges are based on the collective judgment of the IPCC authors and the reviewers of each chapter, but it may be appropriate in the future to draw on formal methods from the discipline of decision analysis to achieve more consistency in setting criteria for high and low range limits. Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Chapter 11 (McBean et al., 1996)”

Les auteurs rappellent qu'à défaut de présenter une évaluation des incertitudes, les lecteurs vont eux-mêmes s'imaginer une distribution:

“The research community must also bear in mind that users of IPCC reports often assume for themselves what they think the authors believed to be the distribution of probabilities when the authors do not specify it for themselves. [...]

We believe it is more rational for scientists debating the specifics of a topic in which they are acknowledged experts to provide their best estimates of probability distributions and possible outliers based on their assessment of the literature than to have users less expert in such topics make their own determinations (e.g., Morgan and Henrion, 1990).”

À cette fin, les auteurs suggèrent d'adopter une interprétation bayésienne de l'incertitude, c'est-à-dire un degré subjectif de confiance dans une hypothèse.

“Bayesian assessments of probability distributions and would lead to the following interpretation of probability statements: the probability of an event is the degree of belief that exists among lead authors and reviewers that the event will occur, given the observations, modeling results, and theory currently available”

Les articles qui suivent citent fréquemment ce document et émettent le souhait que leurs travaux servent précisément à clarifier les incertitudes qui affectent les projections d'émissions et leurs impacts climatiques.

Webster et coll. (2002) utilisent le modèle EPPA (de l'anglais « Emissions Predictions and Policy Analysis ») pour simuler des trajectoires d'émissions de plus d'une dizaine de GES jusqu'en 2100. Ces émissions sont ensuite ingérées par un modèle de climat global, le MIT IGSM (Massachusetts Institute of Technology Integrated Global System Model), afin d'estimer les changements projetés de température. Afin de générer une distribution probabiliste d'émissions, les auteurs font une analyse de sensibilité pour identifier 12 paramètres influents. Une distribution de probabilité est attribuée à chacun de ces paramètres sur la base d'une revue de la littérature et des avis d'experts. Ces distributions ne font pas l'hypothèse de politiques particulières visant à réduire les émissions. Un échantillonneur Monte-Carlo est ensuite utilisé pour générer 10,000 séries temporelles d'émissions des différents GES. Cette distribution d'émissions est comparée avec les scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) utilisés pour CMIP3, qui elles font l'hypothèse de politiques publiques (Figure 2-8). Les auteurs font un commentaire pertinent relié à l'utilisation d'une approche objective pour évaluer les incertitudes:

“Our objection to using story-line analysis to describe uncertainty is not that it is subjective, but that it is not the proper method for quantifying uncertainty. Uncertainty analysis should be used when the goal is to quantify uncertainty.”

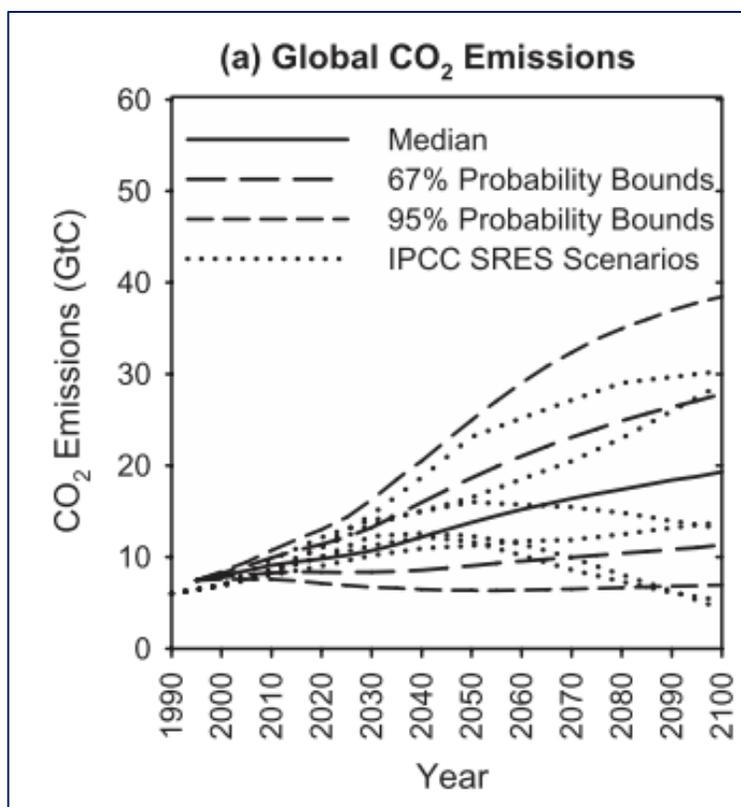


Figure 2-8. Comparaison de la distribution d'émissions avec celle des scénarios SRES.

Émissions de gaz à effet de serre anthropiques primaires. Panneaux (a) dioxyde de carbone. Les lignes pleines montrent les émissions moyennes basées sur 10 000 simulations, les traits longs montrent 67 % des limites de probabilité, les traits courts montrent les 95 % et les lignes pointillées montrent les émissions des six scénarios SRES représentatifs. Tiré de Webster et coll. (2002).

Dans une suite, Webster et coll. (2003) mesure l'incertitude sur les projections d'émissions en fonction de deux scénarios de politiques de réduction de GES. Ces scénarios, avec politique de réduction, sans politique de réduction, sont appliqués sur l'ensemble de la simulation, sans mécanisme d'apprentissage. Comme dans l'article précédent, le modèle inclut une composante économique (modèle EPPA) et climatique (MIT IGSM).

Dans Schneider et Mastrandrea (2005), les auteurs assignent des distributions de probabilité pour trois paramètres du modèle DICE (Dynamic Integrated Climate Change): la sensibilité climatique, la courbe de dommages et le taux d'actualisation. En utilisant un échantillonneur Monte-Carlo, les auteurs estiment la probabilité d'atteindre un seuil d'influence anthropique "dangereux". Les auteurs soulignent:

"We do not recommend that our quantitative results be taken literally, but we suggest that our probabilistic framework and methods be taken seriously."

Sokolov et coll. (2009) raffine les analyses précédentes réalisées avec des versions améliorées des modèles EPPA et le MIT IGSM ainsi qu'avec une révision des distributions de paramètres, pour réaliser des projections probabilistes d'émissions de 1861 à 2100. Les nouvelles hypothèses tendent à hausser les émissions, principalement en raison de la probabilité des scénarios de faible croissance économique (Figure 2-9). Les principales incertitudes proviennent des changements technologiques et des réserves fossiles totales. L'originalité de ces travaux est dans le couplage d'un MEI avec un modèle de climat relativement complexe. En effet, le modèle considère la chimie atmosphérique du carbone, ce qui génère des concentrations de carbone plus élevées que pour les mêmes émissions retrouvées dans les scénarios SRES.

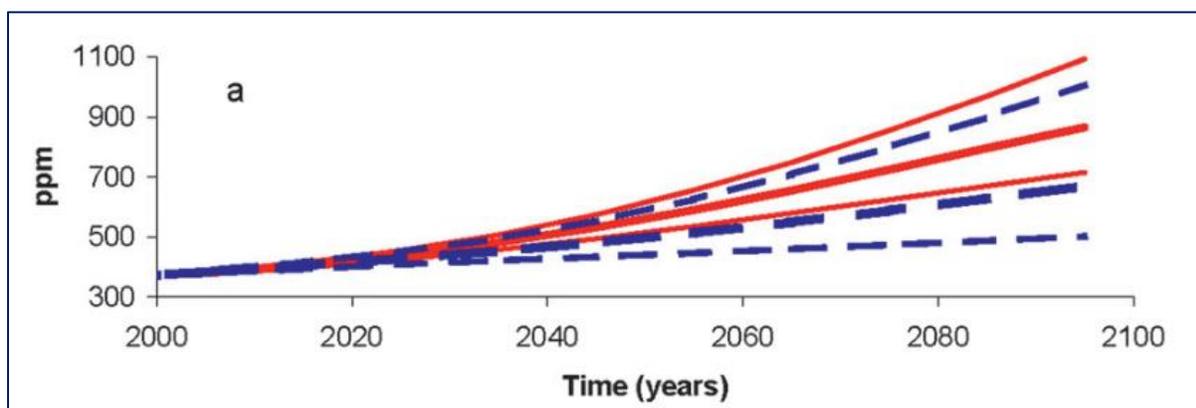


Figure 2-9. Comparaison des concentrations de CO₂ de Sokolov et coll. (2009) avec celles de Webster et coll. (2003)

Les lignes rouges pleines présentent la médiane, les 5% et 95% percentiles. Les lignes bleues pointillées présentent les mêmes valeurs tirées de Webster et coll. (2003). Tiré de Sokolov et coll. (2009).

Repetto et Easton (2015) assument des distributions uniformes sur un intervalle pour quatre paramètres du MEI DICE: la population future, le déclin du ratio émissions/PIB (produit intérieur brut), le déclin des coûts de réduction des émissions, et les coûts des dommages. En échantillonnant les paramètres par Monte-Carlo, les auteurs concluent que les critères de décisions économiques favorisent dans plus de la moitié des cas les politiques de réduction qui gardent l'augmentation de température sous les 2°C.

Fyke et Matthews (2015) développent un MEI dont l'accent est mis sur les réserves géologiques de carbone. La découverte de gisements est régulée par la demande en énergie, l'appauvrissement des gisements et la fraction de la consommation énergétique provenant d'énergies fossiles. Cette fraction est elle-même déterminée par le prix des énergies fossiles contre non-fossiles. Aucune politique de réduction n'est imposée dans le modèle. Au total, le modèle compte 28 paramètres, dont 17 ont des incertitudes considérables qui sont représentées par une distribution de probabilité. Ces distributions sont toutes représentées par une loi normale, paramétrée de manière à ce que deux déviations standards englobent l'ensemble des valeurs publiées dans la littérature. Un ensemble de 100,000 simulations est effectué par Monte-Carlo (Figure 2-10). On note que

le modèle ne simule pas de rétroaction entre l'augmentation de la température et la courbe de dommage et l'imposition de nouvelles politiques. Les auteurs soulignent:

“Importantly, output from probabilistic cumulative carbon emission and net warming estimates is in principle directly applicable to climate risk assessment exercises.

À la lumière de la discussion précédente, il aurait plutôt fallu dire que les résultats sont applicables à l'analyse de risques une fois le lien entre émissions et concentrations de carbone pris en considération.

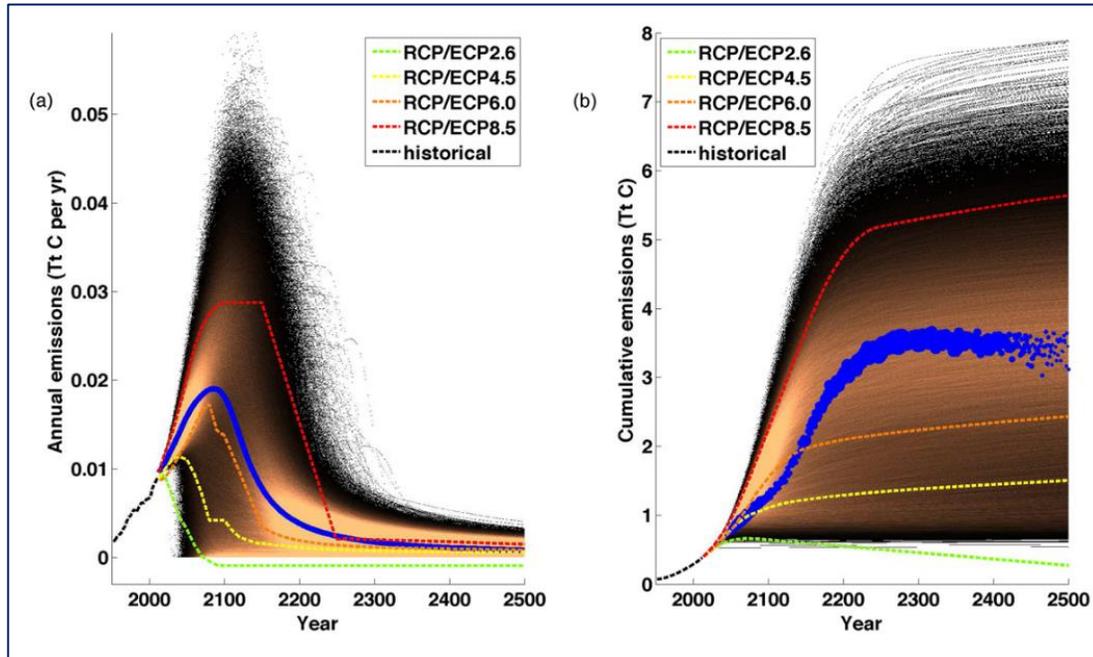


Figure 2-10. Émissions et émissions cumulatives probabilistes comparées aux RCPs. (a) Distribution de projections d'émissions de l'ensemble. La palette de couleurs cuivre reflète la densité relative de l'ensemble. Ligne bleue : projection médiane des émissions. Lignes pointillées colorées : Scénarios d'émissions RCP/ECP. Ligne pointillée noire : émissions historiques. (b) Distribution des projections d'émissions cumulées de l'ensemble. Jeu de couleurs et lignes comme pour (a). Cercles bleus : émissions cumulées moyennes de toutes les simulations atteignant le seuil d'approvisionnement en énergie fossile <5 % chaque année (un point par an). La taille du cercle représente le nombre de simulations se terminant cette année-là. Tiré de Fyke et Matthews (2015).

Capellán-Pérez et coll. (2016) s'intéressent plus particulièrement aux ressources énergétiques, aux réserves disponibles et à leurs coûts d'extraction. Les auteurs utilisent le MEI GCAM-MAGICC combinée à une analyse probabiliste des ressources énergétiques non renouvelables et de la sensibilité climatique. Les incertitudes sont définies sur la base d'une revue de la littérature, et les simulations générées par Monte-Carlo. L'analyse compare les résultats avec les scénarios de base du GIEC (scénarios de référence, scénarios sans politiques de réduction). Les résultats suggèrent que les scénarios de base surestiment les réserves et les émissions associées (Figure 2-11).

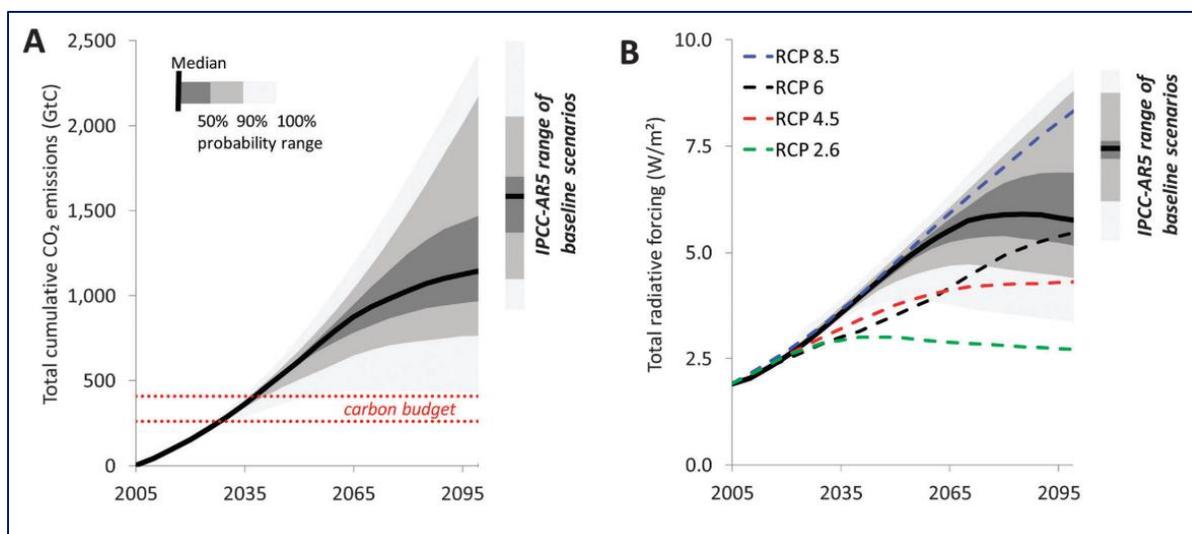


Figure 2-11. Densité de probabilité des émissions et du forçage radiatif comparé aux estimations de l'IPCC-AR5.

Trajectoires des émissions totales cumulées de CO₂, du forçage radiatif total et du changement de température (2005-2100) et comparaison avec la gamme GIEC-AR5 des scénarios de référence pour 2100. Zones ombrées : plages d'incertitude (gamme entière, 5–95 %, 25–75 %), ligne noire : médiane. (A) Émissions totales cumulées de CO₂ provenant des processus industriels, de la combustion de combustibles fossiles et du changement d'affectation des sols. Lignes pointillées : plage du « budget carbone » estimée par le forçage radiatif total (TRF) du GIEC-AR5 (B). À titre de comparaison, les quatre voies de concentration représentatives (RCP) sont indiquées par des lignes pointillées bleues, noires, rouges et vertes. Tiré de Capellán-Pérez et coll. (2016).

Raftery et coll. (2017) développent un MEI simple fondé sur l'identité de Kaya, exprimant les émissions futures d'un pays comme le produit de la population, du PIB par personne et de l'intensité carbone (émissions par unité de PIB). Le modèle se base sur une évaluation probabiliste des tendances démographiques, ainsi qu'une distribution jointe du PIB par personne et de l'intensité carbone calibrée sur les observations. Le modèle utilise le concept d'une frontière technologique mondiale en évolution, vers laquelle les pays convergent plus ou moins rapidement. Le modèle assume également que les émissions par personne atteignent un pic puis diminuent, cette diminution étant calibrée à partir des données par pays « post-pic ». Les paramètres du modèle et les émissions résultantes sont échantillonnés par chaîne de Markov Monte-Carlo (100,000 itérations). Les résultats suggèrent que les incertitudes sont dominées par le PIB par personne et l'intensité carbone, plutôt que par la démographie (Figure 2-12). Aucune des projections d'émissions n'excède les réserves d'énergie fossile estimée (11,000 gigatonnes). Le modèle ne tient pas compte explicitement de politiques futures. Par contre, le fait qu'il soit calibré sur l'historique observé implique que les politiques en place influencent les paramètres du modèle, en particulier l'intensité carbone.

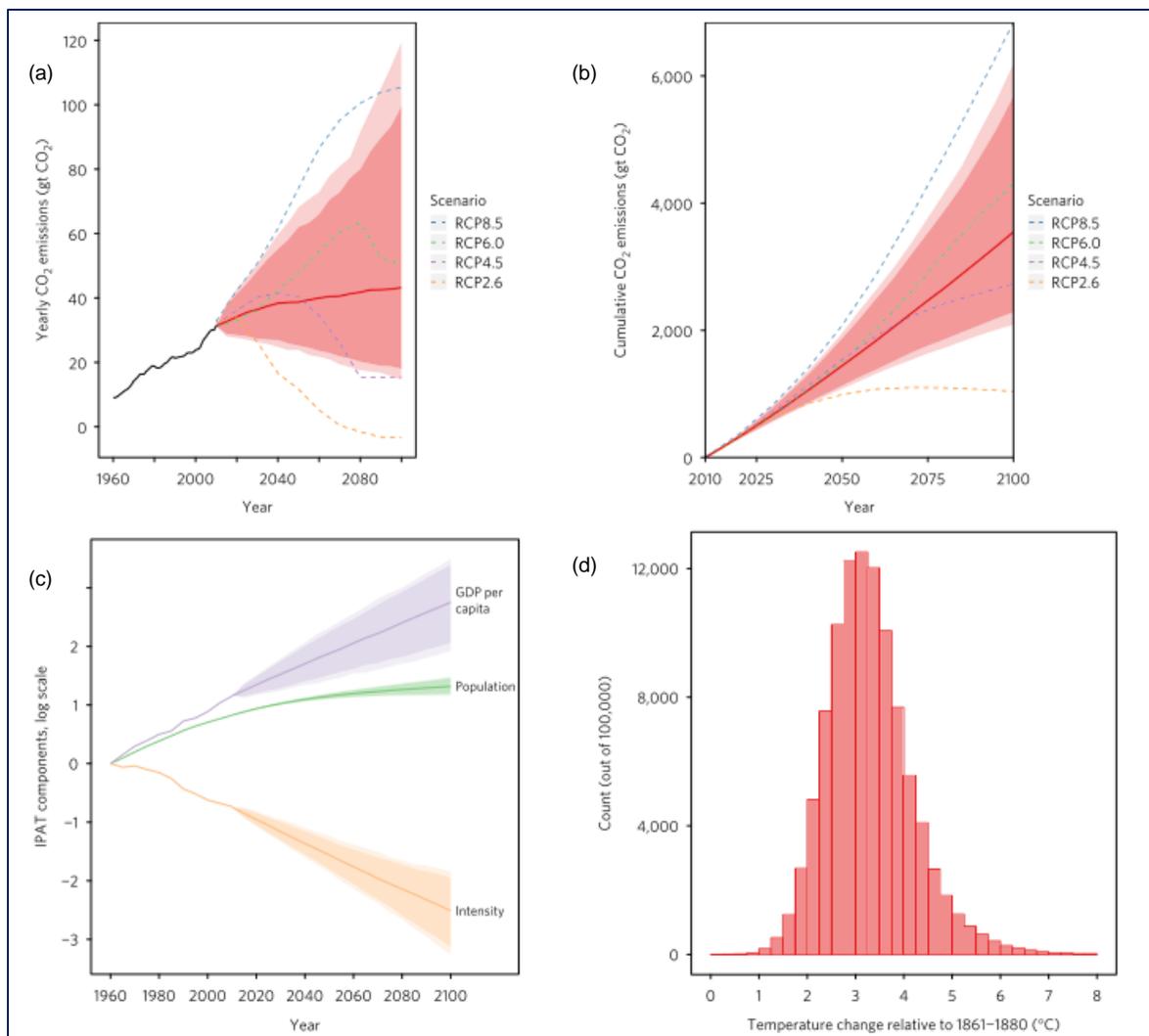


Figure 2-12. Émissions simulées comparées aux RCP.

Prévision probabiliste jusqu'en 2100, avec les scénarios RCP du GIEC. (a) Émissions de CO₂ par an. (b) Émissions cumulées de CO₂ par année. (c) Logarithme des composantes de l'identité Kaya par année, normalisé à zéro en 1960 : population, PIB par habitant, intensité carbone. (d) Histogramme de la distribution prédictive de l'augmentation de la température moyenne globale par rapport à 1861-1880 (°C). Dans a et b, la ligne rouge continue est la médiane prédictive, la région fortement ombrée est la plage probable (intervalle de 90 %), la région légèrement ombrée est l'intervalle de 95 % et les scénarios RCP du GIEC sont les lignes en pointillés. Tiré de Raftery et coll. (2017).

Gillingham et coll. (2018) innovent sur la question des incertitudes dans les MEI avec une approche multimodèle. Ils accordent d'abord six MEI différents (DICE, FUND, GCAM, MERGE, IGSM et WITCH) de manière à pouvoir leur imposer les mêmes hypothèses a priori sur la distribution de trois paramètres clés: la population, la sensibilité climatique (réchauffement planétaire pour un doublement de la concentration de CO₂ par rapport aux concentrations préindustrielles), et la productivité par personne. Les auteurs définissent ensuite des distributions pour ces trois paramètres à partir de la littérature et d'avis d'experts, puis utilisent une approche Monte-Carlo afin de générer un ensemble de trajectoires d'émissions. Cette élicitation d'experts permet en particulier d'évaluer la distribution du taux de croissance du PIB par personne pour différentes régions du monde et périodes. Les conclusions suggèrent que les incertitudes sur les paramètres dominant celles sur la structure des modèles, et que les incertitudes sur les paramètres économiques sont plus grandes que celles sur les paramètres climatiques (Nordhaus, 2018). Les résultats suggèrent également que les scénarios RCP sous-estiment la fourchette de croissance supérieure. Selon Christensen, Gillingham and Nordhaus (2018), il y a aurait donc une probabilité de 35% que les concentrations de GES excèdent celles du RCP8.5. Cette conclusion est contestée par Burgess et coll. (2020) qui démontrent que les scénarios d'émissions surestiment la croissance économique.

2.2.2 Publications sur la probabilité des RCP

Au-delà des analyses probabilistes des émissions, il existe également une littérature couvrant des opinions plus subjectives sur la vraisemblance des scénarios. Sans être exhaustive à ce sujet, la revue de littérature illustre la nature des discussions scientifiques à ce sujet et mérite d'être brièvement discutée.

Par exemple, Ho et coll. (2019) utilisent un procédé d'élicitation par les experts pour évaluer la probabilité des concentrations de CO₂ en 2100 et porter un jugement sur la vraisemblance des SSP (Figure 2-13). Les auteurs concluent que les experts ne croient pas à l'équiprobabilité des SSP, et qu'il est donc de la responsabilité des utilisateurs de ces scénarios d'agir en conséquence.

La question de la probabilité des scénarios d'émissions a fait l'objet d'un débat vigoureux en 2020. Un commentaire dans la revue Nature (Hausfather & Peters, 2020a) critique l'habitude qu'ont prise certains chercheurs d'appeler le scénario RCP8.5 le scénario "statut quo". Selon eux, les hypothèses formulées par ce scénario (par exemple, l'augmentation d'un facteur cinq de la consommation de charbon) le rendent invraisemblable compte tenu de la chute des coûts des énergies renouvelables. Ils enjoignent à la communauté de cesser de présenter le pire scénario comme le plus probable, car cela pourrait avoir comme effet de surestimer les coûts d'adaptation.

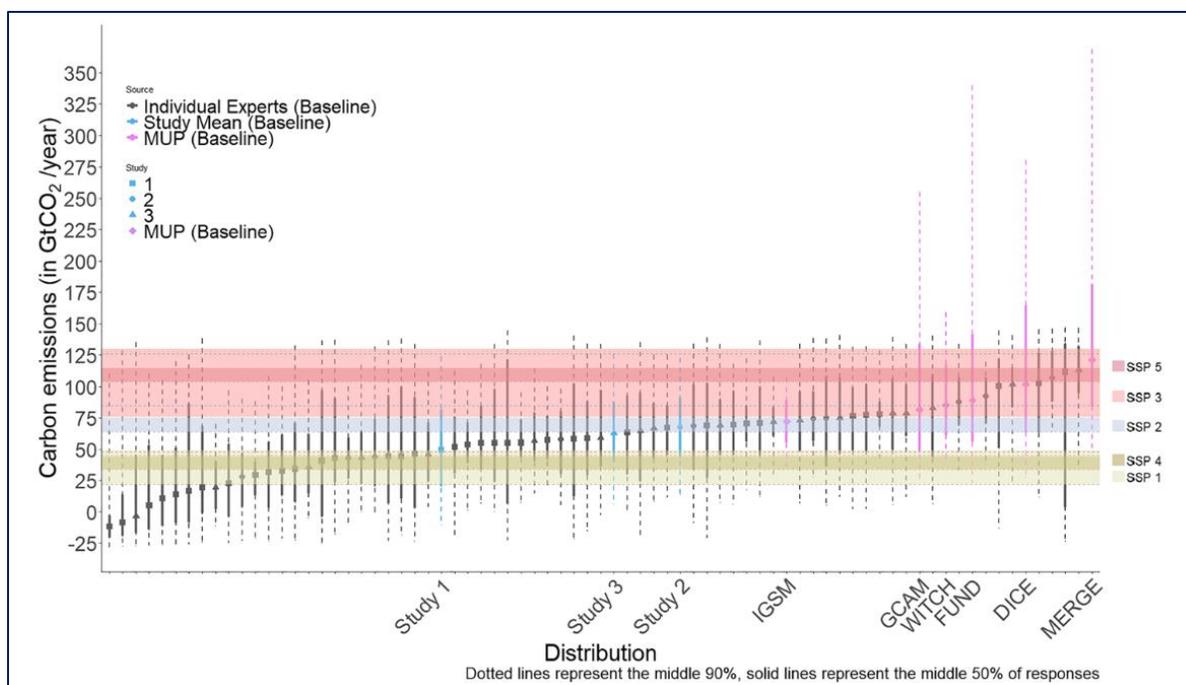


Figure 2-13. Évaluation de la vraisemblance des SSP par des avis d'experts. Émissions de carbone en 2100 : distributions centrales de 50 % (lignes pleines) et 90 % (lignes pointillées) pour tous les experts pour les études 1 à 3 (« scénario de référence », les marqueurs distinguent les trois études) ; en rose, résultats des 6 modèles MUP (Gillingham et coll. 2018), et fourchettes pour les 5 SSP (van Vuuren et Carter 2014). Tiré de Ho et coll. (2019).

En réponse, Schwalm et coll. (2020) argumentent plutôt que RCP8.5 est le scénario qui jusqu'à maintenant colle le mieux aux observations, et reste comparable jusqu'en 2050 aux scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Ils soutiennent plutôt que les scénarios de l'AIE sous-estiment vraisemblablement les concentrations. En effet, de nombreux processus de rétroactions qui ne sont pas simulés par les modèles de l'AIE, tendent généralement à amplifier les émissions. En somme, la question selon eux n'est pas de savoir si le scénario RCP8.5 est probable, mais plutôt s'il est utile. Selon eux, les tendances récentes d'émissions suggèrent que RCP8.5 restera un scénario utile au cours des prochaines décennies.

La réponse et la contre-réponse (Hausfather & Peters, 2020b; Schwalm et coll. (2020b) plongent dans des considérations plus techniques, mais se heurtent en partie à la question de la probabilité des émissions vs concentrations. Hausfather argumente que les émissions en 2100 de RCP8.5 sont improbables, alors que Schwalm dit de son côté que ces émissions jusqu'en 2050 ne sont pas si farfelues, et que ce sont les concentrations qui importent en fin de compte pour évaluer les impacts et les mesures d'adaptation.

La question de la trajectoire actuelle des émissions et ce qu'elle implique pour le futur est directement abordée par Rogelj et coll. (2016) qui évaluent comment les engagements pris par les pays dans le cadre de l'accord de Paris influent sur les projections d'émissions futures

(Figure 2-14). Bien que l'article ne mentionne pas les RCP, on peut extrapoler que les engagements pris à ce jour ne suivent pas la trajectoire décrite par le RCP2.6, qui implique une diminution rapide et drastique des émissions en plus d'une séquestration active du carbone dans l'atmosphère.

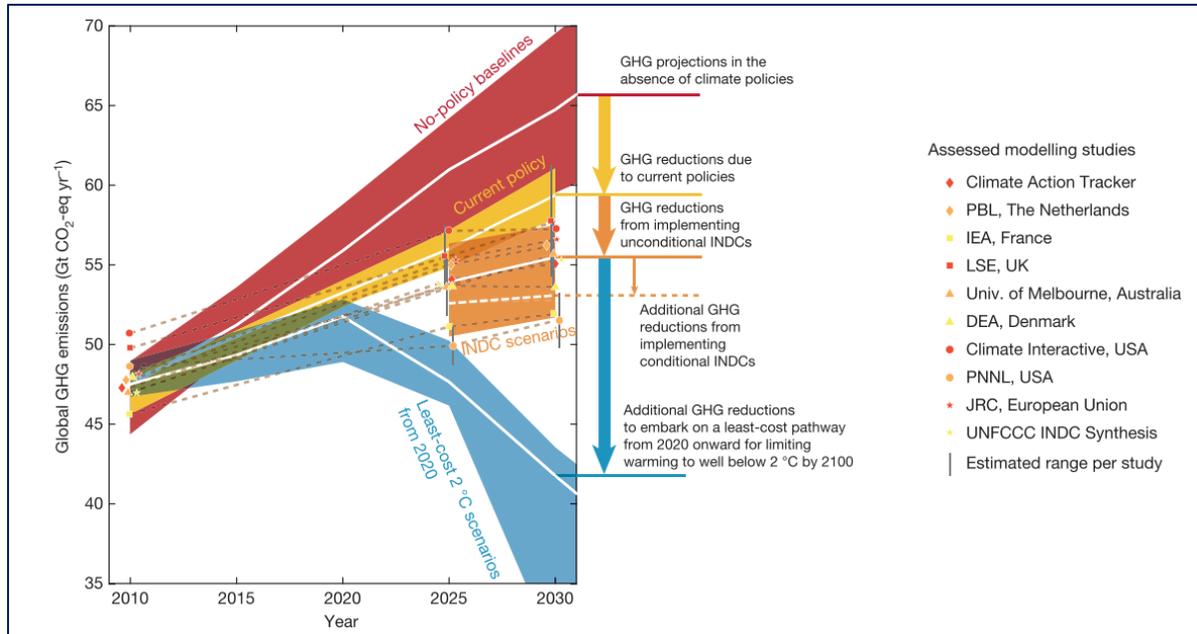


Figure 2-14. Émissions projetées en fonction des engagements des pays dans le cadre de l'accord de Paris.

Émissions mondiales de gaz à effet de serre selon les INDC (Intended Nationally Determined Contributions) par rapport aux scénarios de référence sans politique, de politique actuelle et de 2 °C. Les lignes blanches indiquent la médiane de chaque plage. La ligne pointillée blanche montre l'estimation médiane de ce que les INDC fourniraient si toutes les conditions étaient remplies. Les plages du 20e au 80e centile sont indiquées pour les scénarios de référence sans politique et 2 °C. Pour les scénarios de politique actuelle et d'INDC, la fourchette minimum-maximum et 10e-90e centile dans toutes les études évaluées, est donnée, respectivement. Les symboles représentent des études uniques et sont légèrement décalés pour améliorer la lisibilité. Les lignes marron pointillées relient les points de données pour chaque étude. Tiré de Rogelj et coll. (2016).

2.3 ESTIMATION DE LA PROBABILITÉ DES RCP À PARTIR DES TRAJECTOIRES D'ÉMISSIONS

La présente section propose d'assigner à chaque RCP une probabilité. L'objectif de cet effort est de faire en sorte que les impacts estimés à partir des ensembles de projections climatiques puissent être analysés en termes de risque. La méthode exploite les trajectoires stochastiques d'émissions de CO₂ des MEI, ainsi que les émissions de CO₂ diagnostiquées des modèles de climat de l'ensemble CMIP5. Cette approche tente d'exploiter les meilleurs outils disponibles. D'une part, les MEI sont les modèles les plus appropriés pour estimer les trajectoires d'émissions de GES futures. Toutefois, la représentation du cycle de carbone de ces modèles est simpliste, et il vaut mieux se fier aux modèles de climat pour convertir ces émissions en concentrations, ou comme mentionné plus haut, pour diagnostiquer les émissions à partir des concentrations. L'approche proposée est donc d'utiliser les modèles de climat pour estimer la distribution de probabilité des émissions sachant le scénario de concentration; soit $p(e|c)$, où e dénote les émissions de carbone et c les concentrations. Ultimement, ce qui nous intéresse est de calculer $p(c(t)|e(t))$, où $c(t)$ est la série de concentrations d'un RCP donné, et $e(t)$ les multiples trajectoires d'émissions simulées par un MEI donné. En analyse bayésienne, le théorème de Bayes permet de dériver la relation suivante (en omettant la dépendance temporelle pour alléger l'équation):

$$p(c|e) = \frac{p(e|c)p(c)}{p(e)}$$

où la *vraisemblance* $p(e|c)$ est déterminée à partir du diagnostic des émissions, et où $p(c)$ joue le rôle de *prior*, une estimation a priori de la probabilité des différentes concentrations de GES. Les émissions sont diagnostiquées à partir d'un ensemble de simulations de l'ensemble CMIP5. Le diagnostic des émissions se fonde sur l'équation de conservation du carbone. Les stocks de carbone dans l'atmosphère (C_a), l'océan (C_o) et la terre (C_l) fluctuent, mais à l'échelle temporelle du siècle, leur somme reste constante en l'absence d'intervention humaine. Les émissions de carbone d'origine fossile e augmentent ainsi le stock de carbone à l'échelle globale, selon l'équation de bilan :

$$e = \frac{dC_a}{dt} + \frac{dC_o}{dt} + \frac{dC_l}{dt}.$$

Les modèles climatiques archivent les flux de carbone entre l'océan et l'atmosphère (variable $fgco2$, $\frac{dC_o}{dt}$) et entre la terre et l'atmosphère (variable nbp , $\frac{dC_l}{dt}$). Le terme $\frac{dC_a}{dt}$ est simplement la dérivée temporelle de la concentration donnée par le RCP. Il est ainsi possible, pour chaque simulation de modèle climatique forcée par un RCP, de calculer la série temporelle des émissions compatibles avec les concentrations imposées et les flux de carbone simulés.

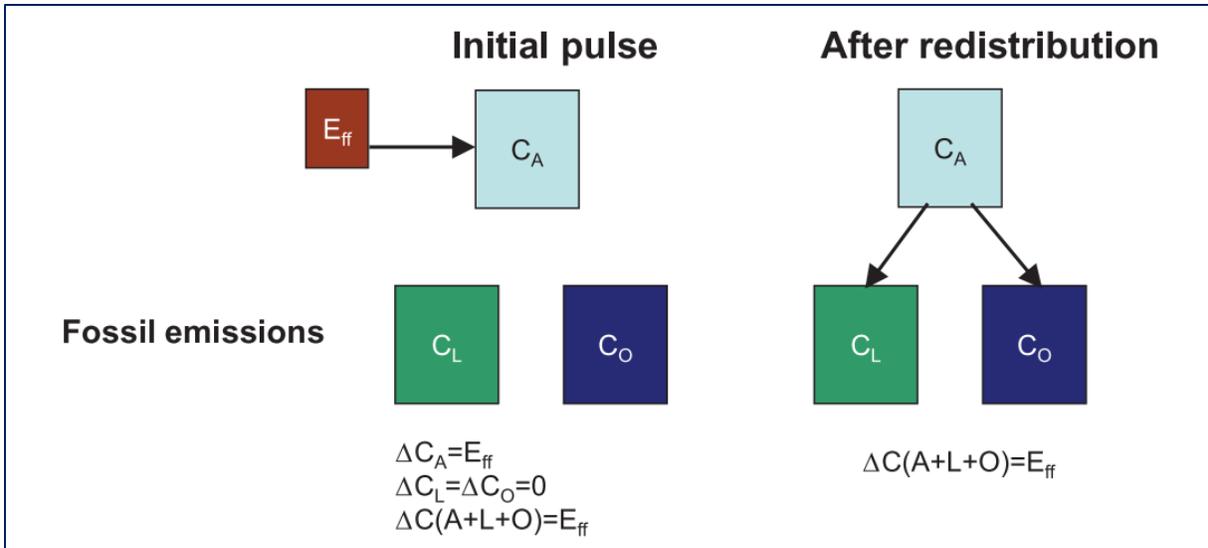


Figure 2-15. L'émission de carbone fossile augmente initialement le stock de carbone dans l'atmosphère, mais est éventuellement partiellement redistribuée dans l'océan et le sol.

Schéma illustrant la différence entre les émissions de CO₂ fossiles et l'utilisation des terres dans un système fermé atmosphère-terre-océan. (En haut) Les émissions de combustibles fossiles représentent un ajout de nouveau carbone au système, initialement dans l'atmosphère, mais après redistribution entre les composants des réservoirs, la quantité totale perturbée est conservée.

Tiré de Jones et coll. (2013).

Cette approche est analogue à celle décrite par Jones *et coll.* (2013) et Gillett et coll. (2013), à la différence que les auteurs calculent les flux terrestres à partir des variables de stock de carbone, alors qu'ici on utilise directement les variables de flux. Selon Vivek Arora (ECCC, communication personnelle), les différences associées à ces méthodes sont de l'ordre de 1 à 2%.

Les émissions cumulatives inférées des différentes simulations sont ensuite regroupées par RCP et par modèles climatiques, et les paramètres d'une distribution normale (moyenne μ , déviation standard σ) sont ensuite calculés pour chaque RCP et chaque année selon la règle « un modèle un vote ». Les paramètres sont ensuite lissés par une moyenne mobile de 10 ans. Pour chaque RCP, $p(e|c)$ se calcule donc par $\sum_i N(e_i(t)|\mu_{RCP}(t), \sigma_{RCP}(t))$, où i est l'indice de la trajectoire probabiliste d'émission cumulative. Ces lois normales sont illustrées à la Figure 2-16.

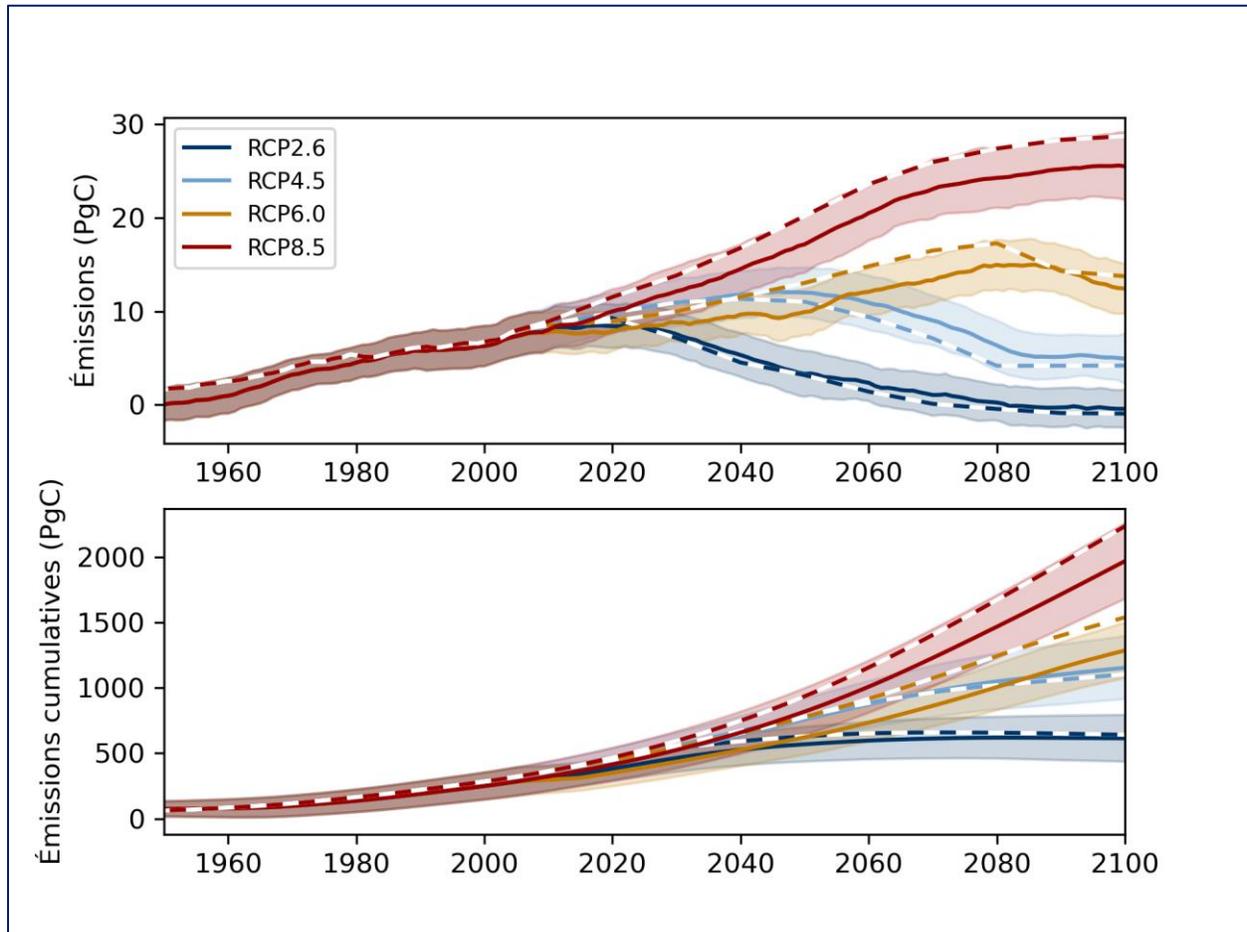


Figure 2-16. Moyenne (ligne pleine) et déviation standard (enveloppe) des lois normales décrivant le lien entre concentrations des RCP et émissions compatibles diagnostiquées à partir des simulations climatiques de l'ensemble CMIP5.
Les lignes pointillées indiquent les émissions de RCP.

Le terme au dénominateur $p(e)$ est un facteur de normalisation calculé en assumant que la concentration annuelle ne peut prendre que quatre valeurs différentes, données par chacun des RCP :

$$p(e) = p(e|c_{RCP2.6}) + p(e|c_{RCP4.5}) + p(e|c_{RCP6.0}) + p(e|c_{RCP8.56})$$

Le schéma complet de la méthode est présenté à la Figure 2-17. En résumé, pour chaque scénario de concentration (RCP), les flux de carbone simulés par les modèles climatiques de l'ensemble CMIP5 sont extraits, moyennés à l'échelle globale et combinés avec les variations de CO₂ dans l'atmosphère afin de diagnostiquer les émissions compatibles avec les concentrations. Ces émissions compatibles sont comparées via analyse bayésienne avec les trajectoires d'émissions stochastiques simulées par les MEI probabilistes afin d'estimer la vraisemblance du RCP. Les vraisemblances des quatre RCP sont ensuite normalisées pour que leur somme soit égale à un.

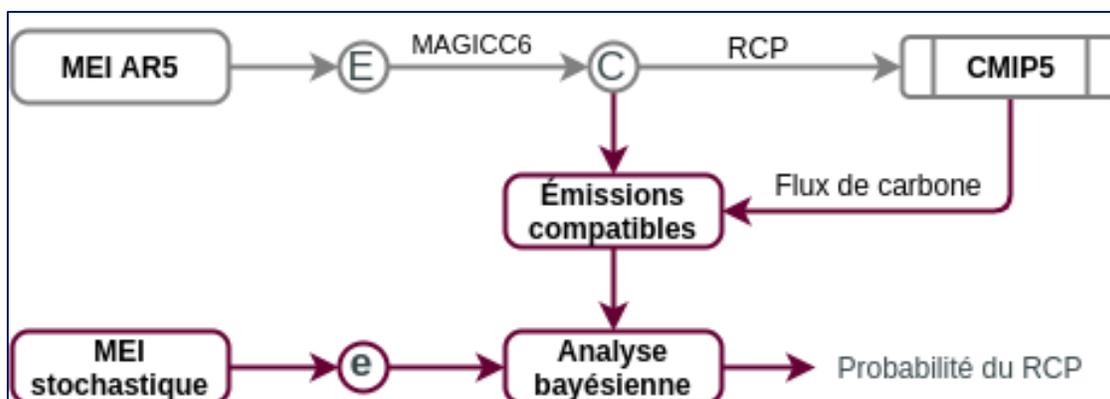


Figure 2-17. Schéma de la méthodologie développée dans ce chapitre.

Les émissions compatibles avec les scénarios de concentrations de GES sont diagnostiquées à partir des flux de carbone simulés par les modèles climatiques de l'ensemble CMIP5 pour chaque scénario de concentration (RCP). Ces émissions sont comparées aux émissions stochastiques des MEI probabilistes par analyse bayésienne afin d'estimer la probabilité des RCP.

Ces calculs de vraisemblance sont effectués pour les trois ensembles probabilistes (Capellán-Pérez et coll., 2016; Fyke & Matthews, 2015; Raftery et coll., 2017) dont les auteurs ont généreusement accepté de partager les données. Les émissions cumulatives simulées par les trois MEI sont illustrées à la Figure 2-18. Les figures suivantes (Figure 2-19; Figure 2-20; Figure 2-21) présentent la vraisemblance des RCP calculée pour chacun des ensembles d'émissions cumulatives.

Les MEI de Fyke et Capellán-Pérez donnent des résultats très similaires jusqu'en 2080 en termes de probabilité des scénarios de concentration. Selon ces deux MEI, les RCP4.5 et RCP8.5 sont pratiquement équiprobables jusqu'en 2040, après quoi RCP8.5 prend le dessus. Le MEI de Raftery donne lui aussi les RCP4.5 et RCP8.5 comme étant les plus probables de 2030 jusqu'en 2050. Pour la fin du siècle, ce sont les RCP4.5 et RCP6.0 qui deviennent les plus probables. Aucun des MEI n'accorde une probabilité importante à RCP2.6 à l'horizon 2050.

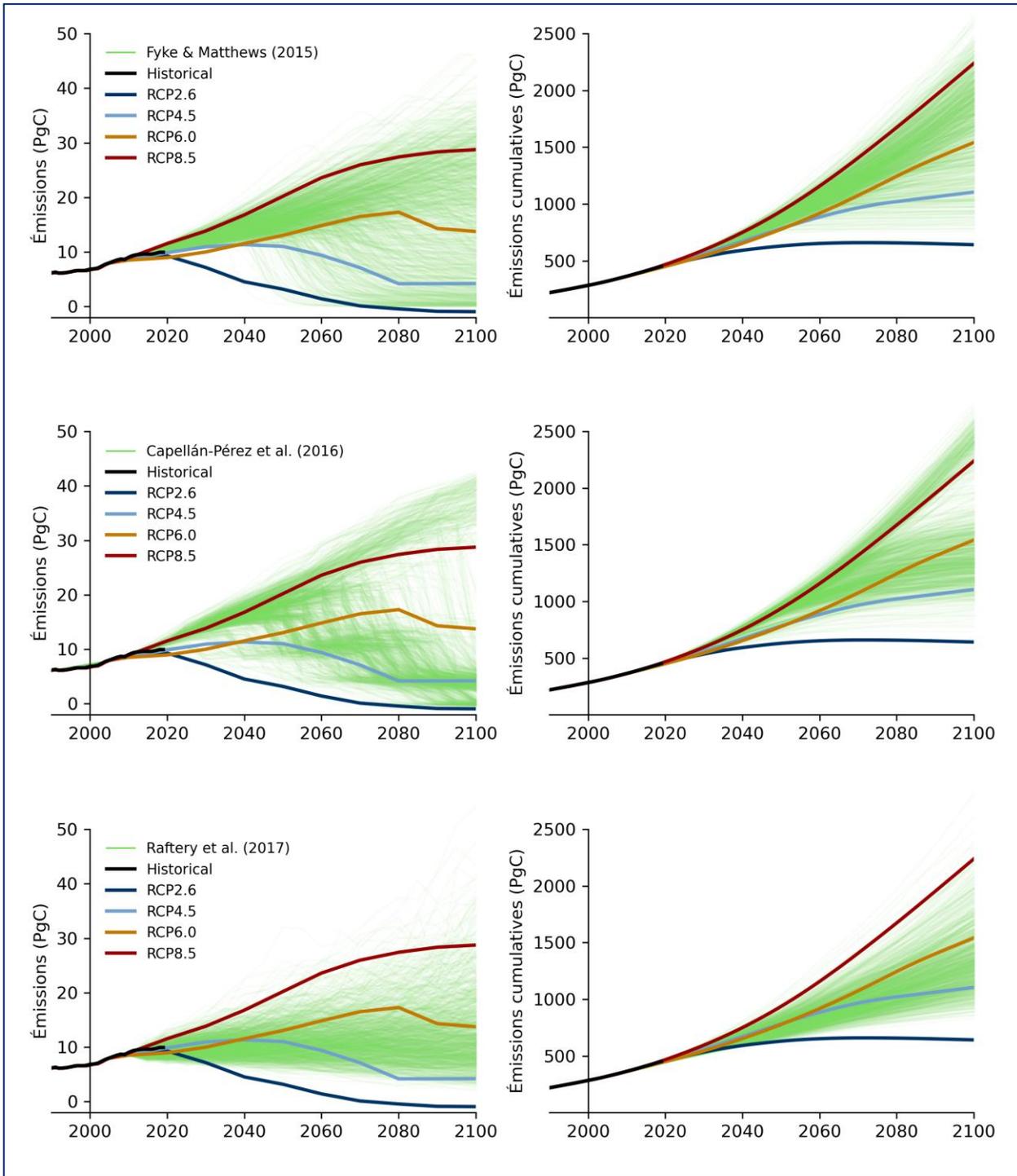


Figure 2-18. Simulations stochastiques d'émissions de CO₂ par trois MEI probabilistes.
 Les panneaux de gauche présentent les émissions annuelles, alors que les panneaux de droite présentent les émissions cumulatives.

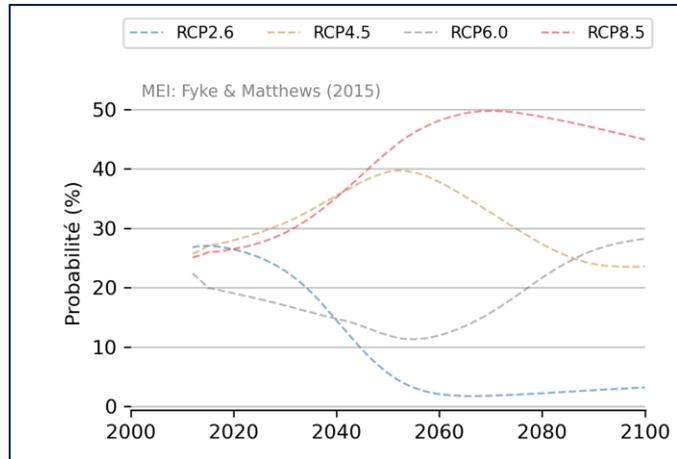


Figure 2-19. Vraisemblance des RCP selon les émissions cumulatives probabilistes de Fyke et Matthews (2015).

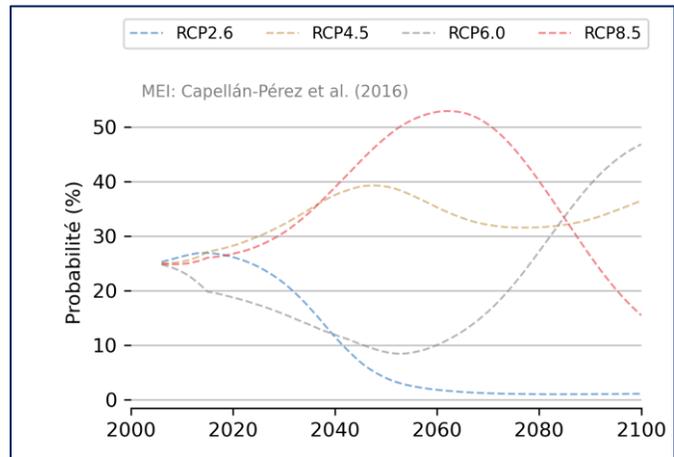


Figure 2-20. Vraisemblance des RCP selon les émissions cumulatives probabilistes de Capellán-Pérez et coll. (2016).

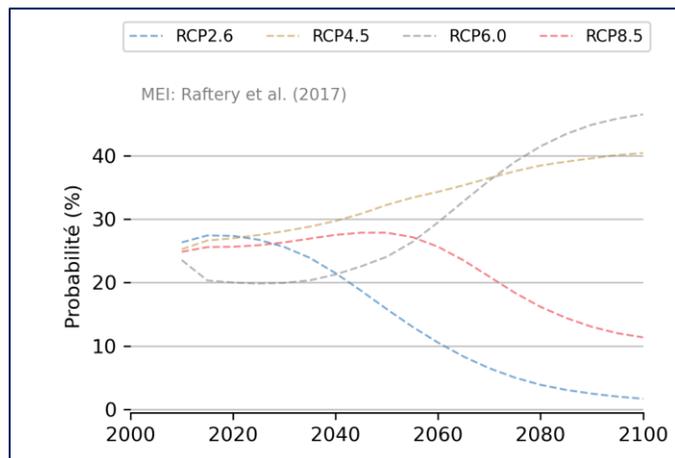


Figure 2-21. Vraisemblance des RCP selon les émissions cumulatives probabilistes de Raftery et coll. (2017).

2.4 DISCUSSION

Les résultats de l'analyse probabiliste présentée dans la section précédente et la revue de littérature suggèrent qu'utiliser les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour l'analyse des effets de changements climatiques jusqu'en 2050 est entièrement justifié. Malgré les critiques à l'encontre des émissions du RCP8.5, rien dans cette analyse ne permet de justifier son rejet. Bien que les hypothèses sous-jacentes au scénario d'émissions soient invraisemblables (par exemple, augmentation d'un facteur cinq de l'utilisation du charbon), le scénario de concentration RCP8.5 reste plausible. Cette nuance est attribuable à la mécanique de calculs utilisée pour convertir le scénario d'émissions en concentrations, qui utilise un modèle simple qui sous-estime les rétroactions positives du cycle du carbone. Puisque les effets des changements climatiques estimés dans ce rapport sont conditionnels aux scénarios de concentrations, les probabilités doivent être évaluées sur celles-ci.

Selon Pedersen et coll. (2020), il est plus sage de se fier à une gamme large de scénarios pour anticiper le futur que de tenter d'identifier le scénario le plus probable. L'histoire regorge de prédictions erronées concernant les prix de l'essence ou la consommation d'énergie, et il existe plusieurs avenues via lesquelles les émissions pourraient soit continuer de croître: poursuite des subventions aux énergies fossiles, nouveaux gisements en Afrique et dans l'Arctique, croissance de la consommation énergétique dans les pays en transition, etc., soit chuter rapidement.

Raskin et Swart (2020) vont plus loin en rappelant que tous les scénarios typiquement considérés (SRES, RCP, SSP) font une hypothèse de continuité; ils assument que le monde actuel poursuivra sa course, déterminé soit par la poursuite des politiques néolibérales actuelles, soit des réformes politiques. Ces scénarios excluent de fait toute forme de discontinuité, tels un retour au barbarisme, une révolution technologique ou encore une transition écocommunautariste. Ces discontinuités majeures dans l'évolution historique mondiale, rappelées dans l'actualité par la pandémie de COVID-19, devraient être gardées à l'esprit dans nos discussions sur la vraisemblance des scénarios et les politiques qui en découlent.

L'analyse probabiliste des scénarios présentée dans ce rapport prête le flanc à cette critique, au sens où elle s'appuie sur des ensembles de simulations d'émissions qui assument la continuité. Si on pose l'hypothèse que les scénarios futurs tendent en général à sous-estimer la possibilité de ruptures historiques et donc de grands changements, il faudrait alors peut-être refléter cet état de fait dans le *prior* $p(c)$. Plutôt que d'assigner des probabilités a priori égales aux quatre RCP, on pourrait imaginer accorder des valeurs plus élevées aux RCP2.6 et RCP8.5 afin de compenser le biais de continuité qui affecte les projections d'émissions.

En somme, bien qu'il soit possible d'estimer la vraisemblance des RCP via des ensembles probabilistes d'émissions, les résultats qui en découlent doivent être interprétés avec prudence compte tenu des biais cognitifs qui les affectent. L'attribution de probabilité aux scénarios futurs restera un exercice éminemment subjectif.

3 INDICATEURS CLIMATIQUES

Auteurs : Hélène Côté, Diane Chaumont, Sébastien Biner, Pascal Bourgault, Patrick Grenier, Travis Logan et Dominique Paquin

3.1 MISE EN CONTEXTE

La taille des ensembles de simulations climatiques, la diversité des modèles climatiques disponibles ainsi que leur capacité à simuler de façon de plus en plus réaliste un nombre croissant de variables pertinentes pour les études d'impacts contribuent à l'amélioration continue des ensembles de scénarios climatiques. Ces derniers servent à calculer des indicateurs climatiques qui accompagnent les décideurs dans le processus d'adaptation des systèmes portuaires aux changements appréhendés du climat. Ces indicateurs, définis en relation étroite avec les usagers, représentent des caractéristiques précises du climat qui doivent être considérées notamment dans la gestion des actifs, des opérations et des chaînes d'approvisionnement. À l'instar de la plupart des publications en science du climat, nous utiliserons le mot variable pour les grandeurs physiques appelés à varier dans l'espace et le temps; le mot indicateur (ou indice) réfèrera à une quantité calculée à partir d'une ou de plusieurs variables tandis qu'un paramètre fera généralement référence à une constante ou un coefficient – parfois ajustable- que l'on retrouve dans les équations à l'intérieur des modèles climatiques ou encore dans les calculs d'indicateurs. La nature des indicateurs retenus ainsi que le territoire couvert par l'étude influencent grandement la façon dont sont construits les scénarios climatiques à partir des simulations produites par les modèles climatiques. Ce chapitre résume les choix méthodologiques relatifs à l'élaboration des scénarios climatiques et au calcul des indicateurs choisis avant d'examiner comment ils évolueront en fonction de la hausse des GES.

3.2 CHOIX DES INDICATEURS CLIMATIQUES

Dans le cadre du présent projet, un processus de consultations et d'échanges s'est activé dès janvier 2020 entre les équipes de recherche de l'Université de Montréal et d'Ouranos ainsi que les gestionnaires du port de Montréal afin de saisir les grands enjeux logistiques et opérationnels. De plus, le choix des RCP pertinents et de l'horizon temporel a été discuté pour tenir compte du cycle de vie des infrastructures existantes à Montréal et des investissements liés à de nouvelles installations à Contrecoeur, l'extension portuaire de Montréal. Les discussions ont mené à la priorisation des indicateurs présentés dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1. Liste des indicateurs climatiques analysés et définitions

Température	
Fréq. Tmin<-25°C	Nombre de jours où la température minimale quotidienne est < - 25°C
Fréq. Tmax>35°C	Nombre de jours où la température maximale quotidienne est > 35°C
Fréq. Vague de chaleur	Nombre d'événements en condition de vague de chaleur. Pour les fins de cette étude, une vague de chaleur se déclare à Montréal et Contrecoeur lorsque les moyennes sur trois jours consécutifs de la température minimale quotidienne est > 22°C et de la température maximale quotidienne est > 30°C
Durée totale Vague de chaleur	Durée totale des vagues de chaleur. Pour les fins de cette étude, une vague de chaleur se déclare à Montréal et Contrecoeur lorsque les moyennes sur trois jours consécutifs de la température minimale quotidienne est > 22°C et de la température maximale quotidienne est > 30°C
Durée maximale Vague de chaleur	Durée maximale des vagues de chaleur. Pour les fins de cette étude, une vague de chaleur se déclare à Montréal et Contrecoeur lorsque les moyennes sur trois jours consécutifs de la température minimale quotidienne est > 22°C et de la température maximale quotidienne est > 30°C
Durée Saison de gel	Nombre de jours entre le début et la fin de la saison de gel
Début Saison de gel	Premier jour de l'automne (après le 1 ^{er} août) avec une température sous 0°C pour au moins 5 jours consécutifs
Fin Saison de gel	Premier jour de l'année (après le 1 ^{er} janvier) avec une température au-dessus de 0 °C pour au moins 5 jours consécutifs
Cycle Gel/dégel	Nombre de jours où la température minimale quotidienne est <0°C et la température maximale quotidienne est >0°C
Amplitude thermique diurne moyenne	Moyenne de la différence entre la température maximale et la température minimale de chaque journée
Amplitude thermique diurne maximale	Maximum de la différence entre la température maximale et la température minimale de chaque journée
Fréq. Vague de froid	Nombre d'événements en condition de vagues de froid. Pour les fins de cette étude, une vague de froid se déclare lorsque la température minimale quotidienne est < à un seuil durant un minimum de jours consécutifs. Dans ce projet, les résultats ont été calculés pour quatre conditions de vagues de froid provenant des combinaisons de seuils de températures (-23°C et -20 °C) et fenêtres de durée (3 et 6 jours)
Durée Vague de froid	Durée totale des vagues de froid. Une vague de froid se déclare lorsque la température minimale quotidienne est < à un seuil durant un minimum de jours consécutifs. Dans ce projet, les résultats ont été calculés pour quatre conditions de vagues de froid provenant des combinaisons de seuils de températures (-23°C et -20 °C) et fenêtres de durée (3 et 6 jours)

Précipitation totale	
Précipitation totale moyenne	Moyenne des précipitations totales
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	Moyenne des précipitations quotidiennes > 10 mm
Maximum de précip. quotidienne	Maximum de précipitation en 1 jour
Maximum de jours consécutifs secs	Nombre maximum de jours consécutifs sans précipitations (<1 mm/jour)
Précipitation neigeuse et neige au sol	
Nombre de chutes de neige > 25 cm	Nombre de chutes de neige cumulée > 25 cm. La chute de neige est calculée sur une séquence consécutive avec des chutes de neige quotidienne
Accumulation de la neige au sol 1/50 ans	Quantité de neige au sol durant une saison susceptible d'être dépassée une fois en 50 ans
Verglas	
Nombre d'épisodes courts	Nombre d'épisodes de verglas <= 6 heures
Nombre d'épisodes longs	Nombre d'épisodes de verglas > 6 heures
Quantité de verglas lors des épisodes longs	Quantité de verglas tombé lors des épisodes > de 6 heures
Nombre d'épisodes de verglas >= 10 mm	Nombre d'épisodes de verglas avec accumulation >= 10 mm
Nombre d'épisodes de verglas >= 15 mm	Nombre d'épisodes de verglas avec accumulation >= 15 mm
Nombre d'épisodes de verglas >= 20 mm	Nombre d'épisodes de verglas avec accumulation >= 20 mm
Nombre d'épisodes de verglas >= 25 mm	Nombre d'épisodes de verglas avec accumulation >= 25 mm
Nombre d'heures d'occurrence de verglas	
Nombre d'épisodes totaux de verglas	Nombre d'épisodes de verglas, peu importe la durée
Vent	
Fréq. des vents de Force 7	Nombre de jours où la vitesse maximale quotidienne des vents se situe entre 50 et 62 km/h
Fréq. des vents de Force 8	Nombre de jours où la vitesse maximale quotidienne des vents se situe entre 62 et 75 km/h
Fréq. des vents de Force 9	Nombre de jours où la vitesse maximale quotidienne des vents se situe entre 75 et 89 km/h

3.3 MÉTHODOLOGIE

Les données brutes des simulations climatiques constituent le matériau de base pour la construction d'ensemble de scénarios climatiques pour les différents indicateurs du Tableau 3-1. Ces scénarios visent à adapter l'information au processus de prise de décision des usagers pour en faciliter l'inclusion dans leurs processus (Charron, 2016). Les étapes du processus d'élaboration des scénarios climatiques sont illustrées par la Figure 3-1. À chacune de ces étapes, les opérations effectuées sur les données climatiques dépendent du type d'indicateur, des variables dont cet indicateur découle, des caractéristiques des données simulées et des données de référence ainsi que des statistiques requises.

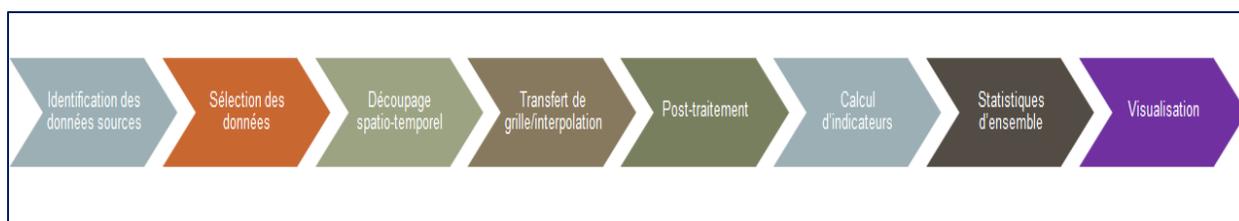


Figure 3-1. Les étapes du processus d'élaboration d'un ensemble de scénarios climatiques à partir d'un ensemble de simulations produites par des modèles climatiques.

L'identification et la sélection des données consistent à choisir l'ensemble de simulations climatiques ainsi que les données de référence les plus pertinentes pour l'étude. Pour ce projet, le Tableau 3-1 contient plusieurs indicateurs relatifs à des conditions extrêmes ou qui découlent de variables très sensibles aux effets locaux tels que la neige, le vent et le verglas. Les simulations climatiques régionales CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) sur l'Amérique du Nord, des simulations d'Ouranos respectant le protocole de CORDEX et les réanalyses ERA5-Land (Annexe B) comblent la plupart de ces besoins. Le découpage spatio-temporel permet d'extraire la région d'intérêt pour éviter d'avoir à traiter les données de toute l'Amérique du Nord et à ramener les données simulées à la fréquence temporelle requise par la définition de l'indicateur. L'étape du transfert de grille et de l'interpolation permet d'obtenir des scénarios sur une grille commune et à une même résolution spatiale - celle des données de références - car la projection cartographique de la grille de calcul diffère d'un modèle à l'autre. Lorsque l'existence de données de référence de qualité le permet, l'étape de post-traitement consiste à appliquer une procédure d'ajustement de biais sur les simulations afin de pallier certaines lacunes des modèles climatiques et leur résolution spatio-temporelle parfois insuffisante pour certains phénomènes. Après cette étape, on a, pour le territoire à l'étude, des ensembles de scénarios climatiques pour les variables sur lesquelles sont basées les définitions des divers indicateurs et dont la taille correspond au nombre de simulations climatiques sélectionnées au début du processus. Dès lors, on procède au calcul d'indicateurs pour chaque scénario de l'ensemble puis au calcul de moyennes climatiques sur 30 ans pour les horizons d'intérêt 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les statistiques d'ensemble permettent d'obtenir la moyenne, le minimum et le maximum de ces ensembles multimodèles. Pour finir, l'étape de

visualisation a pour objectif de présenter les résultats sous une forme convenue avec l'utilisateur pour faciliter le transfert des informations nécessaires à la prise de décision.

Les deux zones d'analyse, soit les installations portuaires de Montréal et de Contrecoeur, ainsi qu'une région plus grande utilisée pour guider l'extraction des données, sont présentées à la Figure 3-2. Ces deux zones, de superficies relativement petites et à proximité d'un cours d'eau, posent des défis lorsque l'on souhaite développer une information climatique future. Les progrès récents en simulation régionale du climat nous permettent heureusement d'accéder à des ensembles de simulations régionales à une résolution suffisamment fine pour générer les divers indicateurs climatiques requis avec un niveau de confiance optimal pour chaque indicateur. C'est ce qui motive la décision de construire les scénarios climatiques à partir des simulations climatiques régionales CORDEX et d'Ouranos. Rappelons que ces données sont simulées par plusieurs modèles climatiques régionaux qui sont pilotés par différents modèles globaux qui utilisent les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cette diversité permet de bien couvrir les principales sources d'incertitudes dans le développement de scénarios climatiques. L'Annexe B contient des informations supplémentaires sur les modèles climatiques et sur les simulations utilisées dans le cadre de ce projet.

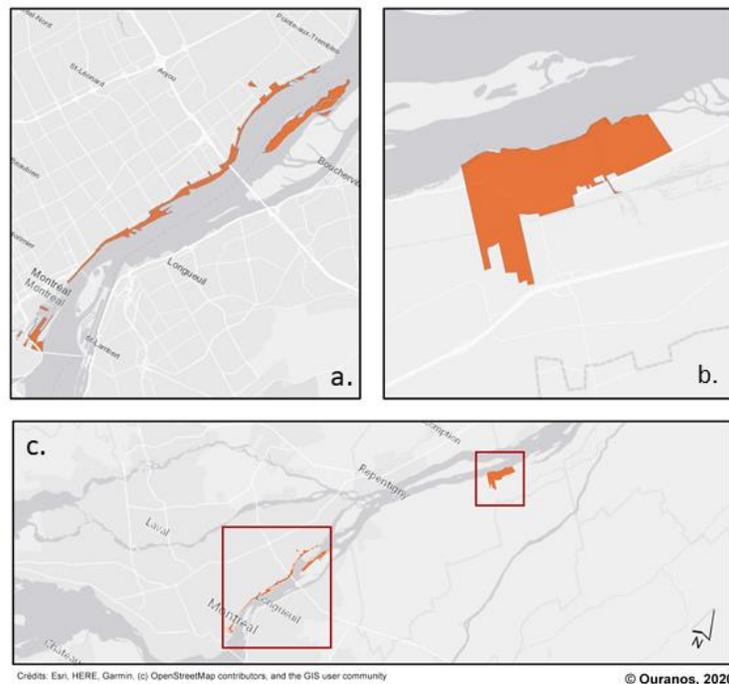


Figure 3-2. Carte des deux zones d'analyse : Montréal (a) et Contrecoeur (b).
La carte du bas (c) délimite la région approximative utilisée pour le découpage spatial des données requises pour l'élaboration des scénarios climatiques.

Les sections qui suivent résument les opérations spécifiques effectuées aux diverses étapes du processus de scénarisation climatique pour les températures, les précipitations, le verglas, les précipitations sous forme de neige, l'épaisseur de neige au sol ainsi que les vents. Les détails plus techniques ainsi que des informations supplémentaires relatives à certaines approches sont rassemblés dans l'Annexe C.

3.3.1 Les températures

Les modèles climatiques fournissent les minimums et maximums quotidiens de la température de l'air à 2m. Pour le RCP 4.5, les simulations climatiques régionales produites par Ouranos et par d'autres institutions selon le protocole CORDEX sur l'Amérique du Nord ont permis de constituer un ensemble de 12 simulations produites à partir de 4 modèles régionaux de climat et de 6 modèles globaux qui les ont pilotés (Annexe B et Tableau B-1). Quant à l'ensemble basé sur le RCP8.5, il contient lui aussi 12 simulations, mais elles ont été produites par des combinaisons de 5 modèles régionaux de climat et de 6 modèles globaux (Tableau B-1). Les températures provenant des réanalyses ERA5-Land ont servi de données de référence pour le post-traitement des simulations climatiques. Après avoir extrait des simulations la sous-région correspondant approximativement à la Figure 3-2c et procédé aux interpolations sur la grille à 0,1° de ERA5-Land, les biais de chacune d'entre elles ont été ajustés par transformation par quantiles détendancée (en anglais : « Detrended Quantile Mapping, DQM ») (section C.1.1). Tous les indicateurs découlant des températures qui sont définis dans le Tableau 3-1 ont été calculés à partir de ces 12 scénarios climatiques basés sur RCP4.5 et RCP8.5 entre 1950 et 2100. Les valeurs pour les sites du port de Montréal; (Figure 3-2a) et du terminal de Contrecoeur proviennent de la somme pondérée des tuiles de 0,1° au prorata de leur couverture des zones en orange de la Figure 3-2a et de la Figure 3-2b.

On obtient en fin de compte des ensembles de 12 moyennes climatiques pour chaque RCP, pour chaque indicateur et à chaque période pour Montréal et Contrecoeur (Tableau D-1). Dans le but d'illustrer les tendances à long terme des divers indicateurs thermiques, des graphiques produits à l'aide des valeurs annuelles au lieu des moyennes climatiques sont pour la plupart regroupés à l'Annexe E pour Montréal et à l'Annexe F pour Contrecoeur. Toutes les étapes du processus de scénarisation des températures et des calculs des statistiques des différents indicateurs sont détaillées dans le Tableau C-1 de l'Annexe C.

3.3.2 Les précipitations totales

La liste des modèles climatiques régionaux qui ont fourni des données de précipitations est la même que pour les températures. On a donc 12 simulations climatiques régionales basées sur le RCP4.5 issues de 4 modèles régionaux de climat pilotés par 6 modèles globaux ainsi que 12 simulations basées sur le RC8.5 issues de 5 modèles régionaux de climat pilotés par 6 modèles globaux (Tableau B-1). Les données de référence pour le post-traitement proviennent aussi de ERA5-Land. L'ajustement des biais a été fait par transformation par quantiles détendancée (section C.1.1). Cependant, les techniques par quantile fonctionnent moins bien lorsqu'il y a beaucoup de valeurs nulles, autrement dit, beaucoup de jours sans pluie. Pour pallier cette difficulté, une procédure supplémentaire introduit de très faibles traces de précipitations (non nulles, mais trop faibles pour être cumulées) aux données servant au calcul des facteurs d'ajustement. Cette méthode d'ajustement des jours secs est décrite à la section C.1.3.

[L'ajustement des jours secs](#)

de l'Annexe C. Les indices relatifs aux précipitations sont définis dans le Tableau 3-1. Les étapes subséquentes sont les mêmes que pour les températures. Tous les détails sont présentés dans le Tableau C-2 de l'Annexe C. En plus des résultats des ensembles de moyennes climatiques des Tableau D-1 et Tableau D-2, on retrouve aussi plusieurs graphiques d'évolution des indicateurs relatifs aux précipitations dans les Annexe E et Annexe F, respectivement pour Montréal et Contrecoeur.

3.3.3 Verglas

Les variables de précipitations totales et sous forme de neige font partie des listes officielles de variables que les modèles climatiques doivent fournir dans le cadre des programmes internationaux de modélisation tels que CMIP ou CORDEX. Les précipitations mixtes comme le verglas et le grésil ne font pas partie de ces listes d'autant plus que très peu de modèles climatiques possèdent, dans leur formulation, les modules nécessaires pour discriminer ces types de précipitations. Parmi tous les modèles régionaux de climat ayant produit des simulations pour CORDEX sur l'Amérique du Nord, seul le modèle MRCC5 utilise un module permettant de simuler le verglas. Ce module est une méthode diagnostique de partition des précipitations développée par Bourguin (2000). Cette méthode, dite *in-line*, développée et encore utilisée pour les prévisions numériques du temps de mésoéchelle, est à la fois performante et suffisamment simple pour être utilisée pour de très longues simulations climatiques sans alourdir leur coût de calcul. Des projets de recherche actuellement en cours en collaboration avec Ouranos et l'UQAM, se penchent sur l'utilisation de multiples méthodes diagnostiques, *in-line* ou *off-line* qui utilisent les archives de simulations de différentes configurations de modèles climatiques. À terme, ceci permettra d'évaluer les gains potentiels que l'on peut espérer notamment au niveau de l'évaluation de l'incertitude.

Les stations météorologiques d'ECCC rapportent l'occurrence horaire des précipitations mixtes (verglas ou grésil) selon trois seuils d'intensité (élevé, modéré, faible), mais ne mesurent pas les accumulations ou les taux de précipitation comme cela se fait pour les précipitations totales. Ces observations nous renseignent donc sur le nombre d'épisodes de précipitation verglaçante ainsi que sur leur durée, mais pas sur la quantité tombée ou accumulée de verglas. Les réanalyses ne fournissent pas de données sur le verglas. Par conséquent, en l'absence de données de référence fiables, il n'est pas possible de faire le post-traitement du verglas simulé. D'ailleurs les techniques de post-traitement usuelles sont mal adaptées pour des phénomènes complexes et très sporadiques tels que le verglas.

Sans post-traitement, plusieurs étapes de l'élaboration des scénarios climatiques énumérées à la Figure 3-1 ont pu être omises ou grandement simplifiées. Au moment de réaliser ce projet, aucune donnée de verglas n'est disponible via l'ensemble de simulations climatiques régionales CORDEX sur le domaine de l'Amérique de Nord. L'ensemble de simulations du modèle régional de climat MRCC5 d'Ouranos compte toutefois sur 4 simulations basées sur le RCP4.5 et 8 basées sur le RCP8.5 et disposant des données simulées de verglas. Elles ont été utilisées pour calculer tous les indicateurs de verglas sur les sites du port de Montréal et du terminal de Contrecoeur

pour chaque année entre 1981 et 2100 définis dans le Tableau 3-1. Ces simulations ont été produites à une résolution spatiale de 0,22° piloté par 4 modèles climatiques globaux (Tableau 3-1). Pour chaque simulation, le découpage spatio-temporel se résumait à extraire le ou les points de grille couvrant tout ou en partie chacun des deux sites. L'absence de post-traitement a éliminé le besoin d'effectuer des transferts de grille et des interpolations. Puisque les résultats au terminal de Contrecœur proviennent de deux points de grille requis pour couvrir la zone orange de la figure 3.2b, les séries des valeurs des indicateurs à ces points sont moyennées au prorata de la superficie couverte. À partir des valeurs annuelles, on calcule 4 (8) moyennes climatiques pour chaque indicateur et pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. L'examen attentif de la liste des simulations utilisées pour le verglas révèle que 5 des 8 simulations sont issues d'une même combinaison modèle régional/modèle global pilote (voir Tableau B-1 de l'Annexe B). Ce déséquilibre dans l'ensemble RCP8.5 peut être résolu en pondérant cet ensemble, ce qui, dans ce cas-ci, revient à prendre la moyenne des résultats de ces 5 simulations afin de les réduire à un seul scénario climatique. On obtient en fin de compte, pour chacune des trois périodes de 30 ans, des ensembles de 4 valeurs pour RCP4.5 et pour le RCP8.5. La moyenne, le minimum et le maximum de ces ensembles pour chaque période de 30 ans sont colligés dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D. Toutes les étapes du processus de scénarisation pour le verglas sont détaillées dans le Tableau C-3 de l'Annexe C.

Avant d'aller plus loin dans l'analyse de l'évolution des indicateurs relatifs au verglas basés sur les données produites par un seul modèle régional de climat et n'ayant subi aucun ajustement de biais, il est opportun d'avoir une idée de la performance dudit modèle sur la période 1981-2010. À partir des données brutes observées à la station météorologique de l'aéroport Trudeau (section B.1.1 de l'Annexe B), il a été possible de calculer la moyenne 1981-2010 pour le nombre d'épisodes \leq à 6h (4.8 par année), le nombre d'épisodes plus longs que 6h (1.8 par année), le nombre total d'épisodes (6.6 par année) ainsi que le nombre d'heures d'occurrence de verglas (27.8 par année). Ces valeurs ont été comparées avec celles provenant de MRCC5 aux points de grille des sites du port de Montréal et du terminal de Contrecœur se trouvant dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 qui diffèrent très peu d'un site à l'autre. On remarque que les valeurs produites par le MRCC5 sont très proches, bien qu'un peu plus élevées que les valeurs observées, surtout pour le nombre d'heures. Cette surestimation est toutefois attribuable en partie au fait que les observations sont disponibles de façon horaire, tandis que les simulations sont archivées aux trois heures. Bien que n'ayant pas d'information sur les accumulations, cette comparaison sommaire avec des observations suggère que MRCC5 représente de façon raisonnable le nombre d'épisodes de verglas.

3.3.4 Précipitations neigeuses et neige au sol

Décollant directement des températures et des précipitations, la neige pose un défi de taille tant pour les réseaux d'observation in situ et satellitaires que pour les modèles climatiques. Le vent, la poudrierie, les fluctuations de la densité en fonction de la température et les caractéristiques du paysage font en sorte que les erreurs de mesures sont beaucoup plus élevées pour les observations de la neige que pour celles d'autres variables comme la température. De ce fait, les

disparités entre les bases de données historiques sont importantes (Bresson et Biner, 2021). Il faut dire aussi que les techniques de post-traitement les plus répandues et abondamment utilisées pour les températures et les précipitations n'ont pas encore été suffisamment éprouvées pour une variable saisonnière telle que la neige. Par conséquent, l'étape du post-traitement qui consiste à ajuster les biais d'une simulation climatique par rapport à une base de données historiques fiable perd de sa pertinence. En laissant tomber l'étape du post-traitement, d'autres étapes du processus de scénarisation illustré par la Figure 3-1 s'en trouvent simplifiées. Les paragraphes qui suivent résument ces étapes pour les précipitations sous forme de neige (*prsn*) et pour l'épaisseur de la neige au sol (*snd*).

3.3.4.1 Scénarios de précipitations sous forme de neige pour le calcul du nombre de chutes de neige ≥ 25 cm

Au moment de réaliser ce projet, l'ensemble de simulations climatiques régionales CORDEX sur le domaine de l'Amérique de Nord ne comptait que 10 simulations basées sur le RCP4.5 et 8 basées sur le RCP8.5 ayant fourni des données simulées pour la variable *prsn*. Ces simulations ont été produites par 3 modèles régionaux de climat pilotés par 5 modèles climatiques globaux. Certaines simulations ont une résolution spatiale de $0,44^\circ$ tandis que les autres ont une résolution plus fine de $0,22^\circ$. La liste des simulations retenues apparaît au Tableau B-1. Vu la décision d'omettre l'étape du post-traitement, le découpage spatio-temporel consistait, pour chaque simulation, à simplement extraire le ou les points de grille couvrant tout ou en partie chacun des deux sites, à ramener à une fréquence quotidienne, les variables dont les archives étaient fournies aux 3 heures et à effectuer les conversions d'unités. L'absence de post-traitement a éliminé le besoin d'effectuer des transferts de grille et des interpolations. Seule une moyenne pondérée entre les points de grilles coïncidant avec l'un ou l'autre des sites a été requise pour certaines simulations. Les sites du port de Montréal et du terminal de Contrecoeur disposent chacun de 10 séries simulées continues de précipitations quotidiennes sous forme de neige basées sur RCP4.5 et de 8 basées sur RCP8.5 permettant de calculer le nombre de jours avec des chutes de neige supérieures ou égales à 25 cm (*prsn25*) pour chaque période de douze mois commençant le 1^{er} août et comprise dans les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. À partir des valeurs annuelles, on calcule les 10 (8) moyennes climatiques pour chacune des trois périodes de 30 ans qui constitueront des ensembles de 10 (8) valeurs pour RCP4.5 (RCP8.5). La moyenne, le minimum et le maximum de ces ensembles pour chaque période de 30 ans sont colligés dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D. Toutes les étapes du processus de scénarisation de cet indicateur sont détaillées dans le Tableau C-4 de l'Annexe C.

En dépit des défis inhérents aux observations de la neige mentionnés précédemment, il était tout de même important d'avoir une idée, même imparfaite, du comportement des modèles climatiques régionaux sur la période 1981-2010. La moyenne climatique de *prsn25* a été calculée à partir d'une série d'hivers (de novembre à avril) comptant moins de 10% de données manquantes provenant des données homogénéisées à la station d'ECCC de l'aéroport Trudeau (Mekis et Vincent, 2011). Une description des données homogénéisées est fournie à l'Annexe B. Cette station d'ECCC est réputée pour la qualité de ses données et la longueur de son historique. D'après les données à l'aéroport Trudeau, il y aurait en moyenne 1,5 jour avec des chutes de

neige excédant 25 mm en équivalent eau (sur la base que 1 cm de neige correspond à 1 mm d'eau) tandis que l'ensemble de simulations climatiques régionales donne des moyennes d'ensemble identiques de 0,5 (variant entre 0 et 0.9) pour les sites de Montréal et Contrecoeur (Tableau D-1 et Tableau D-2). Bien que l'on puisse soupçonner certaines déficiences de la part de certains modèles climatiques quant à cet indicateur, il a néanmoins été décidé de n'exclure aucune simulation des ensembles. L'analyse des biais des modèles climatiques régionaux dépasse la portée de la présente étude et relève des différentes institutions qui les développent et les opèrent. Il faut toutefois garder en tête que l'utilisation de l'équivalence de 1 mm d'eau pour 1 cm de neige peut poser problème, car la neige est souvent plus dense. Rappelons aussi que, tant pour les observations que pour les simulations climatiques, une tempête de 25 cm débutant à 20h, laissant 10 cm avant minuit et se terminant à 6h le matin serait comptabilisée sur 2 jours de respectivement 10 et 15 cm.

3.3.4.2 Scénarios d'épaisseur de la neige au sol pour le calcul de l'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans

Nous avons pu obtenir les données de l'épaisseur de la neige au sol (*snd* pour «snow depth», en français, *profondeur de neige*) pour 11 simulations climatiques régionales CORDEX basées sur le RCP4.5 et 9 basées sur le RCP8.5 pour le domaine de l'Amérique de Nord. Elles ont été produites, à des résolutions spatiales de 0,44° ou de 0,22°, par 4 modèles régionaux de climat pilotés par 5 modèles climatiques globaux. La liste des simulations retenues apparaît au Tableau B-1 de l'Annexe B. Le détail des diverses étapes du processus de scénarisation est présenté dans le Tableau C-5 de l'Annexe C. L'omission de l'étape de post-traitement simplifie grandement le processus qui, mis à part la conversion d'unités qui n'était pas nécessaire pour l'épaisseur de neige, est essentiellement le même que pour les précipitations sous forme de neige décrit précédemment. Une fois les 11 (9) séries quotidiennes de *snd* basées sur RCP4.5 (RCP8.5) prêtes pour les sites du port de Montréal et du terminal de Contrecoeur, on identifie l'épaisseur de neige au sol maximale de chaque année comprise dans les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Pour chacune de ces trois périodes, on a 11 (9) séries de 30 maximums annuels qui permettent d'ajuster la distribution GEV (de l'anglais : Generalized Extreme Values; en français : loi des extrêmes généralisée) typiquement utilisée pour traiter les périodes de retour de valeurs extrêmes. Les paramètres de ces distributions GEV permettent de calculer les valeurs attendues pour une période de retour de 1 fois en 50 ans (*snd50*). Ainsi, pour chaque période de 30 ans et pour chacun des sites, nous avons un ensemble de 11 accumulations de neige au sol de récurrence 50 ans basées sur le RCP 4.5 et de 9 pour le RCP8.5. La moyenne, le minimum et le maximum de ces ensembles sont colligés dans les Tableau D-1 et Tableau D-2.

À l'instar de l'indicateur *prsn25*, les observations de la station d'ECCC de l'aéroport Trudeau ont été utilisées pour évaluer sommairement la performance des modèles climatiques régionaux pour la période 1981-2010. Dans ce cas-ci, les données brutes d'épaisseurs de neige au sol ont été utilisées, car il n'y a pas encore de données homogénéisées pour cette variable (Annexe B). Seuls les hivers comprenant moins de 10% d'observations manquantes entre novembre et avril ont servi au calcul. L'accumulation de neige au sol de récurrence 1 fois en 50 ans obtenue avec les observations est de 51 cm à l'aéroport Trudeau. D'après les Tableau D-1 et Tableau D-2, les

modèles climatiques régionaux ont produit des valeurs moyennes de snd_{50} de 62,6 cm (entre 24,1 et 95,6 cm) au port de Montréal et de 65,3 cm au terminal de Contrecoeur (entre 24,1 et 102,0 cm) pour la même période. Malgré les écarts importants entre les modèles à chacun des sites, la valeur obtenue à l'aéroport Trudeau se trouvant à l'intérieur de la plage des valeurs provenant des modèles climatiques, il a été décidé de conserver les résultats de toutes les simulations dans les ensembles.

3.3.5 Vents

Durant la phase de réalisation de ce projet, on pouvait compter sur des données du maximum quotidien de la vitesse du vent à 10m (*sfcWindmax*) provenant de 9 simulations climatiques régionales basées sur le scénario d'émissions/concentrations RCP4.5 et de 9 simulations basées sur le RCP8.5. Elles ont été produites par 3 modèles régionaux de climat (MRC) pilotés par 4 modèles globaux de climat (MGC) pour le RCP4.5 et par 5 MRC pilotés par 4 MGC pour le RCP8.5. La résolution spatiale est de $0,44^\circ$ ou de $0,22^\circ$, selon la simulation (Tableau B-1). Comme ce fut le cas pour les autres variables, le processus de scénarisation (Figure 3-1) a pris en compte la nature des indicateurs comportant des seuils à atteindre (Tableau 3-1) ainsi que le fait que le vent puisse avoir un caractère très local, surtout lorsque la surface comporte des structures significatives telles que des bâtiments, des arbres, du relief accidenté, etc.

Puisqu'un environnement portuaire comporte justement des structures pouvant influencer les statistiques de vent entre des endroits relativement rapprochés, il a été décidé, à l'étape du post-traitement de cette variable, de valoriser les mesures des cinq stations de l'Administration portuaire de Montréal (section B.1.3), positionnées principalement en fonction de certaines problématiques d'intérêt. Quatre de ces stations sont installées à Montréal, et l'autre est installée à Contrecoeur. Ces données très locales ne couvrent que la période de 2014 à aujourd'hui, et ne sont donc pas d'une longueur suffisante pour servir de référence climatologique, puisque les standards requièrent au moins 30 ans de données pour cerner le climat de manière convenable. Heureusement, une technique par proxy permet de tirer profit d'une série de données très locales, mais d'une durée insuffisante, en la combinant à une série de données plus longue, mais d'échelle spatiale plus grossière – les données ERA5-Land dans le cas présent. Cette technique est décrite à la section C.1.4 **La technique par proxy** de l'Annexe C et permet d'obtenir des maxima quotidiens de vent que l'on aurait plausiblement pu observer aux stations, si des anémomètres y avaient été installés entre 1981 et 2020. Le segment 1981-2010 de ce proxy sert de produit de référence pour le post-traitement statistique des simulations climatiques par une technique de transformation quantile-quantile (en anglais : Quantile Mapping) (section C.1.2. **La technique du Quantile Mapping**). En agissant à la fois sur les problèmes de biais et de disparité d'échelle spatiale, on obtient finalement, à l'échelle locale de chacune des cinq stations de l'Administration portuaire de Montréal, 9 scénarios climatiques basés sur le RCP4.5 et 9 scénarios basés sur le RCP8.5.

À partir des scénarios climatiques (à échelle quotidienne), les indices de vent, qui consistent en des nombres annuels d'atteintes des catégories de force 7, 8 ou 9 sur l'échelle de Beaufort, ont

été calculés, pour chacune des cinq stations. Ces indices annuels ne sont ici rapportés que pour « Quai M-3 », « Terminal Cast » et « Contrecœur », car l'Administration portuaire de Montréal (C. Deschambault, communication personnelle) souhaitait privilégier ces emplacements. Comme pour les autres indicateurs, les valeurs représentant l'ensemble multimodèle basé sur chaque RCP pour chaque période de 30 ans (moyennes, minima et maxima) sont colligées dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D . Toutes les opérations effectuées à chaque étape du processus de scénarisation sont détaillées dans le Tableau C-6 de l'Annexe C.

3.4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de tous les indicateurs sont présentés dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D pour les sites de Montréal et de Contrecœur. Pour tous les indicateurs, on calcule d'abord les moyennes climatiques de chaque période de trente ans pour chacun des scénarios climatiques faisant partie de l'ensemble. Comme le montre le Tableau B-1 de l'Annexe B, le nombre de simulations ayant servi à la construction des scénarios inclut dans les ensembles basés sur RCP4,5 et RCP8.5 varie selon les variables. Ainsi, pour chacune des périodes de trente ans, on calcule la moyenne de ces ensembles en plus d'en identifier les valeurs minimales et maximales indiquées entre parenthèses. Autrement dit, les tableaux de l'Annexe D détaillent, pour la plupart des indicateurs, la moyenne, le minimum et le maximum d'un ensemble constitué de moyennes sur 30 ans provenant des scénarios issus des simulations climatiques régionales. En général on observe que les résultats pour les sous-zones de Montréal et Contrecœur sont très similaires, tant au niveau des plages de valeurs que de leur évolution.

Tout au long de cette section, quelques résultats sont présentés sous forme de figures afin de soutenir de manière visuelle les résultats présentés dans les tableaux. Toutefois, ces figures montrent plutôt la moyenne, le minimum et le maximum d'ensemble de valeurs annuelles (moyenne annuelle ou saisonnière, maximum ou total annuel) plutôt que des moyennes sur 30 ans. Cette approche fait ressortir l'allure des tendances à long terme plutôt que l'écart entre des périodes d'intérêt. La majorité de ces figures ont été regroupées dans l'Annexe E pour le site du port de Montréal et dans l'Annexe F pour le terminal de Contrecœur.

3.4.1 Indicateurs relatifs aux températures

Le réchauffement des températures a des répercussions importantes, particulièrement sur les indicateurs relatifs aux températures extrêmes. Les résultats à l'échelle locale, colligés pour les sites de Montréal et de Contrecœur à l'Annexe D sont cohérents avec ce que l'on connaît de l'évolution des températures moyennes et extrêmes dans le sud du Québec (Ouranos, 2015). Sans surprise, on remarque que les tendances à long terme sont beaucoup plus marquées pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5 pour la majorité les indicateurs basés sur les températures.

On s'attend à une diminution importante des épisodes de grands froids. C'est ce que l'on constate sur la Figure E-1 et la Figure F-1 avec une tendance à la baisse du nombre de jours avec une température minimale inférieure à -25°C selon le RCP4.5 et encore plus marquée selon le

RCP8.5. D'ailleurs, on note qu'en décembre (Figure E-1a et Figure F-1a) et en février (Figure E-1c et Figure F-1c) la plupart des scénarios de l'ensemble basé sur RCP8.5 anticipent la quasi-disparition de ces nuits très froides vers 2071-2100 tant à Montréal qu'à Contrecoeur (voir aussi les tableaux de l'Annexe D). Ces résultats sont cohérents avec ceux des vagues de froid (Figure E-6 et Figure F-6). Selon le RCP4.5, les vagues définies selon le critère $-20^{\circ}\text{C}/3$ jours subsisteront d'ici la fin du siècle (Figure E-6a; Figure E-6e; Figure F-6a; Figure F-6e), mais avec des fréquences et des durées considérablement réduites, surtout pour celles définies avec un seuil plus froid ou des durées plus longues ($-23^{\circ}\text{C}/3$ jours, $-23^{\circ}\text{C}/6$ jours, $20^{\circ}\text{C}/6$ jours). Les changements dans la fréquence et la durée des vagues de froid sont encore plus drastiques d'après les scénarios basés sur le RCP8.5. En effet, toutes définitions confondues, il n'y aurait plus de vagues de froid vers 2071-2100 (tableaux de l'Annexe D). Cette disparition surviendrait même dès le milieu du siècle pour les vagues définies selon les critères $-23^{\circ}\text{C}/6$ jours (tableaux de l'Annexe D pour la période 2041-2070; Figure E-6d; Figure E-6g; Figure F-6d; Figure F-6g).

Bien qu'il ne soit plus question de températures extrêmes froides, on constate que la saison de gel raccourcit graduellement selon le RCP4.5 et de façon beaucoup plus marquée d'après le RCP8.5 (Figure E-4c et Figure F-4c). On remarque, vers la fin du siècle, que les débuts de saisons de gel très tardifs (Figure E-4a et Figure F-4a) tout comme les fins de saison de plus en plus hâtives (Figure E-4b et Figure F-4b) contribuent au raccourcissement marqué des saisons de gel. Ces résultats expliquent d'ailleurs l'évolution du nombre annuel de cycles gel/dégel présentés pour Montréal et Contrecoeur à la Figure 3-3. Si la diminution est plus subtile pour le RCP4.5 que pour le RCP8.5, il est facile de concevoir qu'une saison de gel considérablement plus courte réduit le potentiel de connaître des épisodes de gel/dégel.

Le réchauffement attendu des températures, plus marqué pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5, a des répercussions sur les indicateurs relatifs à la chaleur. C'est le cas du nombre de jours dont la température maximale excède 35°C pour chaque mois entre mai et septembre (Figure E-2 et Figure F-2). Si ces épisodes demeurent somme toute rares selon le RCP4.5, l'augmentation est substantielle en juillet (Figure E-2c et Figure F-2c) et août (Figure E-2d et Figure F-2d) vers 2071-2100 selon RCP8.5. Bien que les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D montrent une augmentation assez mineure de ces événements, il y en aurait tout de même entre 2 et 3 jours en juillet et août sous RCP 8.5 à l'horizon 2071-2100. Il faut garder en tête que cette température de 35°C doit être mesurée à l'ombre et est beaucoup plus rare que ce que l'on pourrait obtenir plus facilement en plein soleil ou encore comme température « ressentie » en raison de l'humidité (indice humidex).

Les résultats pour les vagues de chaleurs de 3 jours et plus (Figure E-3 et Figure F-3) ressemblent beaucoup à ceux du nombre de jours excédant 35°C . Pour l'ensemble de scénarios basés sur RCP4.5 on remarque, vers le milieu du siècle, une faible tendance à l'augmentation de la fréquence, de la durée maximale et totale des vagues de chaleur. Cette tendance semble plafonner vers la fin du siècle. Ce n'est pas le cas pour l'ensemble basé sur RCP8.5 qui présente une tendance abrupte à la hausse dans la dernière moitié du siècle. Il faut dire que la nature booléenne des algorithmes de calcul des indicateurs définis à partir de seuils contribue forcément à l'incertitude entre les scénarios de l'ensemble. C'est le cas notamment des vagues de chaleur

qui impliquent deux seuils de température. Cela veut dire qu'une infime fraction de degré d'écart par rapport à l'un ou l'autre des deux seuils suffit à interrompre une vague.

L'amplitude thermique évolue différemment selon les saisons aux sites de Montréal (Figure E-5) et de Contrecoeur (Figure F-5) quoique les différences entre les RCP ne soient pas si grandes, sauf pour les amplitudes moyennes en hiver et au printemps. En effet, les amplitudes diurnes moyenne et maximale présentent des tendances à la baisse, plus marquées pour le RCP8.5 que pour RCP4.5. Cela découlerait d'un réchauffement des températures minimales supérieur à celui des températures maximales pour ce temps de l'année (Ouranos, 2015). Il n'y a pas de tendances claires en été et en automne (Figure E-5c; Figure E-5d; Figure F-5c et Figure F-5d).

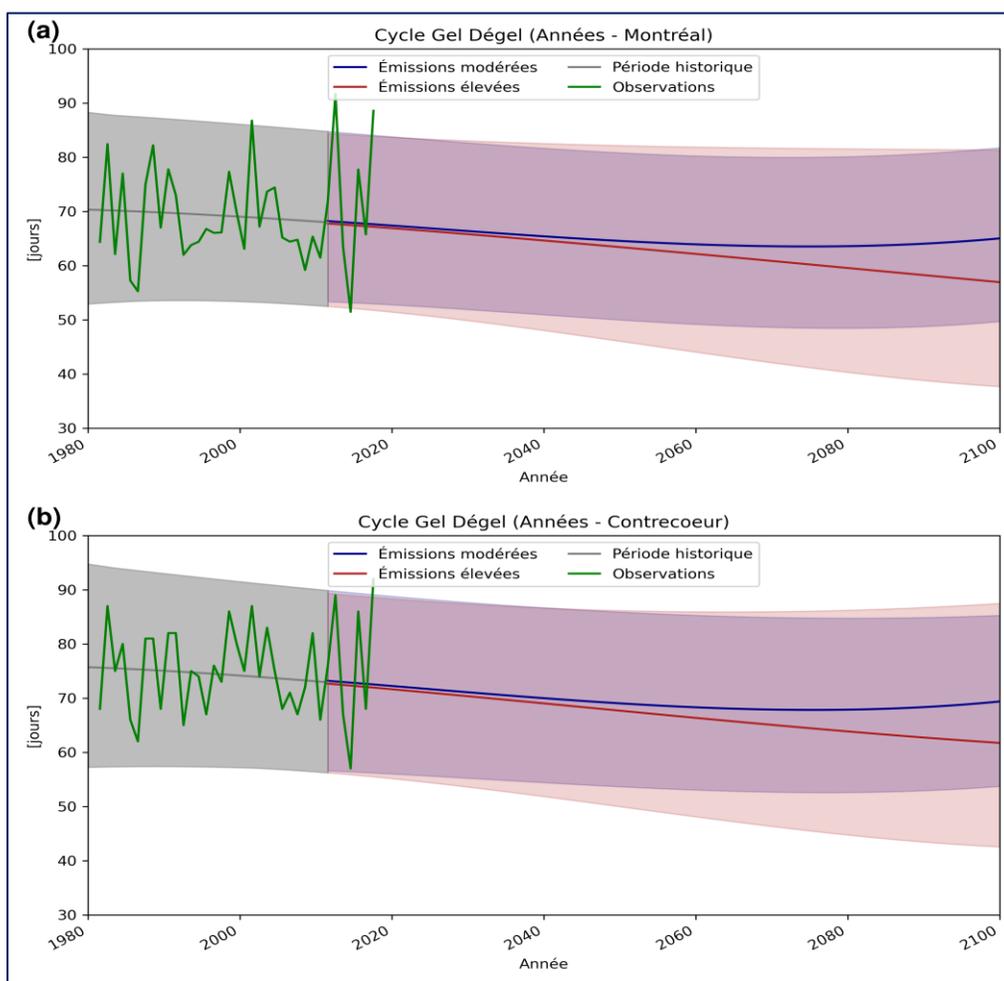


Figure 3-3. Évolution du total annuel des cycles gel-dégel 24h pour (a) le port de Montréal et (b) le terminal Contrecoeur.

Un cycle gel-dégel 24h arrive lorsque les températures journalières minimales sont inférieures à 0 °C et les températures maximales sont supérieures à 0 °C. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour

décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

3.4.2 Indicateurs relatifs aux précipitations totales

L'évolution des précipitations est beaucoup plus subtile et graduelle que celle de températures. De plus, en raison de la forte variabilité interannuelle des précipitations au Québec, il est plus difficile de détecter une tendance claire. On note aussi que, pour la plupart des indicateurs, les plages de valeurs fournies par les ensembles de scénarios climatiques basés sur RCP4.5 sont souvent très proches de celles des scénarios basés sur RCP8.5. Les résultats sont comparables aux sites de Montréal et de Contrecoeur et évoluent de façon similaire.

Néanmoins, on s'attend à des hausses notables des précipitations totales hivernales (Figure E-7a et Figure F-7a) et printanières (Figure E-7b et Figure F-7b) tandis que les augmentations seront plus modestes en automne (Figure E-7d et Figure F-7d). Ces hausses sont légèrement plus élevées pour le RCP8.5 que pour le RCP4.5. Les précipitations estivales demeurent relativement stables (Figure E-7c et Figure F-7c). Quant au nombre de jours avec des précipitations excédant 10 mm (Figure E-8 et Figure F-8), il augmente graduellement pour toutes les saisons. Le maximum annuel de la précipitation totale quotidienne présenté à la Figure 3-4 augmente lui aussi de façon légèrement marquée pour RCP8.5 que pour RCP4.5.

Pour ce qui est du maximum de jours secs consécutifs, il n'est pas évident de détecter des tendances saisonnières claires (Figure E-9 et Figure F-9) mis à part une faible baisse en hiver. Toutefois les résultats compilés dans les tableaux de l'Annexe D indiquent une minime augmentation du maximum de jours secs consécutifs en été et en automne. Vu la stabilité anticipée des cumuls estivaux de précipitations et de la légère hausse des jours avec plus de 10 mm de pluie, cela laisse croire que les cumuls saisonniers en été seront le fait d'un nombre limité de journées avec des précipitations intenses plutôt qu'un grand nombre de jours de pluie faible.

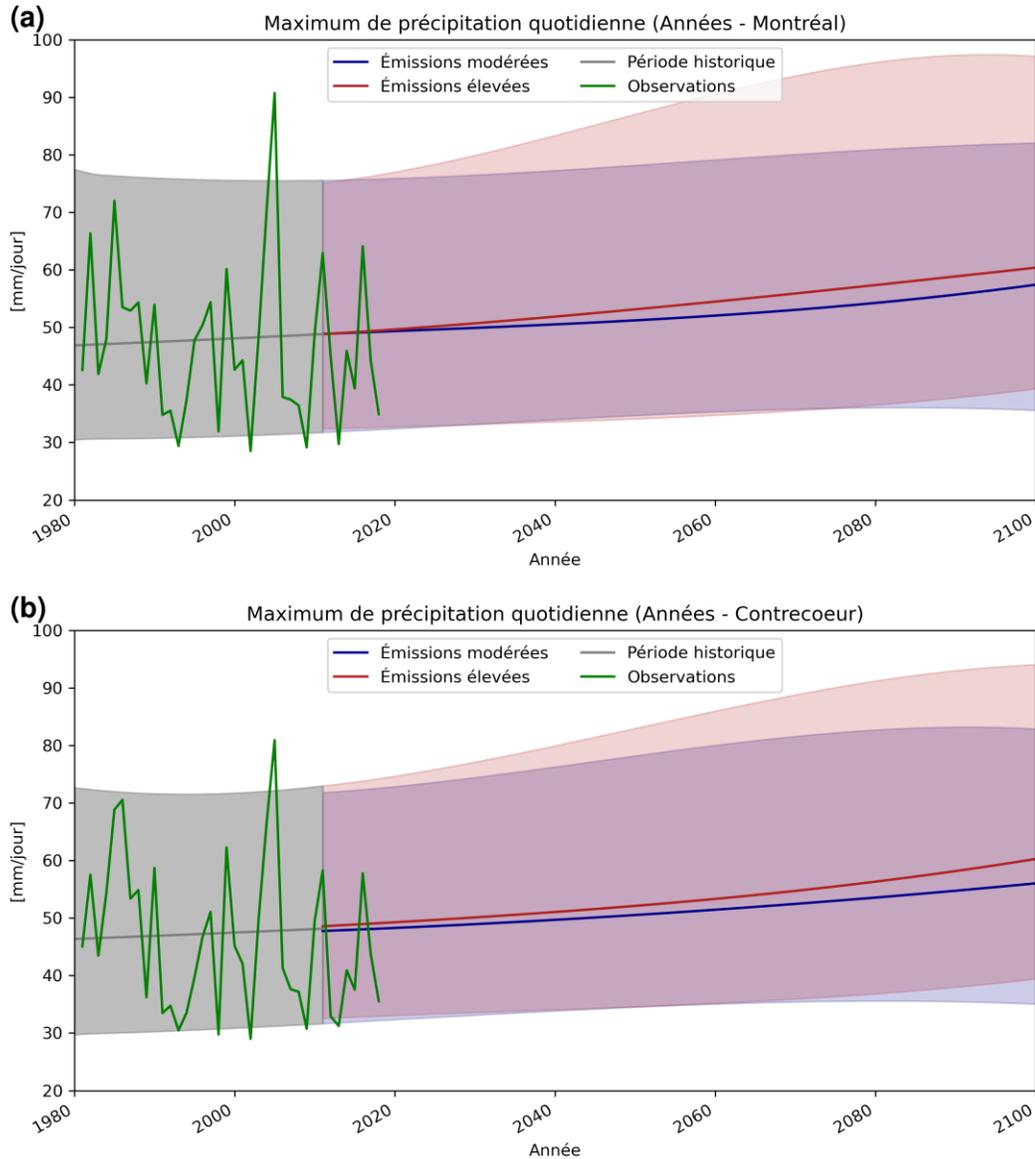


Figure 3-4. Maximum annuel de précipitations totales quotidiennes pour (a) le port de Montréal et (b) le terminal de Contrecoeur.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

3.4.3 Indicateurs relatifs au verglas

Il semblerait que d'ici 2100, le réchauffement du climat contribuera à la diminution du nombre de verglas aux sites du port de Montréal ainsi qu'au terminal de Contrecoeur. Pour tous les indicateurs, les résultats des deux sites sont très similaires et évoluent de la même manière, bien que les valeurs des indicateurs soient en général un peu plus élevées pour Contrecoeur pour toutes les périodes, autant pour le RCP4.5 que le RCP8.5 (Tableau D-1 et Tableau D-2). Afin d'alléger le texte, les résultats du site de Montréal seront examinés plus en détail, mais toutes les interprétations et les conclusions valent aussi pour Contrecoeur.

Au port de Montréal, la moyenne climatique du nombre total annuel d'épisodes de verglas passe de **7,9** [7,0 – 8,6] durant la période 1981-2010, à **6,1** [5,4 – 6,0] en 2041-2070, puis à **6,5** [4,7 - 8,4] vers 2071-2100 selon le RCP4.5. Le déclin est plus marqué selon le RCP8.5 puisque le nombre total d'épisodes est réduit à **5,8** [4,5 - 7,3] en 2041-2070 puis à **4,1** [2,8 – 6,0] vers 2071-2100. Sans surprise, ce total annuel est dominé par les épisodes de courte durée (de 6 heures et moins) qui passent successivement de **5,6** à **4,7** et à **4,9** selon le RCP4.5 pour 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Quant au RCP8.5, le nombre d'épisodes de courtes durées sont réduits à **4,4** vers 2041-2070 et à **3,3** en 2071-2100. Les plages de valeurs de ces indicateurs se trouvent dans le Tableau D-1. Le nombre d'épisodes de verglas de plus de 6 heures diminue aussi de façon conséquente d'ici 2100.

Les quantités de verglas associés aux épisodes de plus de 6 heures connaîtront aussi une diminution marquée selon le RCP8.5. En moyenne, de **14,0** [10,6 -18,7] mm, elles passent à **7,5** [5,1 – 14,6] mm en 2041-2070 et chutent à **4,4** [1,7 – 8,4] mm vers 2071-2100. Les quantités ne déclinent pas autant selon le RCP4.5 avec des valeurs de **9,0** [6,3 – 11,7] en 2071-2100.

Le nombre d'épisodes excédant 10 mm de verglas est peu fréquent (**0,5** [0,3 – 0,7] en 1981-2010) et le sera encore moins d'ici 2100 en se maintenant à des fréquences autour de **0,2** pour les deux RCP. Quant aux épisodes qui excèdent les seuils de 15, 20 et 25 mm, ils sont si rares qu'il est difficile de dégager une tendance. En effet, sachant qu'une fréquence de 0,03 correspond à une année sur 30, l'examen des résultats du Tableau D-1 suggère que de tels événements surviennent à peine 1 ou 2 fois par période de 30 ans dans certaines simulations, mais pas nécessairement dans les autres de l'ensemble.

Pour finir, en accord avec les indicateurs mentionnés précédemment, la moyenne climatique des heures annuelles d'occurrence de verglas diminue de façon notable pour les RCP4.5 (**36,4** heures vers 2041-2070 ; **38,7** heures vers 2071-2100) et plus drastiquement pour le RCP8.5 (34,0 heures vers 2041-2070 ; 22,2 heures vers 2071-2100) comparativement aux **50,8** heures de la période 1981-2010.

Rappelons que la principale limitation de la portion traitant du verglas provient du fait qu'un seul modèle régional de climat a été utilisé (MRCC5), lequel n'utilise qu'une seule méthode diagnostique de partition des précipitations (Bourgouin, 2000). L'utilisation de quatre modèles climatiques globaux différents pour piloter le MRCC5 lors de la production des simulations permet quelque peu d'élargir la représentativité de ce petit ensemble de résultats, mais une étude plus étoffée demanderait l'utilisation de plusieurs méthodes diagnostiques ainsi que plusieurs modèles régionaux de climat. Ceci sera peut-être réalisable dans quelques années.

3.4.4 Indicateurs relatifs à la neige

3.4.4.1 *Le nombre de chutes de neige ≥ 25 cm*

Les résultats sont quasi identiques aux sites de Montréal et de Contrecoeur (Tableau D-1 et Tableau D-2). On y trouve en moyenne **0,5** [0,0 - 0,9] jour de chutes de neige ≥ 25 cm sur la période 1980-2010. Vers 2041-2070, les résultats demeurent stables tant pour l'ensemble basé sur le RCP4.5 avec **0,4** [0,0 - 0,8] jour que pour celui basé sur le RCP8.5 avec **0,4** [0,0 - 0,9] jour. Ce n'est que vers la fin du siècle que l'on voit poindre de petites différences. Ainsi, vers 2071-2100, *prsn25* demeure pratiquement inchangé pour le RCP4.5 à **0,5** [0,0 - 1,3] jour pour Montréal et **0,5** [0,0 - 1,2] jour pour Contrecoeur. Toutefois, selon l'ensemble basé sur le RCP 8.5, on note une diminution du *prsn25* à **0,2** [0,0 - 0,7] pour Montréal et **0,3** [0,0 - 0,7] pour Contrecoeur. Il est important de noter que la diminution entre le 0,5 de 1981-2010 et le 0,2 ou le 0,3 de 2071-2100 est plus faible que l'intervalle de valeurs entre le minimum et le maximum de l'ensemble à chaque période. Cela fait en sorte que cette diminution n'est pas un résultat robuste. De plus, la confiance en ce résultat est limitée par le petit nombre (3) de modèles climatiques régionaux ayant produit les simulations, par des préoccupations quant à la performance en climat historique de plusieurs d'entre eux et, finalement, par l'hypothèse très répandue que 1cm correspond à un 1mm d'équivalent en eau de la neige même si, dans des conditions réelles, la densité de la neige correspond rarement à cette valeur de conversion.

3.4.4.2 *L'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans*

Les valeurs d'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans (*snd50*) évoluent de façon similaire aux sites du port de Montréal et au terminal de Contrecoeur. D'après les résultats compilés dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D, on note que les valeurs de *snd50* sont plus élevées à Contrecoeur qu'à Montréal.

Selon l'ensemble basé sur le RCP4.5, l'indicateur *snd50* au site de Montréal passe de **62,6** [24,1 - 95,6] cm pour la période 1981-2010 à **60,4** [12,9 - 100,0] cm vers 2041-2070. Cette diminution est suivie par une remontée vers la fin du siècle à des accumulations de **62,9** [9,9 - 128,6] cm pour 2071-2100. Toutefois, l'examen attentif des intervalles de valeurs pour les trois périodes suggère la diminution temporaire de *snd50* suivie d'une remontée qui n'est pas nécessairement partagée par toutes les simulations climatiques qui composent l'ensemble. En effet, si les

minimums de chaque période (24,1 ; 12,9 ; 9,9) évoluent de la même manière que les moyennes, on remarque que les maximums (97,6; 100,0; 128,6) augmentent d'ici 2100. Cela illustre bien comment les interactions complexes entre l'évolution des températures et celle des précipitations se répercutent sur l'évolution de *snd50*. Les résultats basés sur RCP4.5 pour Contrecoeur (1981-2010 : **63,5** [24,1 – 102,0] cm ; 2041-2070 : **61,9** [12,9 – 103,7] cm ; 2071-2100 : **63,7** [9,9 – 139,8] cm) ont un comportement semblable à ceux du site de Montréal. Considérant les faibles changements dans le temps et les larges intervalles, on retient une absence de changements de *snd50* pour le RCP4.5 aux deux sites.

Les résultats de l'ensemble basé sur RCP8.5 au site du port de Montréal montrent un déclin de *snd50*, passant de **62,6** [24,1 – 97,6] cm pour la période 1981-2010 à **57,0** [10,9 – 106,5] cm pour 2041-2070. Ce déclin s'accroît vers la fin du siècle alors que *snd50* atteint des valeurs de **39,8** [10,9 – 73,8] cm en 2071-2100. Un coup d'œil aux maximums des intervalles de valeur de *snd50* de l'ensemble sur les trois périodes (97,6; 106,5; 73,8) suggère que certaines simulations pourraient présenter une hausse temporaire de *snd50* sur la période 2041-2070 semblable à la remontée constatée pour le RCP4.5 vers 2071-2100. Cela étant dit, il est clair que pour la fin du siècle, la diminution de *snd50* s'explique par la domination de l'effet du réchauffement marqué des températures caractéristiques du RCP8.5 sur l'effet de la hausse attendue de précipitations. Les résultats basés sur RCP8.5 pour Contrecoeur (1981-2010 : **63,5** [24,1 – 102,0] cm ; 2041-2070 : **58,8** [10,9 – 105,1] cm ; 2071-2100 : **40,6** [10,9 – 75,1] cm) ont un comportement semblable à ceux du site de Montréal.

Comme pour les chutes de neige, la confiance dans les résultats pour l'accumulation de neige de récurrence 1 fois en 50 ans est limitée par le nombre restreint de modèles climatiques régionaux ayant produit les simulations composant les ensembles ainsi que par des préoccupations quant à leur performance sur la période 1980-2010. Tout en gardant en tête les différents bémols quant à la fiabilité des observations de l'épaisseur de la neige au sol (section 3.3.4.2), on soupçonne des déficits importants de l'épaisseur de neige dans certains modèles et des excès pour d'autres. Cela se traduit par des différences particulièrement élevées entre les minimums et maximums des ensembles sur chaque période. Dans le cas *snd50* une partie de l'incertitude provient de l'ajustement de la distribution GEV aux séries d'épaisseurs maximales annuelles de la neige au sol.

3.4.5 Indicateurs relatifs au vent

Les sites du port de Montréal et du terminal Contrecœur n'ont pas la même exposition aux vents forts d'après les résultats des Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D . Vu la très grande sensibilité du vent aux caractéristiques très locales d'un site, il n'est pas non plus surprenant de constater des différences entre les stations d'un même site.

C'est ce qui se produit à Montréal où les moyennes sur la période 1981-2010 des 18 scénarios de vent donnent près d'un jour de vent maximal de force 7 pour la station « Terminal Cast » avec **0,99** [0,73 ; 1,3] tandis qu'ils se font plus rares à la station « Quai M-3 » avec **0,53** [0,20 ; 0,83]. D'ailleurs, ces occurrences de vents de force 7 demeurent relativement stables pour les périodes 2041-2070 et 2071-2100, et ce, tant pour le RCP4.5 que pour le RCP8.5. Toujours selon le Tableau D-1, bien que des vents de force 8 surviennent dans les scénarios climatiques, leur rareté aux sites *Terminal Cast* et *Quai M-3* complique l'interprétation de ces statistiques. Sans surprise, le nombre de jours de force 9 avoisine zéro pour les 2 stations pour toutes les périodes et pour tous les RCP.

Pour la période 1981-2010 au site Contrecœur (Tableau D-2), on trouve en moyenne **13,3** [12,4 ; 13,9] jours de vent maximum de force 7; **2,0** [1,6 ; 2,5] jours de vents de force 8; et finalement **0,35** [0,07 ; 0,80] jour de force 9. Là aussi, les plages de valeurs pour les vents de chacune des 3 catégories demeurent stables d'ici 2100, selon les simulations sélectionnées, et ce autant pour le RCP4.5 que pour le RCP8.5.

Autant pour les stations du port de Montréal que pour celle de Contrecœur, il n'y a pas de changement à long terme détectable pour le nombre de jours avec vent maximal de force 7, 8 ou 9 sur l'échelle de Beaufort. En effet, les intervalles intersimulations (du minimum au maximum) chevauchent les intervalles correspondants pour le passé récent (1981-2010), et cela, peu importe que l'on considère la période future 2041-2070 ou 2071-2100, et peu importe que l'on considère le forçage anthropique RCP4.5 ou RCP8.5.

Il est important de souligner que malgré les développements en modélisation climatique, les rafales et particulièrement les phénomènes plus complexes générateurs de vents forts de courte durée comme les tornades présentent de réels défis pour les modèles et le demeureront pour plusieurs années encore. Quant aux phénomènes ayant une plus grande taille et une durée de vie plus longue comme les dépressions intenses et les systèmes tropicaux, les modèles climatiques sont capables de les simuler, mais avec des intensités généralement moindres comparativement à celles du monde réel. Ces aspects, qui seront évoqués dans le chapitre 4, constituent une limitation à l'étude de l'impact des changements climatiques sur les vents forts.

4 TENDANCES DES TEMPÊTES

Auteure : Hélène Côté

Cette section repose essentiellement sur une revue des publications portant sur des analyses effectuées à partir d'ensembles de projections climatiques produites dans le cadre du programme CMIP5 qui utilisent les scénarios RCP pour l'évolution des GES.

Plusieurs phénomènes atmosphériques de nature cyclonique peuvent produire des vents de tempête : les tornades, les ouragans et tempêtes d'origine tropicale et finalement les dépressions typiques des latitudes moyennes appelées cyclones extratropicaux. Tous ces cyclones ont en commun une rotation antihoraire (à l'exception de certaines tornades) dans l'hémisphère Nord, mais diffèrent grandement quant à leur taille, leur durée de vie, leur intensité et leur prévalence dans la région d'intérêt. Dans la région qui s'étend des Grands Lacs jusqu'au golfe du Saint-Laurent en suivant le fleuve, les dépressions extratropicales dominent et constitueront la majeure partie de ce chapitre.

4.1 LES TORNADES

Les tornades se forment à l'intérieur de systèmes orageux très intenses. La taille réduite et la courte durée de vie des tornades font en sorte que les modèles climatiques ne peuvent pas encore se permettre les résolutions spatiales et temporelles qui permettraient de les modéliser raisonnablement. Les modèles de prévisions météorologiques font face au même problème. Pour les mêmes raisons, la détection des tornades par les réseaux d'observation s'avère tout aussi complexe. Il est largement reconnu dans la littérature scientifique (Brooks, 2013; Cheng et coll., 2013; Sills et coll., 2020, et leurs références citées) que le nombre de tornades rapportées sous-estime fortement le nombre réel de tornades et toutes les régions du monde font face au même problème. L'éloignement des zones densément peuplées et des routes, les caractéristiques du paysage comme la topographie et les forêts et même l'obscurité compliquent la détection des tornades. Ainsi, selon les régions, le nombre réel de tornades pourrait être de 78 à 283% plus élevé que le nombre de tornades détectées (Sills et coll., 2020).

La puissance d'une tornade est déterminée par la vitesse des vents qu'elle produit. Toutefois, cette vitesse est déduite, a posteriori, d'après l'analyse de l'ampleur et de la nature des dommages causés par la tornade. Depuis le 1^{er} avril 2013, Environnement Canada classe les tornades selon l'échelle de Fujita modifiée (en anglais : Enhanced Fujita, EF) en se basant sur 31 indicateurs de dommages² dont plusieurs sont spécifiques au Canada (Sills, McCarthy, & Kopp, 2014) Le Tableau 4.1 fait le parallèle entre l'échelle Fujita utilisée avant 2013 et l'échelle Fujita améliorée. Grâce à l'arrivée de nouvelles technologies, les méthodes de détection et

²<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/meteo-saisonniere-dangereuse/echelle-fujita-dommages-causes-vent.html>. Consulté le 28 septembre 2021

d'analyses des dommages basés sur différents types d'imagerie ont beaucoup progressé. Par conséquent, il est de plus en plus facile de discriminer les tornades de catégorie EF0 des autres phénomènes de vents violents d'intensité comparable tels que les microrafales, les rafales descendantes («*downbursts*») et autres tourbillons («*non tornadic vortex*») en plus d'améliorer la classification des tornades à partir des dommages causés à la végétation là où les infrastructures sont peu nombreuses ou inexistantes (Sills et coll., 2020).

Tableau 4-1. Comparaison entre les vitesses du vent de l'échelle F et celles de l'échelle EF (adaptée pour Environnement Canada) avec les catégories de dommages
 [Tiré du site <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/meteo-saisonniere-dangereuse/echelle-fujita-dommages-causes-vent.html>. Consulté le 28 septembre 2021]

Catégories des échelles F et EF	Vitesse des vents selon l'échelle F (arrondie aux 10 km/h près)	Vitesse des vents selon l'échelle EF (arrondie aux 5 km/h près)
0	60 à 110	90 à 130
1	120 à 170	135 à 175
2	180 à 240	180 à 220
3	250 à 320	225 à 265
4	330 à 410	270 à 310
5	420 à 510 ou +	315 ou +

Les cartes présentées à la Figure 4-1 indiquent la position des tornades identifiées entre 2017 et 2021 (en date du 14 septembre 2021) figurant dans la base de données du *Northern Tornadoes Project* (NTP; Sills et coll. (2020); <https://www.uwo.ca/ntp/>) pour les secteurs des lacs Huron, Érié et Ontario ainsi que pour les provinces de l'Atlantique. On y remarque que les tornades sont beaucoup plus nombreuses dans la péninsule ontarienne qu'au Québec et qu'elles sont nettement plus rares dans les environs du golfe du Saint-Laurent. En plus de la contribution essentielle des orages violents à la formation des tornades, les importantes brises de lacs, qui sont fréquentes dans le sud de l'Ontario, favorisent le déclenchement des tornades (P. W. S. King et coll., 2003). À l'examen de la Figure 4-1a, on note la présence de tornades au-dessus des lacs Ontario, Érié et Huron, fruit des efforts de l'équipe du NTP, pour les répertorier et pour améliorer la détection de ces événements. Toutefois, en l'absence de dommages sur l'eau, les critères habituels de classification de l'échelle Fujita améliorée sont difficilement applicables et la catégorie EF0 leur est assignée par défaut. Cela permet de constater que les risques à la navigation dus aux tornades se concentrent sur les lacs Ontario, Érié et Huron. Le fleuve et l'estuaire du Saint-Laurent sont beaucoup moins touchés. Les impacts terrestres des tornades, et leurs répercussions potentielles sur les chaînes d'approvisionnement sont plus élevés dans la péninsule ontarienne que dans le sud du Québec.

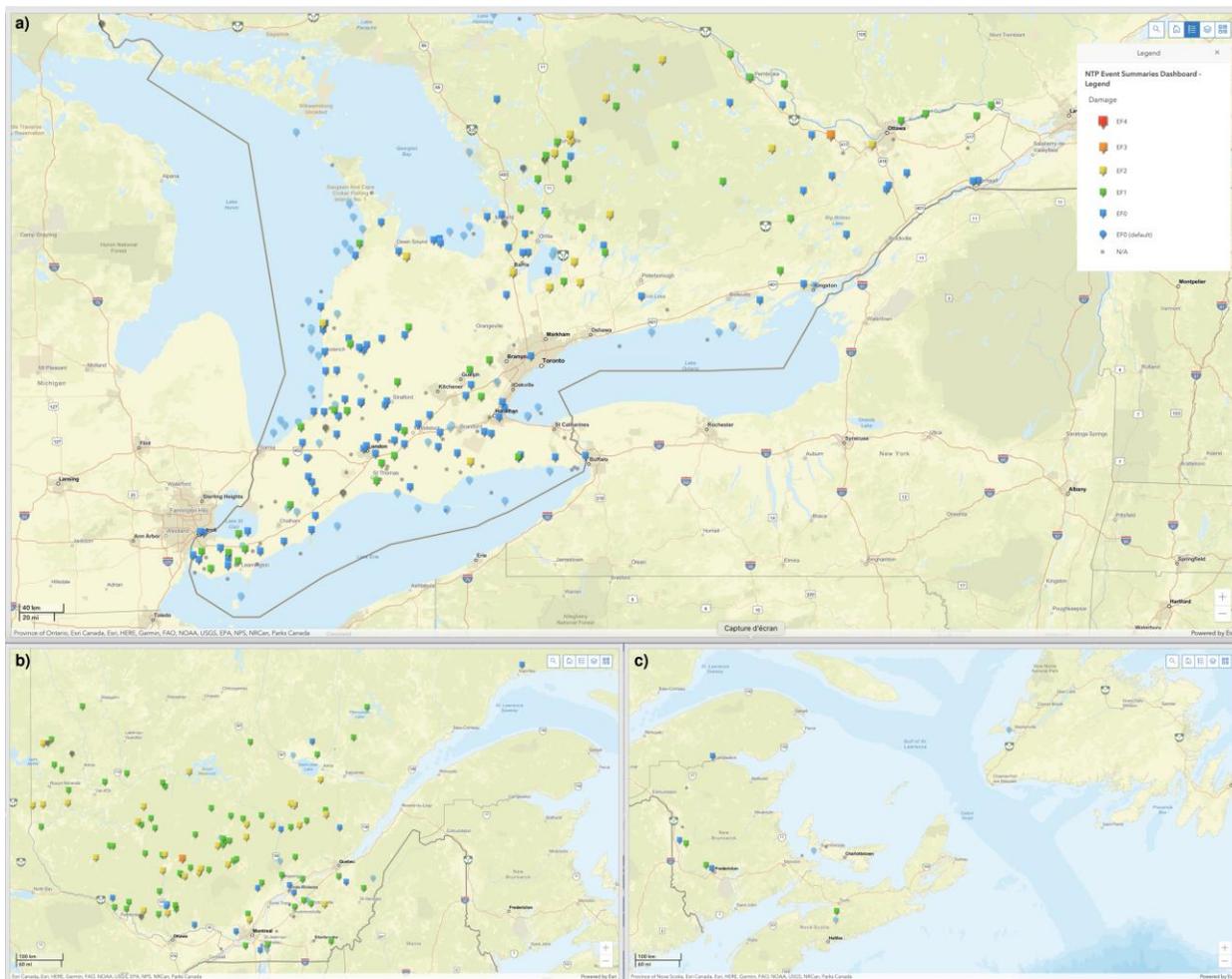


Figure 4-1. Tornadoes détectées entre 2017 et 2021 selon la base de données du Northern Tornadoes Project pour les occurrences survenant : a) en Ontario dans les environs des lacs Huron, Érié et Ontario, b) au Québec et c) dans les provinces de l'Atlantique.

Ces figures ont été produites à l'aide de la plateforme du NTP.

La base de données nationale sur les tornades d'EC3³ contient l'inventaire de toutes les tornades confirmées au Canada entre 1980 et 2009. Les cartes produites par EC3 pour l'Ontario, le Québec et les provinces de l'Atlantique sont présentées en annexe (Figure G-1a; Figure G-2a et Figure G-3a) et fournissent la répartition des tornades selon l'échelle Fujita qui était en usage avant 2013. En gardant en tête les biais d'observation induits notamment par l'occupation du territoire, on constate que les zones d'activités ressemblent beaucoup à celles de la Figure 4-1. Durant cette période, l'Ontario a été exposé à en moyenne **12,6** tornades par année tandis que Québec en a connu en moyenne **4,7** et les provinces de l'Atlantique **1,2**. À partir de cette même base de données, il a été possible de dénombrer les tornades pour chaque catégorie Fujita et pour chaque année entre 1980 et 2009. Ces histogrammes se trouvent à l'Annexe G. Tant pour l'Ontario (Figure G-1b), le Québec (Figure G-2b) et les provinces de l'Atlantique (Figure

³ <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/f314a39f-009d-430b-97b9-d6e0cae22340>

G-3b) on note une très forte variabilité interannuelle autant dans le nombre total de tornades de chaque année que dans les occurrences pour les différentes catégories Fujita. On remarque aussi l'absence de lien entre le degré d'activité d'une année spécifique et la force des tornades détectées. Il est important de résister à la tentation de dégager des tendances historiques sur la période 1980-2009 pour plusieurs raisons évoquées précédemment, notamment les biais de détection relatifs à l'occupation du territoire ainsi que les méthodes de détection et d'évaluation des dommages qui ont changé substantiellement durant cette période (Kunkel et coll., 2013) et qui rendraient cette tendance peu fiable, sans compter la forte variabilité interannuelle qui complique la détection d'une tendance significative.

Pour ce qui est des tendances futures de l'occurrence et de la force des tornades, la difficulté des modèles climatiques à les prendre en compte persistera pour quelques années encore et constitue le principal obstacle à des projections de changements climatiques le moins fiables.

4.2 LES TEMPÊTES D'ORIGINE TROPICALE

Comme l'explique le glossaire du Centre canadien de prévision des ouragans (CCPO), le terme générique de cyclone tropical est défini comme:

« englobant tous les systèmes dépressionnaires tropicaux, y compris les dépressions tropicales, les tempêtes tropicales et les ouragans.... les cyclones tropicaux présentent habituellement une répartition symétrique des températures, des précipitations et des vents. Les chutes de pluie qui leur sont associées ne sont pas tributaires de l'intensité de la tempête. Les cyclones tropicaux tirent leur énergie de la libération de la chaleur latente. Ils durent habituellement une semaine ou plus. »⁴.

Les critères qui permettent de les discriminer sont résumés dans le Tableau G-1 de l'Annexe G. Certains de ces systèmes tropicaux peuvent à l'occasion atteindre le golfe du Saint-Laurent, mais certains d'entre eux, passant parfois plus à l'ouest, peuvent se transformer en cyclones post-tropicaux. Ainsi, une tempête post-tropicale conserverait certaines de ses caractéristiques tropicales comme des vitesses de vents élevées et des pluies diluviennes, mais développerait une structure asymétrique et une vitesse de déplacement plus rapide qui sont typiques des cyclones extratropicaux.

Le CCPO a produit une climatologie des ouragans pour l'est du Canada pour la période 1951-2008. Cette base de données compile les cyclones tropicaux qui se sont retrouvés dans les limites de la zone d'intervention du CCPO. Les limites de cette zone par rapport aux eaux canadiennes apparaissent sur la Figure G-4 de l'Annexe G. La Figure 4-2 illustre le nombre de ces cyclones pour chaque décennie comprise entre 1951 et 2008. Tant pour les tempêtes tropicales que pour les ouragans de diverses intensités, on remarque une forte variabilité à l'échelle décennale qui fait ressortir l'aspect cyclique de l'incidence des cyclones tropicaux. À partir de cette même base de données, il a été possible de faire un décompte similaire, mais sur une base annuelle plutôt

⁴ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-faits-ouragans/glossaire.html>

que décennale qui est présenté à la Figure G-5 de l'Annexe G. On y constate que les ouragans majeurs (catégories 3 à 5 sur l'échelle Saffir-Simpson) sont rares dans la zone d'intervention du CCPO et que le nombre de cyclones tropicaux varie substantiellement d'une année à l'autre. Vu les fortes composantes décennale et interannuelle de la variabilité naturelle des cyclones tropicaux, il n'est pas encore possible d'identifier une tendance historique fiable attribuable à la hausse des GES.

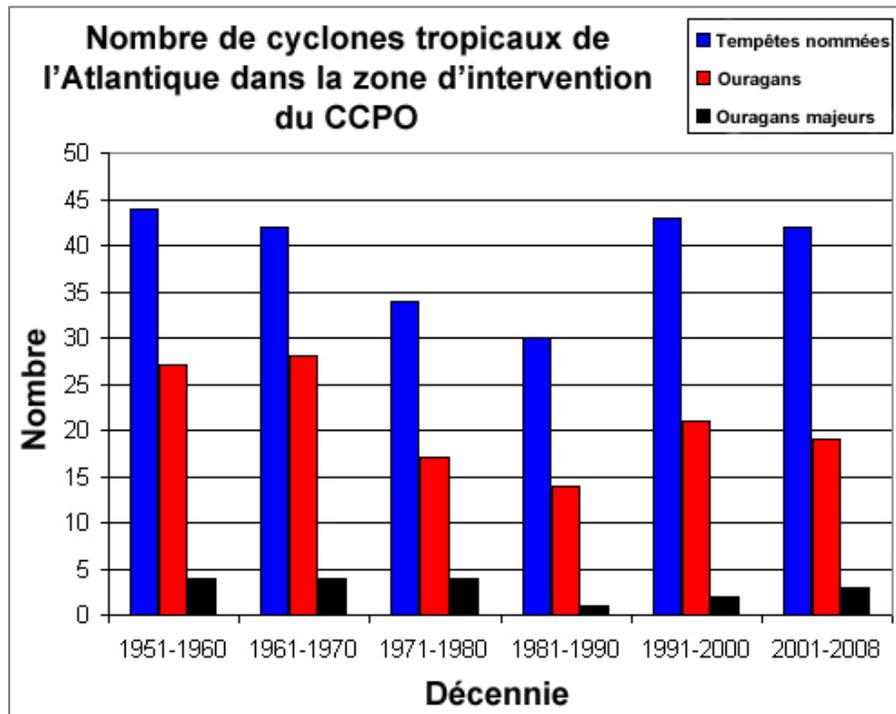


Figure 4-2. Nombre de cyclones tropicaux dans l'Atlantique dont la trajectoire s'est trouvée dans la zone d'intervention du Centre canadien de prévisions des ouragans d'ECCC pour chaque décennie de la période 1951-2008 d'après les données de la *Climatologie des ouragans pour l'est du Canada*.

[Source : https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/ouragans-hurricanes/2BAB1BA4-2E28-4CE6-9A4F-37EAA3F3B4B6/numberofTCsinRZ_fr.png]

L'exemple de l'ouragan Raphaël qui a passé moins de 2 jours dans la zone d'intervention du CCPO - une fois transformé en tempête post-tropicale - en octobre 2012 (Figure G-4) montre que les trajectoires de certains cyclones les tiennent relativement éloignés de l'axe partant des Grands Lacs jusqu'au Saint-Laurent. Au-delà des impacts évidents sur les routes maritimes, l'examen de l'impact des tempêtes tropicales d'un point de vue de sécurité publique apporte un éclairage différent. La Figure 4-3 illustre le nombre de désastres causés par des cyclones tropicaux en Ontario, au Québec et dans les provinces de l'Atlantique d'après la base de données canadiennes sur les catastrophes de Sécurité publique Canada⁵ entre 1950 et 2014. On y

⁵ <https://bdc.securitepublique.gc.ca/srchpg-fra.aspx?dynamic=false>

constate qu'une année active comme 1969, qui compte pourtant deux ouragans majeurs (Figure G-5), n'a pas engendré de sinistres nécessitant l'intervention des services de protection civile. En termes d'impacts, les trajectoires ont une plus grande importance que l'intensité des tempêtes ou le nombre de tempêtes dans une saison.

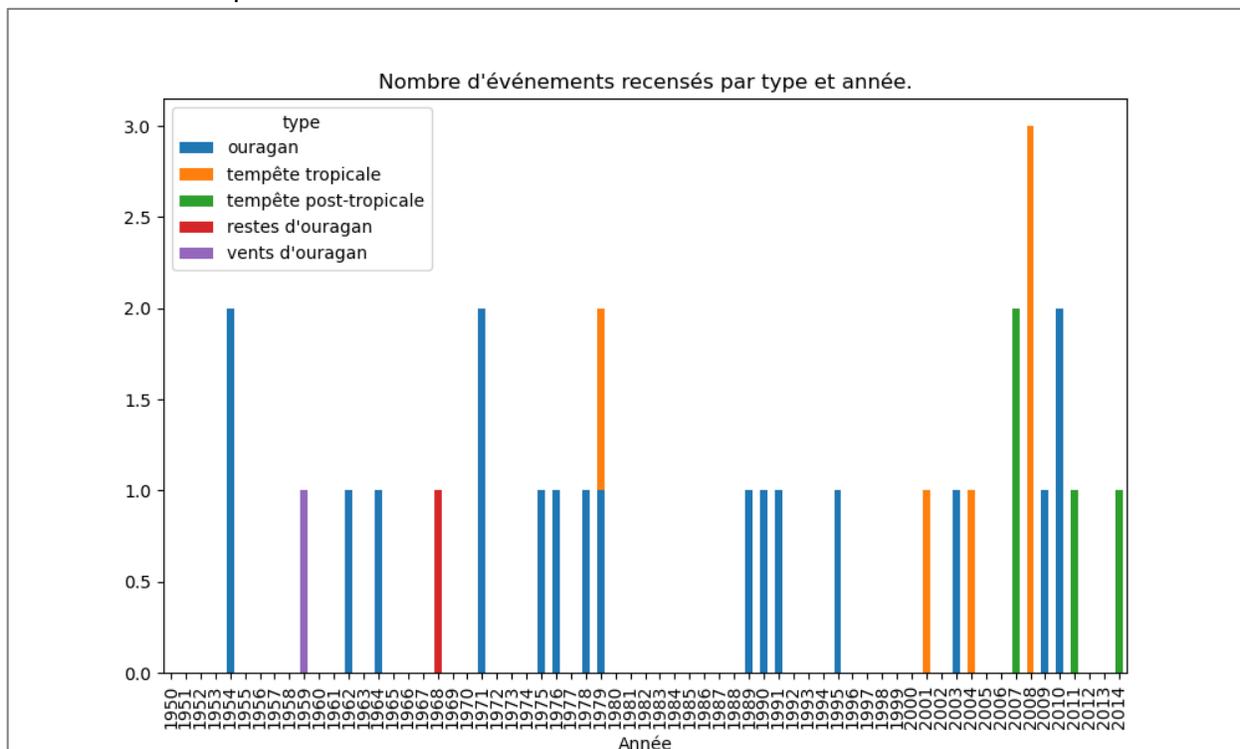


Figure 4-3. Nombre de désastres causés par des tempêtes tropicales et des ouragans en Ontario, au Québec, au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse, à l'Île-du-Prince-Édouard d'après la [base de données canadiennes sur les catastrophes de Sécurité publique Canada](#) entre 1950 et 2014.

Le graphique a été produit en sélectionnant les désastres naturels météorologiques-hydrologiques de type ouragan/tempête tropicale. Les commentaires relatifs à chaque événement répertorié ont permis d'identifier plus précisément le type : ouragan (bleu), tempête tropicale (orange), tempête post-tropicale (vert), restes d'ouragan (rouge) et vents d'ouragan (violet).

Malheureusement, les connaissances sur les systèmes d'origine tropicales qui transitent par la région d'intérêt sont trop fragmentaires pour s'avancer sur la manière dont les changements climatiques les affecteront. Le niveau de confiance demeure faible dans les résultats des diverses études concernant la plupart des métriques relatives aux cyclones tropicaux recensées par le GIEC (Collins et coll., 2019). Il n'est donc pas encore possible d'identifier des tendances fiables pour les trajectoires, la fréquence et l'intensité des tempêtes tropicales dans le nord de l'Atlantique.

4.3 DÉPRESSIONS EXTRATROPICALES

Les dépressions extratropicales, appelées aussi cyclones extratropicaux, se forment et évoluent aux latitudes moyennes (35 à 65 degrés de latitude Nord ou Sud). Le Québec, et particulièrement sa portion sud, se trouve à la rencontre de trois des corridors de dépressions touchant l'Amérique de Nord : les dépressions se développant sur le versant est des Rocheuses canadiennes (appelées « *Alberta clippers* »), celles provenant du flanc est des Rocheuses américaines (appelées « *Colorado Lows* ») ainsi que celles du nord-ouest de l'Atlantique qui se forment dans le sud des États-Unis et qui remontent le long de la côte atlantique. Les dépressions issues de ces corridors diffèrent par leur saisonnalité ainsi que par les contributions relatives des divers mécanismes qui favorisent leur formation. De plus, lorsqu'elles transitent sur le Québec, elles en sont à des stades différents de leur cycle de vie, ce qui complique leur analyse, surtout lorsqu'elles fusionnent avec une dépression provenant d'un autre grand corridor.

Il existe deux grandes familles de techniques d'analyse des tempêtes pour étudier les dépressions extratropicales. La première famille, les techniques dites eulériennes, regroupe des analyses de la variance de certaines variables impliquées dans le cycle de vie des dépressions telles que la pression au niveau moyen de la mer et les composantes de vents à diverses altitudes, et ce, à chaque point de grille des données climatiques. La seconde famille, les techniques dites lagrangiennes, regroupe les divers algorithmes de suivi de tempêtes qui consistent à détecter une dépression et suivre sa trajectoire d'un point à l'autre de la grille durant son cycle de vie.

Il est important de mentionner que les modèles climatiques globaux, dont les projections climatiques CMIP5 sont issues, ont une grille de calcul dont la résolution est trop grossière pour « voir » le Saint-Laurent. Certains d'entre eux ont à peine quelques points de grille sur les Grands Lacs et sur le golfe, ce qui ne permet pas de capturer pleinement l'influence de ces plans d'eau. De plus, la résolution grossière des modèles climatiques globaux ne leur permet pas d'atteindre des valeurs réalistes pour les vents forts produits lors du passage de fronts froids ou encore lors d'orages violents. Les dépressions extratropicales ne sont pas la seule contribution aux vents forts et les connaissances ne sont pas encore suffisantes pour lier de façon claire leurs évolutions respectives.

Les dépressions extratropicales font l'objet d'une veille scientifique continue depuis 2012 à Ouranos. Cette veille est alimentée par des alertes provenant d'*Academia*, de *ResearchGate* et de *Mendeley*, auxquelles s'ajoute une recherche effectuée dans *Google Scholar* basée sur les mots-clés suivants : « storm », « stormtracks », « ETC », « extratropical cyclones ». Les articles basés sur des configurations de simulations climatiques idéalisées destinées à l'étude poussée des mécanismes plutôt qu'à l'évaluation d'un signal de changement climatique ont été mis de côté. Les articles restants ont été triés pour ne retenir que : 1) ceux dont les résultats étaient basés sur des simulations climatiques de provenance de CMIP5 pour que les résultats soient basés sur les RCP; 2) ceux présentant des cartes de résultats qui incluaient le Québec.

4.3.1 Les dépressions extratropicales en hiver

Si la majorité des études définissent la saison hivernale par les mois de décembre, janvier et février, d'autres considèrent plutôt la période de novembre à mars ou encore simplement les mois de janvier, février et mars. Bien que ce choix puisse influencer les résultats, cela ne permet pas de discriminer les conclusions de ces études par rapport aux autres.

Comme l'illustre bien Harvey *et coll.* (2012), une bonne partie du Québec ainsi que le golfe du Saint-Laurent font partie des régions du monde où la variabilité interannuelle des dépressions extratropicales est particulièrement élevée en hiver. Ces fluctuations sont influencées par les grands modes de variabilité naturelle comme l'oscillation nord-atlantique (en anglais : Northern Atlantic Oscillation, NAO) et El Niño (Eichler et Higgins, 2006; Eichler, Gaggini et Pan, 2013; Colle, Booth et Chang, 2015; et leurs références citées). Cette forte variabilité rend plus difficile la détection d'un changement significatif dans le régime des dépressions. De plus, beaucoup d'incertitudes subsistent quant à l'effet des changements climatiques sur les grands modes de variabilité.

RCP4.5, milieu du 21^e siècle vs fin du 20^e siècle

La seule étude montrant des cartes de résultats pertinentes pour le Saint-Laurent plutôt que des compilations hémisphériques n'entrevoit pas de changement significatif des dépressions sur l'ensemble de la région d'intérêt (Eichler, Gaggini et Pan, 2013). Ces résultats reposent sur un très petit nombre de modèles climatiques globaux.

RCP4.5, fin du 21^e siècle vs fin du 20^e siècle

Pour le secteur des Grands Lacs et le tronçon fluvial, deux études n'entrevoient pas de changements significatifs des dépressions (Harvey et coll., 2012; Chang, 2013) tandis que deux autres se contredisent. L'une projette une faible hausse (Eichler, Gaggini et Pan, 2013) et l'autre une faible baisse (Zappa et coll., 2013).

Le portrait est similaire pour l'estuaire où la majorité des études n'envisagent pas de changements significatifs (Harvey et coll., 2012; Chang, 2013; Eichler, Gaggini et Pan, 2013) tandis qu'une seule penche vers une faible diminution des dépressions (Zappa et coll., 2013). Sur le golfe, ces quatre mêmes études s'accordent sur une absence de changements significatifs.

RCP8.5, fin du 21^e siècle vs fin du 20^e siècle

C'est de loin la combinaison horizon/scénario de GES la plus riche en analyses sur les dépressions extratropicales. Par conséquent, il sera plus simple de synthétiser les conclusions des diverses études en fonction des différents tronçons de la grande zone qui s'étend des Grands Lacs jusqu'au golfe du Saint-Laurent.

Sur la région des Grands Lacs, la majorité des études (5/7) concluent à une baisse significative du régime des dépressions tant pour le nombre que pour l'intensité (Chang, Guo et Xia, 2012; Chang,

2013; Eichler, Gaggini et Pan, 2013; Harvey, Shaffrey et Woollings, 2014; Maloney et coll., 2014). Deux études diffèrent: l'une suggère une diminution des dépressions sans fournir le niveau de signification (Zhang et Colle, 2017) tandis que l'autre n'envisage pas de changements significatifs (Zappa et coll., 2013). Les résultats sont cohérents entre les diverses techniques d'analyse.

On note le même genre de résultats pour la partie fluviale du Saint-Laurent. La plupart des études projettent une baisse significative du régime des dépressions (Chang, Guo et Xia, 2012; Chang, 2013; Harvey, Shaffrey et Woollings, 2014; Maloney et coll., 2014). Toutefois, certaines analyses n'ont pas constaté de changements significatifs (Eichler et Higgins, 2006; Zappa et coll., 2013; Zhang et Colle, 2017)

Le consensus entre les diverses études s'effrite un peu plus dans la région de l'estuaire. Trois études projettent une diminution significative des dépressions (Chang, Guo and Xia, 2012; Chang, 2013; Maloney et al., 2014) alors que quatre études n'entrevoient pas de changements significatifs sur ce secteur (Eichler, Gaggini et Pan, 2013; Zappa et coll., 2013; Harvey, Shaffrey et Woollings, 2014; Zhang et Colle, 2017).

Les conclusions sont aussi disparates pour le golfe du Saint-Laurent où trois études projettent une diminution significative des dépressions (Chang, Guo et Xia, 2012; Chang, 2013; Maloney et coll., 2014) tandis que trois autres ne notent pas de changement significatif (Eichler, Gaggini et Pan, 2013; Zappa et coll., 2013; Harvey, Shaffrey et Woollings, 2014). À noter que Zhang et Colle (2017) suggèrent une diminution des dépressions de faible intensité, mais une hausse des dépressions modérées et intenses.

Pour finir, on retrouve dans deux études (Colle et coll., 2013; Zhang et Colle, 2017) un patron particulier de changement du nombre de dépressions qui s'étend sur tout l'axe du Saint-Laurent, de l'exutoire du Lac Ontario jusqu'à Terre-Neuve. Ce patron consiste en une diminution sur la rive nord, une augmentation sur la rive sud avec la transition (changement nul) alignée avec le Saint-Laurent. Sur l'une ou l'autre des rives, on retrouve de très petites zones localisées où le consensus entre les modèles est plus élevé, mais ce n'est pas généralisé.

4.3.2 Les dépressions extratropicales en été

Durant la saison estivale (juin, juillet, août), les diverses études penchent vers une diminution des dépressions extratropicale. Le niveau de confiance varie en fonction de l'horizon, du scénario de GES et de la méthode d'analyse. Toutefois, comme l'activité cyclonique est généralement moins intense en été qu'en hiver dans la plupart des régions du monde, le nombre d'études est limité et seulement quelques-unes d'entre elles fournissent des cartes de résultats pertinentes pour tout le système du Saint-Laurent.

RCP4.5, milieu du 21e siècle vs fin du 20e siècle

On s'attend à une faible diminution des dépressions extratropicale dans l'axe du Saint-Laurent (Chang, 2013) qui n'est significative que sur le secteur des Grands Lacs. Cette étude est basée sur une méthode d'analyse eulérienne.

RCP4.5, fin du 21e siècle vs fin du 20e siècle

La diminution des dépressions extratropicales est plus marquée vers la fin du siècle. On s'attend à une baisse des dépressions qui est significative sur la portion fluviale (Chang, 2013). Ces résultats sont cohérents avec ceux provenant d'un algorithme de suivi des dépressions qui suggèrent une diminution des dépressions sur les Grands Lacs et la portion fluviale (au moins 80% de consensus), mais qui ne détecte pas de changement sur l'estuaire et le golfe (Zappa et coll., 2013). Cette étude conclut aussi à une diminution significative de l'intensité des vents des Grands Lacs jusqu'au golfe ainsi qu'à une diminution des dépressions intenses.

RCP8.5, fin du 21e siècle vs fin du 20e siècle

On s'attend à une baisse du régime des dépressions plus marquée pour le scénario RCP8.5 qu'au même horizon pour le scénario RCP4.5. À l'aide de méthodes eulériennes, Chang, Guo et Xia (2012) concluent à une diminution de l'activité cyclonique estivale avec un niveau de consensus d'au moins 80% surtout sur la partie fluviale bien que le golfe ne présente pas de changements notables. À partir des résultats d'un algorithme de suivi des dépressions, la même étude suggère des dépressions moins fréquentes et moins intenses sur le sud-ouest du Québec qui coïncide avec la portion fluviale, mais pas de changements significatifs sur le golfe. D'autres analyses des trajectoires des dépressions obtiennent des résultats similaires. Par exemple, selon Harvey, Shaffrey et Woollings (2014) la diminution du nombre de dépressions est significative sur la portion fluviale et l'estuaire, mais pas sur le golfe tandis que les changements ne sont significatifs que pour le fleuve dans Zappa et coll. (2013). On note une cohérence entre les résultats de diverses méthodes pour la section fluviale, mais une plus grande disparité pour l'estuaire et surtout pour le golfe où les changements ne semblent pas significatifs.

5 TENDANCES DU COUVERT DE GLACE

Auteure: Hélène Côté (Ouranos)

Le Service canadien des glaces (SCG) d'ECCC a constitué une base de données climatiques des glaces en y intégrant les informations numérisées et traitées provenant des anciennes cartes, à celles plus récentes provenant des données satellitaires. Cette base de données a servi notamment à produire l'Atlas des glaces de lac Grands Lacs 1981-2010 (Canada, 2010) ainsi que l'Atlas des glaces de mer Côte Est 1981-2010 (Environnement Canada, 2010). Ces atlas fournissent principalement les médianes sur 30 ans de chaque semaine de la saison des glaces pour plusieurs variables et indicateurs : la concentration de glace, le type de glace prédominant, l'âge de la glace, la fréquence de la présence de glace ainsi que le total accumulé de la couverture des glaces. Selon la variable ou l'indicateur, la comparaison avec les projections des modèles climatiques peut s'avérer plus difficile en fonction du degré de sophistication de leurs modules de glaces marines. Ces atlas contiennent aussi des informations sur les années d'englacement minimal et maximal. Malheureusement, un tel atlas n'existe pas encore pour la portion fluviale du Saint-Laurent, car, bien que des cartes de glaces soient produites chaque jour comme aide à la navigation, elles ne sont pas encore intégrées en une base de données climatiques comme c'est le cas pour les zones maritimes.

Du côté de la modélisation climatique, il est difficile de trouver des informations fiables sur l'évolution du couvert de glace pour les eaux intérieures canadiennes. Contrairement à l'océan Arctique qui attire avec raison l'attention de la communauté internationale, il n'y a pas encore d'études basées sur de grands nombres de simulations climatiques pour les Grands Lacs et le golfe du Saint-Laurent. Heureusement, il existe quelques analyses réalisées à l'aide de modèles régionaux de climat qui produisent des projections climatiques à plus haute résolution spatiale. Malgré la nature fragmentaire de ces résultats et les limitations soulevées par leurs auteurs, toutes les études pointent vers une diminution drastique des couverts de glace. Bien qu'il soit difficile d'établir les niveaux de confiance vu le très petit nombre de simulations, les conclusions quant au déclin des couverts de glaces sont tout de même physiquement cohérentes avec les tendances observées ainsi qu'avec la hausse anticipée des températures de l'air et de l'eau.

5.1 LES GRANDS LACS

On observe une diminution importante du couvert de glace depuis le début des années soixante-dix. Sur la période 1973-2010, le déclin du couvert de glace serait de **88%** sur le lac Ontario, **50%** sur le lac Érié, **62%** sur le lac Huron, **77%** sur le lac Michigan et **79%** sur le lac Supérieur (Wang *et coll.*, 2012). De plus, cette étude note une forte variabilité interannuelle – et même décennale – qui est influencée par de grands modes de variabilité, notamment l'oscillation Arctique (OA) ainsi qu'El Niño. Ce déclin est confirmé par les analyses de diverses sources d'observations colligées par Bartolai *et coll.* (2015).

La base de données climatiques du SCG fournit la couverture accumulée totale (CAT). Le calcul de cet indicateur débute par la somme hebdomadaire du produit de la surface de chaque polygone de la carte du lac par sa concentration totale de glace correspondante divisée par la superficie de ce lac. On fait ensuite le cumul de toutes les semaines de la saison qui est divisé par le nombre de semaines dans la saison (Canada, 2010). L'Annexe H contient les graphiques de l'indicateur CAT sur la période 1981-2010 pour le lac Supérieur (Figure H-1), le lac Michigan (Figure H-3), le lac Huron (Figure H-5), le lac Érié (Figure H-7) et le lac Ontario (Figure H-9). Pour tous les lacs, on note une forte variabilité interannuelle dans les valeurs de CAT entre 1981 et 2010. Les tendances par décennies pour CAT sont de **-3,98%** [-7,77 ; -0,19] pour le lac Supérieur, **-1,5%** [-3,2 ; 0,2] pour le lac Michigan, **-2,7%** [-5,97 ; 0,57] pour le lac Huron, **-2,04%** [-6,82 ; 2,74] pour le lac Érié et de **-1,37%** [-2,57 ; -0,17] pour le lac Ontario. Bien que les tendances décennales soient à la baisse pour tous les lacs, elles ne sont significatives que pour les lacs Supérieur et Ontario, car les deux bornes de leurs intervalles de confiance sur la tendance confirment une diminution du CAT. Dans le cas du lac Érié, il subsiste même un doute sur le signe de la tendance. Encore une fois, on constate qu'une forte variabilité interannuelle rend plus difficile la détection de tendances significatives.

Le portrait est similaire si l'on considère la couverture maximale de glace fournie par la base de données climatiques du SCG entre 1981-2010 présentée pour chacun des Grands Lacs à l'Annexe H. La tendance décennale de la couverture maximale est de **-11,84%** [-25,05 ; 1,37] pour le lac Supérieur (Figure H-2), de **-6,43%** [-13,65 ; 0,79] pour le lac Michigan (Figure H-4), de **-9,23%** [-19,11 ; 0,65] pour le lac Huron (Figure H-6), de **-2,57%** [-15,16 ; 10,02] pour le lac Érié (Figure H-8) et de **-5,68%** [-12,11 ; 0,75] pour le lac Ontario (Figure H-10). Malgré ces tendances, on remarque que l'erreur sur la tendance est très souvent plus élevée que la tendance elle-même. Le fait que les intervalles de confiance ont tous une borne supérieure positive laisse planer un certain doute sur le signe de la tendance, particulièrement pour le lac Érié. Cela est le fait de la forte variabilité interannuelle, mais aussi de la variabilité décennale identifiée dans l'étude de Wang et coll. (2012) qui examinait la période 1973-2010. Refaire cet exercice pour la période 1973-2021, qui couvre presque 5 décennies, permettrait peut-être de clarifier certaines tendances.

À titre indicatif, la Figure 5-1 et la Figure 5-2 montrent respectivement les dates de l'englacement et du déglacement basées sur les concentrations médianes de glace 1981-2010 qui sont disponibles à toutes les deux semaines. Malheureusement, au moment de la rédaction du présent rapport, l'application web qui a permis de produire les figures avec calcul de tendances de CAT et de couverture maximale de glace de l'Annexe H ne permettait pas de faire l'exercice pour les dates d'englacement et de déglacement⁶.

⁶ <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page1.xhtml?lang=fr>

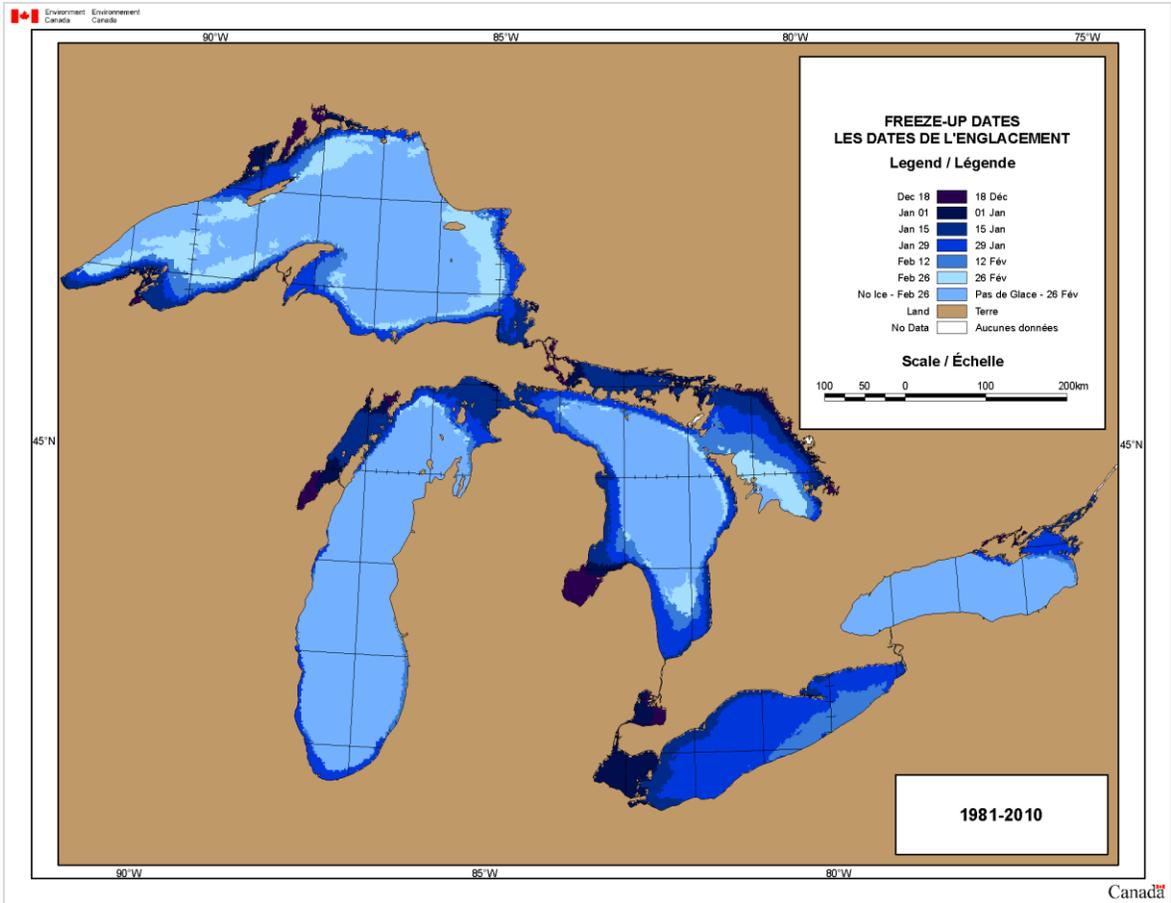


Figure 5-1. Dates de l'englacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.
Tiré de l'Atlas canadien des glaces de lac Grands Lacs 1981-2010 (Canada, 2010).

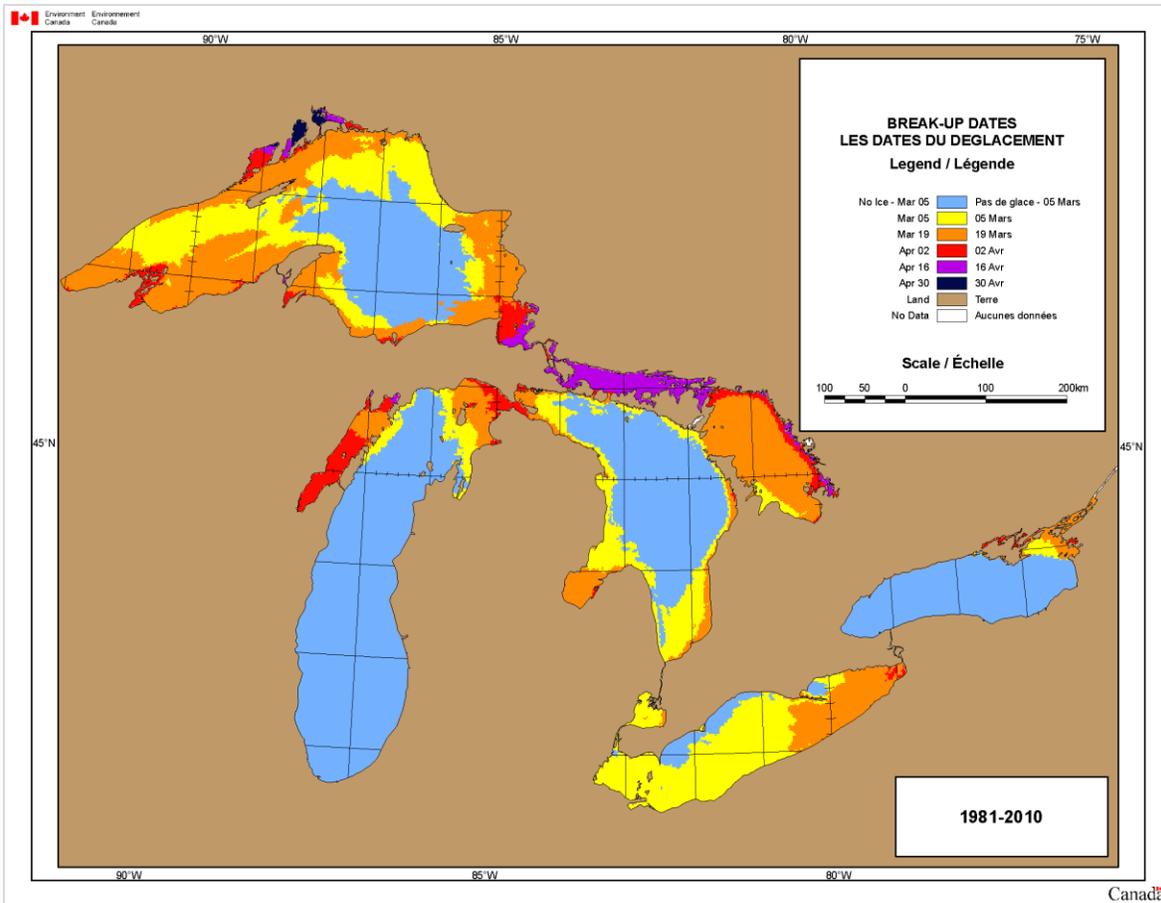


Figure 5-2. Dates du déglacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.

Tiré de l'Atlas canadien des glaces de lac Grands Lacs 1981-2010 (Canada, 2010).

Bien que basé sur une seule simulation climatique régionale prenant en compte l'un des anciens scénarios de GES, soit le SRES A2, Gula et Peltier (2012) anticipent d'importantes diminutions de la durée du couvert de glace entre 2050-2060 vs 1971-2001. Cette étude suggère que les températures plus chaudes en automne retarderaient l'apparition des glaces de 3 à 20 jours tandis que le réchauffement printanier devancerait leur disparition de 15 à 20 jours. En fin de compte, la durée du couvert de glace pourrait être réduite de 25 jours sur le lac Érié, de 30 jours sur le lac Ontario, de 35 jours sur le lac Huron, de 40 jours sur le lac Michigan et de 50 jours sur le lac Supérieur. Au moment de la rédaction de ce rapport, il n'y a pas d'information relative aux concentrations de glace.

5.2 LE FLEUVE SAINT-LAURENT ET L'ESTUAIRE FLUVIAL

Ce secteur n'est pas couvert par la base de données climatiques du SCG. De ce fait, il n'était pas possible d'obtenir un portrait des divers aspects de la couverture de glace entre 1981 et 2010. Côté projections climatiques, la résolution spatiale des projections climatiques régionales récentes est encore trop grossière pour capturer adéquatement la portion fluviale du Saint-Laurent et l'estuaire fluvial. Il existe des modèles hydrauliques, qui à l'aide de diverses données météorologiques (températures, vents, etc.), tentent de reproduire divers types de glaces et leurs mouvements en rivières. L'exercice ne semble pas avoir été fait à l'aide des données provenant de simulations climatiques.

5.3 L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT

La portion est de l'estuaire moyen ainsi que l'estuaire maritime est inclus dans la base de données climatiques des glaces du SCG. Les valeurs médianes de la période 1981-2010 des divers aspects de la couverture de glace à chaque deux semaines entre le 12 novembre et le 28 août dans l'Atlas canadien des glaces de mer Côte Est 1981-2010 (Environnement Canada, 2010). Toutefois, l'application web qui a permis de produire les figures de l'Annexe H ne permettait pas d'isoler l'estuaire du reste du golfe⁷. Par contre la Figure 5-3 indique que l'englacement survient normalement vers le 1^{er} janvier dans l'estuaire maritime et qu'il est déjà en grande partie libre de glace le 19 mars selon la Figure 5-4.

L'estuaire moyen et l'estuaire maritime sont les secteurs où les concentrations et les épaisseurs de glace sont les plus élevées et, bien qu'il devrait y avoir encore de la glace vers le milieu du 21^e siècle, les pertes y seront très importantes d'après Senneville et coll. (2014). Cette étude se base sur deux simulations climatiques régionales basées sur SRES A2 qui alimentent un modèle océanique. Bien que l'amplitude des changements varie d'une simulation à l'autre, on peut s'attendre à des pertes plus marquées dans l'estuaire maritime que dans l'estuaire moyen, particulièrement le long des côtes gaspésiennes. Conséquemment à la réduction du couvert de glace, on peut s'attendre à une augmentation de la hauteur des vagues dans l'estuaire maritime (Ruest et coll., 2016).

5.4 LE GOLFE DU SAINT-LAURENT

Le régime des glaces dans le golfe du Saint-Laurent au cours d'une saison est le fruit des interactions complexes entre des facteurs météorologiques tels que les températures et les vents ainsi que des facteurs océaniques comme, les courants marins, l'amplitude des marées, la bathymétrie et la proximité de la côte. Ces interactions, qui agissent sur l'épaisseur de la glace et son extension, sont décrites dans l'Atlas des glaces de mer Côte Est 1981-2010 (Environnement Canada, 2010), en plus des valeurs médianes à toutes les deux semaines pour plusieurs

⁷ <https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page1.xhtml?lang=fr>

caractéristiques du couvert de glace. Selon la Figure 5-3, on voit qu'à la mi-janvier, le couvert de glace est déjà formé le long de la Côte-Nord, au large de la péninsule gaspésienne ainsi qu'autour de l'Île-du-Prince-Édouard. À la mi-février, presque tout le golfe est normalement couvert de glace, mais on peut voir que la progression de la banquise peut se poursuivre jusqu'à la mi-mars dans certains secteurs du détroit de Cabot. Au même moment, la Figure 5-4 montre que le déglacement est déjà en cours par endroit le long de la Côte-Nord ainsi qu'au sud-ouest d'Anticosti. La disparition du couvert de glace survient normalement vers le début avril sur le Plateau madelinien et à la toute fin d'avril le long de la Basse-Côte-Nord. L'application web et la base de données climatiques du SCG ne permettaient pas d'accéder facilement aux tendances pour les dates de l'englacement et du déglacement. Toutefois, il a été possible de générer les valeurs annuelles de la couverture accumulée totale (CAT, définition à la section 5.1) entre le 12 novembre et le 27 août présentée à la Figure H-11 de l'Annexe H. Bien que l'on constate une bonne variabilité interannuelle (et une composante décennale) des valeurs de CAT pour le golfe du Saint-Laurent, la tendance décennale est de **-1.94%** [-3,36 ; -0,52] et confirme le déclin de la CAT, particulièrement depuis la saison 1994-1995. Le déclin de la couverture de glace maximale est plus clair avec une tendance décennale de **-4,56%** [-8,1 ; -1,02] telle qu'illustrée à la Figure H-12 de l'Annexe H. Comme c'était le cas pour les Grands Lacs, les tendances sont plus fiables lorsque l'on considère des périodes plus longues.

Il y a quelques études portant sur l'évolution des glaces de mer dans le golfe. Une seule repose sur le scénario de GES RCP8.5 (Loder, van der Baaren et Yashayaev, 2015). Elle repose sur 6 modèles globaux de CMIP5 qui ont, sans surprise, certaines difficultés à reproduire les concentrations de glace de la fin du 20^e siècle en raison de leur résolution spatiale un peu trop grossière pour une région comme le golfe. Malgré les disparités à l'intérieur de ce petit ensemble, la glace est disparue de toutes les simulations durant l'horizon 2046-2065.

D'autres études ont produit des résultats à plus haute résolution en utilisant des modèles régionaux de climat pour alimenter des modèles océaniques régionaux. Par contre, ces simulations reposent sur des scénarios d'évolution des GES plus anciens de la famille SRES (Senneville et coll., 2014; Long et coll., 2016).

D'après Long et coll. (2016) qui considère le scénario SRES A1B, le volume de glace au mois de mars passe d'environ 80 km³ vers 1980 à presque rien vers 2069. Ainsi, au milieu du 21^e siècle, la formation des glaces est beaucoup plus tardive de sorte qu'il ne resterait en janvier qu'un peu de glace le long des côtes sur l'ouest du golfe et que l'est du golfe serait exempt de glace marine en février et mars. Durant cette période la fonte des glaces est aussi plus hâtive puisque les concentrations de février seraient plus élevées qu'en mars. On retrouve sensiblement les mêmes patrons d'évolution des glaces dans l'étude de Senneville et coll. (2014) qui examine l'évolution des moyennes de décembre à avril des concentrations et des épaisseurs de glace sous le scénario SRES A2. La glace marine qui subsisterait à l'horizon 2041-2070 se trouve principalement le long des côtes ouest du golfe, mais avec des concentrations et des épaisseurs considérablement réduites, en accord avec une prise des glaces plus tardive de près de 14 jours et d'une fonte devancée de 22 jours en moyenne. Cette étude entrevoit une réduction d'un peu plus de 66% de la concentration de glace et de 68% du volume si l'on inclut aussi l'estuaire moyen et l'estuaire

maritime. En lien avec cette même étude, Ruest et coll. (2016) concluent à une augmentation de la hauteur des vagues durant cette période.

En dépit des lacunes évoquées plus haut quant aux projections climatiques dans le golfe du Saint-Laurent, force est de constater que le déclin du couvert de glace y est bel et bien déjà entamé sous l'effet du réchauffement des températures.

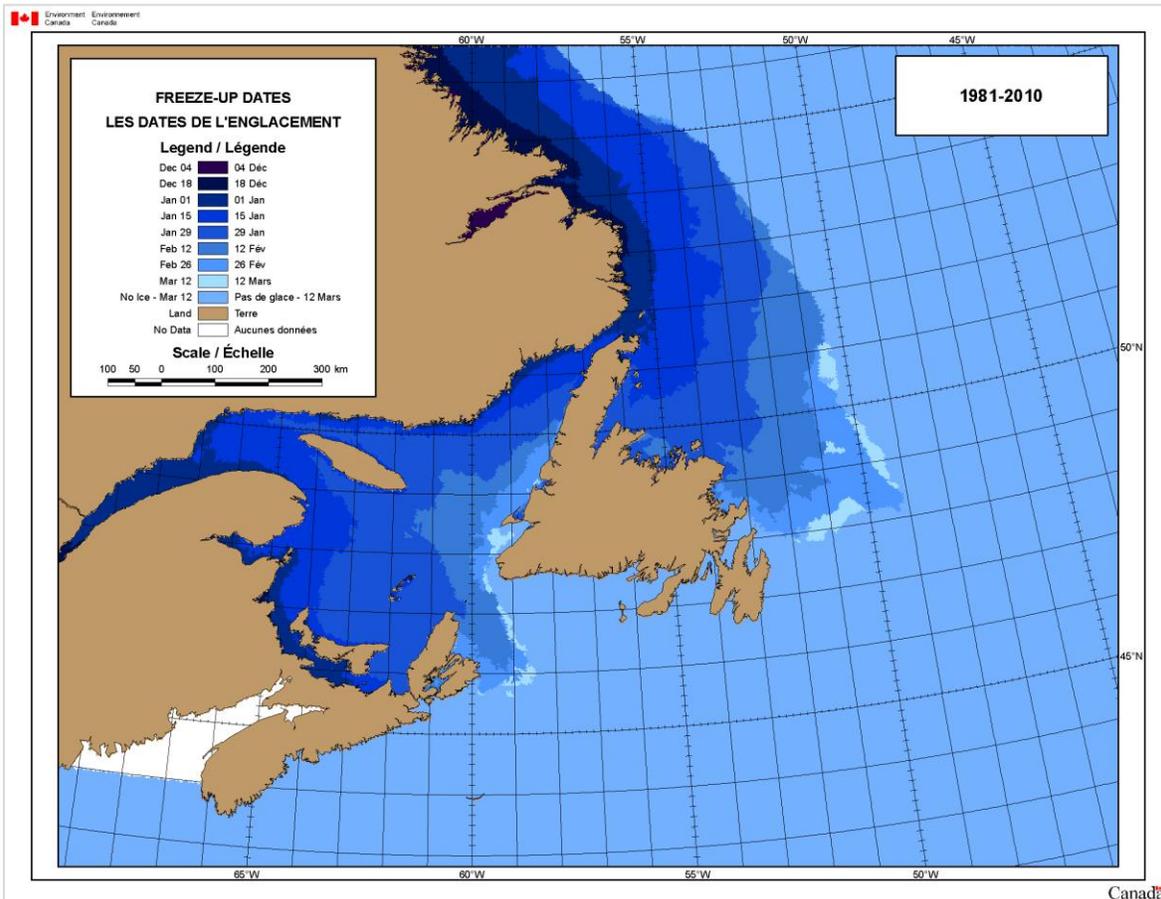


Figure 5-3. Dates de l'englacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.
Tiré de l'Atlas canadien des glaces de mer Côte Est 1981-2010 (Environnement Canada, 2010)

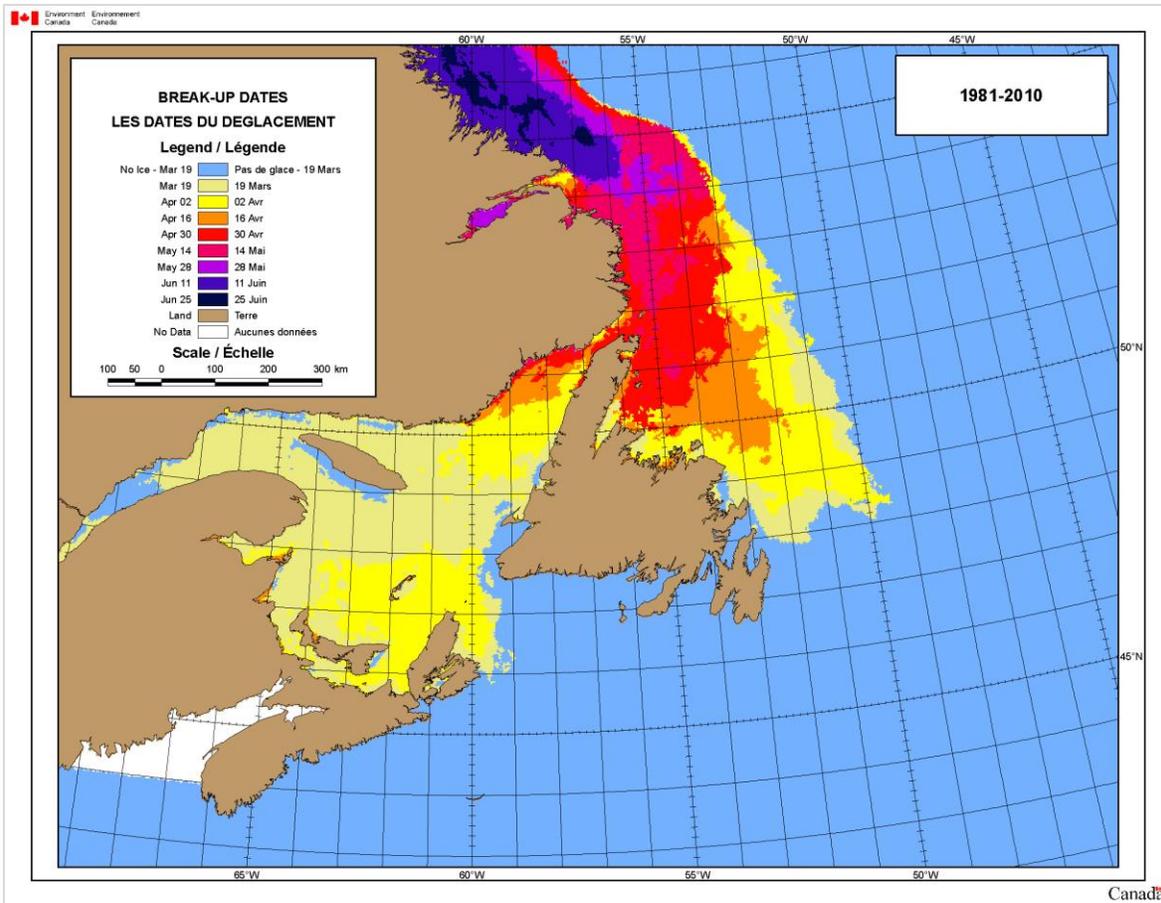


Figure 5-4. Dates du déglacement déterminées à partir des concentrations médianes aux deux semaines.
Tiré de l'Atlas canadien des glaces de mer Côte Est 1981-2010 (Environnement Canada, 2010)

6 RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS

Dans le but d'optimiser la résilience maritime, portuaire et intermodale, de nouvelles pistes de solutions pourraient être envisagées afin de compléter le portrait des connaissances hydroclimatiques en appui à la prise de décision notamment pour le cas du port de Montréal et son extension à Contrecoeur. Voici quelques suggestions :

- Rendre accessibles les indicateurs climatiques pertinents sur l'ensemble du corridor où sont situés les ports stratégiques de la province de Québec. Alors que les scénarios climatiques pour les températures et la précipitation sont de plus en plus faciles d'accès, des efforts d'opérationnalisation doivent être consentis pour ceux en lien avec la neige, le verglas et les vents ;
- Améliorer les analyses relatives aux dépressions extratropicales et autres types de tempêtes pour toutes les saisons à l'aide du plus grand nombre possible de simulations climatiques à plus fine résolution spatiale ;
- Analyser les simulations climatiques issues de divers modèles climatiques régionaux couplés avec des modèles de lac afin d'améliorer les connaissances sur la région des Grands Lacs ;
- Améliorer les connaissances et l'accès aux données pour les niveaux d'eau futurs plausibles du fleuve Saint-Laurent ainsi que les conditions de glaces ;
- Assurer une vigie sur l'évaluation des probabilités des scénarios d'émissions et de concentrations de GES et réaliser une analyse similaire à la présente étude pour les scénarios SSP utilisés dans CMIP6, l'ensemble de simulations rendu disponible en 2021 en coordination avec le rapport AR6 du GIEC ;
- Maintenir les cinq stations d'observations météorologiques dans les ports de Montréal et de Contrecoeur ainsi que leurs métadonnées. Les analyses ayant révélé une certaine hétérogénéité dans les distributions de vitesses de vent pour les quatre sites de Montréal, il pourrait s'avérer stratégique d'augmenter le nombre de stations pour Contrecoeur ;
- Documenter la représentativité spatiale des stations individuelles.

7 CONCLUSION

Les données produites dans le présent rapport technique servent essentiellement aux analyses réalisées par l'équipe du CIRRELT dans le cadre du projet « Résiliences des Composantes d'Infrastructures de Transport et de Logistique du Port de Montréal : Compilation, Analyse et Options d'Aide à la Décisions dans un contexte de Changement Climatique » ainsi qu'aux gestionnaires de l'Administration portuaire de Montréal afin d'appuyer la prise de décisions et la planification des activités menées par le port de Montréal. Ce partenaire important souhaite être proactif face aux risques que pose le climat afin de continuer d'assurer un service essentiel aux nombreuses populations qu'il dessert.

Les développements méthodologiques et les résultats sur la probabilité des RCPs constituent des gains importants en services climatiques à Ouranos. Il sera dorénavant possible de fournir un avis plus éclairé aux décideurs en ce qui concerne la probabilité des différents scénarios de concentration de gaz à effet de serre proposés pour produire de l'information concernant les conditions climatiques futures. Une analyse similaire pourra être réalisée pour les SSP, les nouveaux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre utilisés dans l'ensemble de simulations rendus disponibles en 2021 en coordination avec le rapport du GIEC. Il va de soi que l'analyse des risques climatiques futurs en bénéficiera.

Devant la demande très diversifiée des collaborateurs en termes de variables climatiques, des efforts ont été déployés à Ouranos pour uniformiser les approches en scénarisation du climat et fournir une information de plus en plus riche, robuste et répliquable. Comme présenté dans le rapport, les méthodologies peuvent différer selon les variables. Néanmoins, on a pu identifier un ensemble de simulations climatiques régionales sur lequel s'appuyer pour développer tous les indicateurs climatiques à l'échelle requise, soit une échelle spatiale particulièrement fine dans le cadre de l'étude pour l'Administration portuaire de Montréal. Les avancées techniques et scientifiques permettent d'enrichir l'offre de service d'Ouranos et de rendre opérationnelle la production de scénarios climatiques pour de nouvelles variables comme le verglas. En complémentarité, la revue de la littérature publiée sur les tempêtes et la glace fournit une mise à jour de l'état des connaissances sur ces aspects.

Finalement, le travail réalisé, en combinaison avec les échanges transparents entre les parties prenantes de ce projet, ont permis de consolider les savoirs et d'en expliquer l'importance à l'échelle d'un port d'envergure comme celui de Montréal. Les nouvelles connaissances pourront avoir un impact sur les conditions d'opération et de gestion du système portuaire. Les apprentissages réalisés entre les expertises climatiques, maritimes et en adaptation aux changements climatiques contribuent à rapprocher les perspectives entre les différentes parties prenantes afin de produire une science en réponse aux besoins des usagers. Ces efforts viennent appuyer une prise de décision et des pratiques plus éclairées, notamment en matière d'investissements et de planification pour rendre les systèmes portuaires plus résilients.

RÉFÉRENCES

- Bartolai, A. M. *et coll.* (2015) Climate change as a driver of change in the Great Lakes St . Lawrence River Basin', *Journal of Great Lakes Research*. International Association for Great Lakes Research. doi: 10.1016/j.jglr.2014.11.012.
- Booth, B. B. B., Bernie, D., McNeall, D., Hawkins, E., Caesar, J., Boulton, C., ... Sexton, D. (2012). Scenario and modelling uncertainty in global mean temperature change derived from emission driven Global Climate Models. *Earth System Dynamics Discussions*, 3(2), 1055–1084. <https://doi.org/10.5194/esdd-3-1055-2012>
- Bourgouin, P. (2000) A method to determine precipitation types. *Weather. Forecast.* 15, 583-592. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015<0583:AMTDPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0583:AMTDPT>2.0.CO;2)
- Bresson, É, Biner, S. (2021). *Évaluation de la neige au sol simulée par le MRCC5 pour la base de données de CROQ*. Rapport présenté par Ouranos, Montréal. Ouranos. 33 p. + annexes
- Brooks, H. E. (2013). Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, 123, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.002>
- Burgess, M. G., Ritchie, J., Shapland, J. & Pielke, R. (2020). IPCC baseline scenarios have over-projected CO 2 emissions and economic growth. *Environmental Research Letters*, 16(1), 014016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcdd2>
- Canada, E. (2010). *Atlas climatique des glaces de lac Gands Lacs 1981-2010*. Retrieved from <https://publications.gc.ca/site/eng/9.641600/publication.html>
- Cannon, A.J. Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping : How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?, *J. Clim.*, 28 (17), 6938-3959, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Capellán-Pérez, I., Arto, I., Polanco-Martínez, J. M., González-Eguino, M. & Neumann, M. B. (2016). Likelihood of climate change pathways under uncertainty on fossil fuel resource availability. *Energy and Environmental Science*, 9(8), 2482–2496. <https://doi.org/10.1039/c6ee01008c>
- Charron, I. (2016). Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, Édition 2016. Ouranos, 94 p.
- Cheng, V. Y. S., Arhonditsis, G. B., Sills, D. M. L., Auld, H., Shephard, M. W., Gough, W. A., & Klaassen, J. (2013). Probability of Tornado Occurrence across Canada *. *Journal of Climate*, 26(Nbcc 2005), 9415–9429. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00093.1>
- Christensen, P., Gillingham, K. & Nordhaus, W. (2018). Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(21), 5409–5414. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713628115>
- Collins, M., Sutherland, M., Bouwer, L., Cheong, S.-M., Frölicher, T. L., Jacot Des Combes, H., ... Timmermans, M.-L. (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 589–655. Retrieved from https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_Chapter6.pdf
- Environnement Canada. (2010). Atlas climatique des glaces de mer Côte Est 1981-2010.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. ...and Zaehle, S. (2020) Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K., & Knutti, R. (2014). Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks. *Journal of Climate*, 27(2), 511–526. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00579.1>
- Fyke, J. & Matthews, H. D. (2015). A probabilistic analysis of cumulative carbon emissions and

- long-term planetary warming. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/115007>
- Gennaretti F., Sangelantoni L. and Grenier P. (2015). Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature-precipitation interdependence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (23), 11862-11877, doi: 10.1002/2015JD023890.
- GIEC (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, doi:[10.1017/9781009157940.001](https://doi.org/10.1017/9781009157940.001).
- GIEC (2013): Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique. Gillett, N. P., Arora, V. K., Matthews, D. & Allen, M. R. (2013). Constraining the Ratio of Global Warming to Cumulative CO2 Emissions Using CMIP5 Simulations*. *Journal of Climate*, 26(18), 6844–6858. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00476.1>
- Gillett, N. P., Arora, V. K., Matthews, D. & Allen, M. R. (2013). Constraining the Ratio of Global Warming to Cumulative CO2 Emissions Using CMIP5 Simulations*. *Journal of Climate*, 26(18), 6844–6858. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00476.1>
- Gillingham, K., Nordhaus, W., Anthoff, D., Blanford, G., Bosetti, V., Christensen, P., ... Reilly, J. (2018). Modeling uncertainty in integrated assessment of climate change: A multimodel comparison. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(4), 791–826. <https://doi.org/10.1086/698910>
- Grenier, P. (2018) Two types of physical inconsistency to avoid with univariate quantile mapping: a case study over North America concerning relative humidity and its parent variables *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 57 (2), p. 347-364, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0177.1.
- Hausfather, Z. & Peters, G. P. (2020a). Emissions – the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Hausfather, Z. & Peters, G. P. (2020b). RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 202017124. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017124117>
- Ho, E., Budescu, D. V., Bosetti, V., van Vuuren, D. P. & Keller, K. (2019). Not all carbon dioxide emission scenarios are equally likely: A subjective expert assessment. *Climatic Change*, 155(4), 545– 561. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02500-y>
- Huard, D., J.G. Fyke, I. Capellan-Perez, D.H. Matthews, A.-I. Partanen. Estimating the likelihood of GHG concentration scenarios from probabilistic IAM simulations, Earth's Future. <https://doi.org/10.1029/2022EF002715>
- Jones, C., Robertson, E., Arora, V., Friedlingstein, P., Shevliakova, E., Bopp, L., ... Tjiputra, J. (2013). Twenty-first-century compatible CO2 emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 earth system models under four Representative Concentration Pathways. *Journal of Climate*, 26(13), 4398–4413. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00554.1>
- King, D., Schrag, D., Dadi, Z., Ye, Q. & Ghosh, A. (2015). *Climate change A risk assessment*.

- <https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2010.00403.x>
- King, P. W. S., Leduc, M. J., Sills, D. M. L., Donaldson, N. R., Hudak, D. R., Joe, P. & Murphy, B. P. (2003). Lake breezes in southern Ontario and their relation to tornado climatology. *Weather and Forecasting*, 18(5), 795–807. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0795:LBISOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0795:LBISOA>2.0.CO;2)
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Brooks, H., Kossin, J., Lawrimore, J. H., Arndt, D., ... Wuebbles, D. (2013). Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00262.1>
- Marcucci, A., Panos, E., Kypreos, S. & Fragkos, P. (2019) Probabilistic assessment of realizing the 1.5 °C climate target, *Applied Energy*, 239, 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.190>.
- Mastrandrea, M.D., & Schneider, S.H. (2004) Probabilistic Integrated Assessment of "Dangerous" Climate Change, *Science*, 304(5670), 571-575. <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1094147>.
- Mekis, É. Vincent, L. A. (2011) 'An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada', *Atmosphere-Ocean*, 49: 2, 163 — 177
To link to this Article: DOI: 10.1080/07055900.2011.583910
- Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 17-11-2022), 10.24381/cds.68d2bb3.
- Nordhaus, W. (2018). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333–360. <https://doi.org/10.1257/pol.20170046>
- Pedersen, J. S. T., van Vuuren, D. P., Aparício, B. A., Swart, R., Gupta, J., & Santos, F. D. (2020). Variability in historical emissions trends suggests a need for a wide range of global scenarios and regional analyses. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00045-y>
- Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M. W., Startz, R. & Liu, P. (2017). Less than 2 °c warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change*, 7(9), 637–641. <https://doi.org/10.1038/nclimate3352>
- Raskin, P. & Swart, R. (2020). Excluded futures: the continuity bias in scenario assessments. *Sustainable Earth*, 3, 5. Retrieved from <https://sustainableearth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42055-020-00030-5>
- Repeto, R.C. & Easton, R.W. (2015) Analyzing Climate Uncertainty and Risk with an Integrated Assessment Model, *SAIS Review of International Affairs*, 35, 47-59.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N. & Rafaj, P. (2011), RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Climatic Change*, 1(109), 33-57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
- Rogelj, J., Schaeffer, M., Friedlingstein, P., Gillett, N.P. Van Vuuren, D.P., Riahi, K., Allen, M. & Knutti, R. (2016) Differences between carbon budget estimates unravelled, *Nature Climate Change*, 6(3), 245-252, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2868>
- Schwalm, C. R., Glendon, S. & Duffy, P. B. (2020a). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(33), 19656–19657. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2007117117>
- Schwalm, C. R., Glendon, S. & Duffy, P. B. (2020b). Reply to Hausfather and Peters: RCP8.5 is neither problematic nor misleading. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 202018008. <https://doi.org/10.1073/pnas.2018008117>
- Sills, D. M. L., Kopp, G. A., Elliott, L., Jaffe, A. L., Sutherland, L., Miller, C. S., ... Wang, W. (2020). The Northern Tornadoes Project. *BAMS*, 2113–2132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0012.1>
- Sills, D. M. L., McCarthy, P. J., & Kopp, G. (2014). Implementation and application of the EF-

- Scale in Canada. *27th Conf. on Severe Local Storms*, P16B.6. Retrieved from <https://ams.confex.com/ams/27SLS/webprogram/Paper254999.html>
- Sokolov, A.P., Stone, P.H., Forest, C.E., Prinn, R., Sarofim, M.C., Webster, M., Paltsev, S.... & Jacoby, H. D. (2009), Probabilistic forecast for twenty-first-century climate based on uncertainties in emissions (without policy) and climate parameters, *Journal of Climate*, 22 (19), 5175--5204, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2863.1>.
- Spafford, L., & MacDougall, A. H. (2020). Quantifying the probability distribution function of the transient climate response to cumulative CO₂ emissions. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034044. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7b>
- Su, X., Takahashi, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Tanaka, K., Kato, E., Shiogama, H., ... & Emori, S. (2017). Emission pathways to achieve 2.0°C and 1.5°C climate targets. *Earth's Future*, 5(6),592-604. <http://doi.wiley.com/10.1002/2016EF000492>
- Themeßl, M.J., Gobiet, A. & Heinrich, G. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change* **112**, 449–468 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>
- van Vuuren, D.P., Carter, T.R. Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old. *Climatic Change* **122**, 415–429 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0974-2>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wang, J., Bai, X., Hu, H., Clites, A., Colton, M., & Lofgren, B. (2012). Temporal and spatial variability of Great Lakes ice cover, 1973-2010. *Journal of Climate*, 25(4), 1318–1329. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4066.1>
- Webster, M., Forest, C., Reilly, J., Babiker, M., Kicklighter, D., Mayer, M., et al. (2003). Uncertainty analysis of climate change and policy response. *Climatic Change*, 61 (3), 295– 320. <https://doi.org/10.1023/b:clim.0000004564.09961.9f>
- Webster, M. D., Babiker, M., Mayer, M., Reilly, J. M., Harnisch, J., Sarofim, M. C., and Wang, C. (2002), Uncertainty in Emissions Projections for Climate Models, *Atmos. Environ.* **36**(22), 3659–3670.
- WMO. (2017). *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. WMO-No. 1194. Retrieved from <https://www.wmo.int/cycloneguide/pdf/Global-Guide-to-Tropical-Cyclone-Forecasting.pdf>
- Zhuang, J., Dussin R., Jüling A., Rasp, S., xESMF: universal regridding for geospatial data. GitHub. GitHub repository. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3700105> (2020).

ANNEXE A

MÉTHODOLOGIE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA PROBABILITÉ DES RCP

La revue de littérature s'appuie sur une revue informelle débutée en 2016, puis complétée de manière plus systématique dans le cadre du présent projet. Dans le cadre de cette approche plus systématique, les articles pertinents à l'évaluation de la vraisemblance des scénarios de GES ont été identifiés par une recherche sur Google Scholar en utilisant les termes suivants:

- probability AND "Integrated Assessment Model*" à partir de 2015
- probability OR likelihood OR plausible "representative concentration pathway" à partir de 2019

Comme ces recherches génèrent plusieurs milliers de résultats, seuls les 100 premiers résultats (16 novembre 2020), classés par pertinence, ont été considérés dans chacun des deux cas. En plus de ces recherches, les articles cités par ou ayant cité les références suivantes ont également été considérés:

- Hausfather et Peters (2020),
- Schwalm, Glendon et Duffy (2020),
- Raftery et coll. (2017),
- Fyke et Matthews (2015).

Un tri de la pertinence des articles identifiés en fonction de leur titre a permis de constituer une collection d'environ 35 publications. Le résumé de ces articles a ensuite permis de faire un deuxième tri afin de ne conserver que les articles présentant des résultats ou des discussions portant sur l'évaluation de la probabilité de scénarios d'émissions ou de concentrations de GES. Au total, la revue compte plus de 90 articles, dont les plus pertinents ou représentatifs sont présentés.

Plusieurs articles identifiés portent sur l'évaluation de probabilités conditionnelles à un scénario d'émissions ou à une limite de température. Par exemple, le rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1.5C (GIEC, 2018) cite des travaux estimant la probabilité de limiter le réchauffement à 1.5C (Marcucci et coll., 2019; Su et coll., 2017). Ces articles n'ont pas été considérés dans cette revue puisqu'ils ne permettent pas de statuer sur les probabilités d'observer les différents RCP. De même, les articles portant sur les projections d'IAM découlant de récits narratifs n'ont pas été considérés.

ANNEXE B

DONNÉES UTILISÉES POUR LA SCÉNARISATION ET LE CALCUL DES INDICATEURS CLIMATIQUES

B.1 LES DONNÉES DE STATIONS D'OBSERVATIONS

B.1.1. Les données brutes des stations météorologiques d'ECCC

Le réseau de stations du Service météorologique du Canada (SMC) d'Environnement et Changement climatique Canada transmet en temps réel les observations pour de nombreuses variables selon les normes internationales de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Ces observations sont conservées dans le Système national d'archives (SNA). Tous les renseignements techniques relatifs observations se trouvent dans le Document technique – Archives nationales de données climatologiques⁸.

Il n'est pas recommandé d'utiliser ces données pour calculer des tendances observées, car leurs archives contiennent des discontinuités causées par des changements d'instruments, dans les procédures d'observations ainsi que dans l'environnement de la station qui ce qui peuvent contaminer la tendance. La longueur de la série d'observations ainsi que la quantité de données manquantes varient beaucoup d'une station à l'autre.

Dans la présente étude, la série d'observations quotidiennes à la station de l'aéroport Trudeau (code de station de l'OMM : 7025250) de l'épaisseur de neige au sol ainsi que la série horaire du type de précipitations qui rapporte la présence de verglas ont été utilisées afin d'avoir une idée très sommaire de la performance des modèles climatiques.

B.1.2. Les données homogénéisées des stations météorologiques d'ECCC

Les données brutes aux stations sont le matériau à la base pour la création des Données climatiques canadiennes ajustées et homogénéisées (DCCAH) d'ECCC (Mekis et Vincent 2011). On y accède à travers le site: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/recherche-donnees/tendances-variabilite-climatiques/donnees-canadiennes-ajustees-homogeneisees.html>. Citons simplement ce site:

« Ces données ont été créées pour être utilisées dans les recherches climatiques en incluant les études des changements climatiques. Elles incluent un nombre d'ajustements aux données originales des stations pour traiter les sauts causés par les changements d'instruments et de procédures d'observations. Quelques fois les observations de plusieurs stations ont été combinées pour générer de longues séries temporelles. »

Le processus d'ajustement et d'homogénéisation repose sur des méthodes statistiques ainsi que sur la qualité des métadonnées qui documentent les divers changements d'instrumentation ou dans

⁸ https://climat.meteo.gc.ca/doc/Documentation_technique.pdf. Consulté le 30 juillet 2021

les environs de la station. Le défi technique varie aussi selon la variable et la fréquence temporelle des archives à traiter. Les données DCCAH sont particulièrement utiles pour calculer les tendances observées à long terme.

Les séries du total mensuel de chutes de neige ajustées quotidiennes provenant de DCCAH pour la station de l'aéroport Trudeau (code de station de l'OMM : 7025250) ont servi pour évaluer sommairement la performance des modèles climatiques pour les chutes de neige.

B.1.3 Les données brutes aux stations de l'Administration portuaire de Montréal

L'Administration portuaire de Montréal a fourni les observations de la vitesse du vent provenant de ses cinq stations. Quatre de ces stations (nommées « Quai M-3 », « Quai 42 », « Quai 55 », et « Terminal Cast ») sont installées à Montréal, et l'autre est installée à Contrecoeur (et nommée « Contrecoeur »). Les données brutes à ces stations représentent des moyennes sur 60 secondes et sont disponibles à toutes les minutes. Ces données très locales ne couvrent que de 2014 à aujourd'hui. Elles ne sont donc pas d'une longueur suffisante pour servir de référence climatologique, mais elles ont été utilisées dans le processus de scénarisation du vent pour créer un proxy (voir section 3.3.4 et Annexe C) permettant d'obtenir des scénarios climatiques à une échelle plus locale.

B.2 LES DONNÉES DE RÉANALYSE ERA5-LAND

Les données de la réanalyse ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2019) fournissent une vue cohérente de l'évolution des variables terrestres sur plusieurs décennies à une résolution améliorée (0.1 degré) par rapport à ERA5. La réanalyse ERA5 combine les données de modèle de prévision météorologique de ECMWF (basé sur les lois de la physique) avec diverses sources d'observations du monde entier afin de fournir des données sur grille – et sans données manquantes - pour un large éventail de variables cohérentes dans l'espace et dans le temps. Les données ERA5-Land ont été produites en ré-exécutant le schéma de surface terrestre du modèle de prévision d'ECMWF avec une résolution spatiale accrue en lui fournissant les données de la réanalyse ECMWF ERA5 en intrants. Les données de réanalyse constituent l'un des meilleurs moyens d'obtenir une description à la fois crédible et complète du climat du passé sur plusieurs décennies.

Les données ERA5-Land fournissent à une fréquence horaire la température de l'air à 2 m et la somme cumulative des précipitations en équivalent liquide qui ont servi de données de référence à l'étape de l'ajustement de biais dans l'élaboration des scénarios de températures et des précipitations (sections 3.3.1 et 3.3.2; Tableau C-1 et Tableau C-2 de l'Annexe C). Les composantes est et nord du vent à 10m d'ERA5-Land ont servi à créer un proxy de données de référence pour l'ajustement de biais du maximum quotidien de la vitesse du vent (section 3.3.5; Tableau C-6 de l'Annexe C).

B.3 LES DONNÉES SIMULÉES PRODUITES PAR DES MODÈLES CLIMATIQUES

Les simulations climatiques retenues pour cette étude ont été produites par des modèles régionaux de climat. Ce type de modèle simule le climat à plus fine résolution que ne le ferait un modèle global, mais doit se limiter à une sous-région du globe afin de conserver des coûts et des temps de calcul raisonnables. À titre d'exemple, une seule simulation climatique régionale sur l'Amérique du Nord requiert de 3 à 4 mois en temps de calcul continu sur une grappe de calcul haute performance en fonction des ressources computationnelles disponibles, de la résolution spatiale de la simulation et de certaines spécificités du modèle climatique. Afin de garder le climat de la sous-région cohérent avec celui du reste du monde, le modèle régional a besoin de conditions aux frontières de sa grille provenant d'une simulation climatique issue d'un modèle global. C'est ce l'on appelle le pilotage d'un modèle régional de climat par un modèle global.

Les meilleures pratiques pour l'évaluation de l'impact des changements climatiques reposent sur l'utilisation d'ensembles de simulations climatiques. Cette approche permet de prendre en compte les principales sources d'incertitudes concernant le climat futur : la trajectoire d'évolution des GES, les imperfections des modèles climatiques et la variabilité naturelle de climat qui découle de la nature chaotique du système climatique. L'importance relative de ces sources d'incertitudes varie selon les variables, selon le temps et même selon les régions. Cela explique pourquoi l'on tente d'avoir des ensembles composés du plus grand nombre possible de simulations produites par la plus grande diversité de modèles climatiques utilisant plusieurs RCP. Quant à la variabilité naturelle, il suffit de perturber les conditions initiales d'une simulation climatique pour en percevoir les effets. Des explications supplémentaires sur ces différents concepts sont fournies dans Charron (2016).

Toutes les simulations utilisées pour construire les scénarios climatiques requis par la présente étude ont été produites dans le cadre de projets internationaux de modélisation climatique sous l'égide du World Climate Research Program (WCRP). Les simulations régionales sur l'Amérique du Nord proviennent du programme CORDEX. Les simulations provenant de modèles globaux qui ont fourni les conditions aux frontières des simulations régionales ont été produites dans le cadre du programme CMIP5. Ainsi, les centres de modélisation participants se sont conformés aux protocoles standards de ces deux programmes pour la production des simulations climatiques. De plus, dans le cadre de CMIP5, les modèles globaux étaient encouragés à fournir des simulations avec des conditions initiales perturbées pour caractériser la variabilité naturelle. Ces simulations sont identifiées par un numéro de membre différent de 1 dans le Tableau B-1.

Tableau B-1. Liste et caractéristiques des simulations climatiques régionales retenues pour chaque variable à des fins de scénarisation climatique.

Modèle régional/ Modèle global lui servant de pilote-membre	RCP	Résolution du modèle (°)	Températures	Précipitations totales	Précipitations neigeuses	Verglas	Neige au sol	Vents
CanRCM4/CanESM2-m1	RCP 4.5	0.22°	x	x	x		x	x
	RCP 8.5	0.22°	x	x	x		x	x
CanRCM4/CanESM2-m1	RCP 4.5	0.44°			x		x	x
	RCP 8.5	0.44°			x		x	x
HIRHAM5/EC-EARTH	RCP 4.5	0.44°	x	x			x	x
	RCP 8.5	0.44°	x	x			x	x
MRCC5 (Ouranos)/CanESM2-m1	RCP 4.5	0.22°	x	x	x	x	x	x
	RCP 8.5	0.22°	x	x	x	x	x	x
MRCC5 (Ouranos)/CanESM2-m2	RCP 8.5	0.22°				x		
MRCC5 (Ouranos)/CanESM2-m3	RCP 8.5	0.22°				x		
MRCC5 (Ouranos)/CanESM2-m4	RCP 8.5	0.22°				x		
MRCC5 (Ouranos)/CanESM2-m5	RCP 8.5	0.22°				x		
MRCC5 (Ouranos)/CNRM- CM5	RCP 4.5	0.22°	x	x	x	x	x	x
	RCP 8.5	0.22°	x	x	x	x	x	x
MRCC5 (Ouranos)/MPI- ESM-LR	RCP 4.5	0.22°	x	x	x	x	x	

Modèle régional/ Modèle global lui servant de pilote-membre	RCP	Résolution du modèle (°)	Températures	Précipitations totales	Précipitations neigeuses	Verglas	Neige au sol	Vents
	RCP 8.5	0.22°	x	x	x	x	x	x
MRCC5 (Ouranos)/GFDL- ESM2M	RCP 4.5	0.22°	x	x	x	x	x	
	RCP 8.5	0.22°	x	x	x	x	x	
MRCC5 (UQAM)/MPI-ESM- LR	RCP 4.5	0.44°	x	x	x		x	x
MRCC5 (UQAM)/MPI-ESM- MR	RCP 4.5	0.44°	x	x				
	RCP 4.5	0.44°	x	x				
MRCC5 (UQAM)/CanESM2	RCP 4.5	0.44°	x	x	x		x	x
	RCP 8.5	0.44°	x	x				
RCA4 (SMHI)/CanESM2	RCP 4.5	0.44°	x	x	x		x	x
	RCP 8.5	0.44°	x	x	x		x	x
RCA4 (SMHI)/EC-EARTH	RCP 4.5	0.44°	x	x	x		x	x
	RCP 8.5	0.44°	x	x	x		x	x
RegCM4 (ISU)/MPI-ESM- LR	RCP 8.5	0.22°	x	x				
RegCM4 (ISU)/GFDL- ESM2M	RCP 8.5	0.22°	x	x				
RegCM4 (ISU)/HadGEM2- ES	RCP 8.5	0.22°	x	x				
RegCM4 (NCAR)/MPI- ESM-LR	RCP8.5	0.44°						x

ANNEXE C

INFORMATIONS TECHNIQUES RELATIVES AUX ÉTAPES DU PROCESSUS DE SCÉNARISATION CLIMATIQUE POUR LES DIFFÉRENTES VARIABLES SERVANT AU CALCUL DES INDICATEURS.

C.1. DESCRIPTION DES TECHNIQUES D'AJUSTEMENT DE BIAIS UTILISÉES À L'ÉTAPE DU POST-TRAITEMENT

Selon la disponibilité d'un jeu de données de référence approprié, le développement de scénarios climatiques implique, dans la plupart des cas, une étape d'ajustement des sorties brutes de modèles climatiques afin de pallier leurs erreurs et leur résolution parfois trop grossière. Les scénarios climatiques locaux et adaptés aux besoins des usagers ont été développés ici avec une méthode d'ajustement de biais pour les variables de températures minimales et maximales quotidiennes, ainsi que pour les précipitations totales quotidiennes. Les données de la réanalyse ERA5-Land pour la période 1981-2010 ont été utilisées comme produit de référence. ERA5-Land est un ensemble de données de réanalyse fournissant une vue cohérente de l'évolution des variables terrestres sur plusieurs décennies à une résolution de 0.1 degré.

C.1.1 La technique du Detrended Quantile Mapping

Les procédés choisis sont tous basés sur la méthode « Detrended Quantile Mapping » (DQM) décrite par Cannon et coll. (2015). Les différentes variables climatiques sont ajustées indépendamment sur la période 1971-2100.

Les données de référence et les données historiques des simulations, couvrant la période 1981-2010, sont d'abord normalisées puis les valeurs sont distribuées en 50 quantiles et comparées pour le calcul des facteurs d'ajustement. En faisant ce calcul sur chacun des 12 mois de l'année, une matrice de facteurs est générée et interpolée sur les jours de l'année afin d'éviter des discontinuités entre le début d'un mois et la fin du mois précédent.

Pour l'ajustement lui-même, la tendance linéaire des projections est calculée puis retirée de la série afin de réduire l'effet des changements climatiques dans le calcul des distributions. Puis, le rang quantile par rapport à la distribution des données historiques normalisées est trouvé pour chacun des points de cette anomalie et le facteur d'ajustement approprié est calculé par interpolation linéaire dans la matrice de facteurs de corrections préalablement générée. Par exemple, si une valeur x au 1^{er} juin 2030 de la projection sans tendance correspond au 60^e quantile par rapport à la distribution des données historiques normalisées, le facteur d'ajustement approprié est trouvé en interpolant linéairement entre les facteurs de 59^e et 61^e quantiles de mai et juin.

Les facteurs sont appliqués et la tendance linéaire ajoutée pour finalement obtenir un scénario climatique. Selon la variable traitée, ces opérations sont faites soit en mode multiplicatif (précipitation), soit en mode additif (températures).

C.1.2. La technique du Quantile Mapping

Les indices de vent (section 3.3.5) sont basés sur la variable journalière 'sfcWindmax', correspondant à la vitesse maximale de vent atteinte au cours de la journée. La technique d'ajustement de biais pour cette variable correspond simplement à la procédure de transformation quantile-quantile (ci-après dénommée QM, pour l'expression anglaise *quantile mapping*). Il s'agit de la même procédure que celle étant au cœur de la technique DQM décrite à la section précédente. Cependant, dans le cas de 'sfcWindmax', la technique utilisée ne comporte pas de procédure spéciale pour favoriser la préservation de la tendance simulée à long terme. L'idée centrale de QM est de construire une fonction de transfert entre la distribution simulée et la distribution de référence (ERA5-Land) sur une période de calibration (ici 1981-2020), puis d'appliquer cette fonction sur le segment simulé d'une période d'application souhaitée.

La technique QM comporte typiquement quelques paramètres et procédures auxiliaires optionnels, dont les rôles sont détaillés notamment dans Grenier (2018) et repris ici de manière succincte. La technique utilisée a recours à une fenêtre mobile (procédure auxiliaire à QM) de 31 jours (paramètre à valeur subjective), ce qui signifie que chaque jour de l'année est traité séparément. Par exemple, lorsque l'algorithme en est rendu à traiter le 4 avril, la fonction de transfert se base sur tous les jours de la période de calibration inclusivement compris entre le 20 mars et le 19 avril, pour des distributions respectives (simulées et de référence) de 930 valeurs (31 jours x 30 années). Le recours à une fenêtre mobile empêche les discontinuités non réalistes aux interfaces des mois (Gennaretti et coll., 2015). La fonction de transfert est définie à 50 nœuds (paramètre à valeur subjective), soit aux centiles 1, 3, 5, ..., 95, 97 et 99 des distributions. Avec 930 valeurs par distribution, ceci correspond grosso modo à identifier le facteur multiplicatif entre la 10^e plus petite valeur simulée et la 10^e plus petite valeur de référence (1^{er} centile), entre la 29^e plus petite valeur simulée et la 29^e plus petite valeur de référence (3^e centile), entre la 47^e plus petite valeur simulée et la 47^e plus petite valeur de référence (5^e centile), et ainsi de suite. Les valeurs à ajuster sont ensuite associées au nœud le plus près, puis multipliées en conséquence. Par exemple, si les 61^e et 63^e centiles simulés correspondent respectivement à 5.42 m/s et 5.46 m/s, et que la fonction de transfert établie pour ces centiles est respectivement à 2.4 et 2.5 (ratios), alors une valeur simulée de 5.43 m/s serait ajustée en la multipliant par un facteur 2.4 (la technique utilise le nœud le plus proche et une extrapolation constante au-delà des centiles 1 et 99).

À noter qu'il n'y a pas de traitement spécial des nouveaux extrêmes, c'est-à-dire des valeurs simulées (d'une période d'application) sortant de la plage des valeurs simulées rencontrées en période de calibration. À noter aussi que l'absence d'une procédure favorisant la préservation de la tendance simulée à long terme ne signifie pas qu'il y aura nécessairement une forte altération de cette propriété.

C.1.3. L'ajustement des jours secs

Les techniques d'ajustement par quantiles sont sensibles aux données de précipitations qui contiennent beaucoup de jours sans pluie. Lorsqu'une même valeur exacte (ici 0) est répétée, le calcul devient plus numériquement instable. Pareillement, si les simulations contiennent beaucoup plus de jours sans pluie que les observations. Pour pallier ces problèmes, des quantités de pluie négligeable sont insérées au lieu des 0 dans les données d'entrée du post-traitement. Puis, d'autres petites quantités de pluie sont ajoutées sur quelques jours sans pluie, là où ceux-ci sont plus

nombreux que dans les observations. Ce dernier ajustement est basé sur la technique de Themessl et coll. (2012). À noter que seules les données servant au calcul des facteurs d'ajustement sont ainsi modifiées, et non les données corrigées. Ainsi, la technique rend la procédure d'ajustement plus robuste sans pour autant modifier les scénarios servant au calcul des indicateurs.

C.1.4. La technique par proxy

La technique par proxy consiste à créer une nouvelle série de données de référence (le proxy) à l'aide de deux sources de données aux atouts opposés, mais complémentaires. Cette approche permet de tirer profit d'une série de données très locales d'une durée insuffisante pour l'étude du climat, en la combinant à une série de données multidécennale, mais d'échelle spatiale plus grossière, généralement une réanalyse. Le lien entre les deux séries est établi sur leur période commune grâce à un algorithme de régression nommé *k-nearest neighbors* (*k*-NN). Sur le segment commun, le proxy se colle essentiellement aux observations. L'usage des données très locales fait en sorte que la technique par proxy contient intrinsèquement une composante de mise à l'échelle. Cette approche est particulièrement intéressante pour le vent qui est une variable particulièrement sensible aux effets très locaux. L'interprétation du proxy est la suivante: il s'agit des valeurs, dans ce cas-ci les maxima quotidiens de vent, que l'on aurait plausiblement pu observer localement aux stations, si des anémomètres y avaient été installés entre 1981 et 2019.

Une fois le proxy créé, le segment 1981-2010 sert de produit de référence pour l'ajustement statistique des biais des simulations climatiques. À cette étape, le choix de la technique d'ajustement de biais dépend essentiellement des caractéristiques de la variable à post-traiter ainsi que des indicateurs qui en découlent. L'ajustement du biais et de l'échelle peut s'avérer essentiel lorsqu'on travaille avec des indices comportant des seuils à atteindre. À noter que cette méthodologie repose sur une confiance à deux niveaux envers les données des stations : 1) on suppose que les anémomètres fournissent des observations de qualité de la vitesse du vent au lieu précis de l'instrument; 2) on présume que les stations sont représentatives des statistiques de vent en quelques autres endroits rapprochés et jugés d'intérêt par l'Administration portuaire de Montréal. Autrement dit, les emplacements des stations ont été stratégiquement choisis en fonction de certaines problématiques d'intérêt.

C.2. DÉTAILS DES OPÉRATIONS EFFECTUÉES AUX VARIABLES SIMULÉES AU COURS DU PROCESSUS DE SCÉNARISATION

Les tableaux C.1 à C.6 qui suivent décrivent en détail toutes les opérations effectuées sur les données à chacune des étapes de l'élaboration des scénarios climatiques à partir des simulations climatiques régionales. Ces étapes sont schématisées à la Figure 3-1 de la section 3.3 portant sur la méthodologie.

Tableau C-1. Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour les températures quotidiennes minimales et maximales à 2m.

Identification des données sources	<ul style="list-style-type: none"> • Simulations climatiques régionales CORDEX pour le domaine Amérique du Nord (NA). • Simulations climatiques régionales additionnelles produites par Ouranos respectant le protocole CORDEX-NA. • Réanalyses ERA5-Land comme données de référence pour le post-traitement.
Sélection des données	<ul style="list-style-type: none"> • Variables <i>tasmax</i> et <i>tasmin</i> provenant de: 12 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et de 12 basées sur RCP8.5 CORDEX-NA et d'Ouranos, archivées à une fréquence quotidienne, de 1950 à 2100 (Tableau B-1) • Variable <i>tas</i> (<i>température à 2m</i>) provenant de ERA5-Land, archivée à une fréquence horaire entre 1981 et 2010.
Découpage spatio-temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction de la région correspondant approximativement à la Figure 3-2c pour les ERA5-Land et celles des simulations climatiques. • Pour ERA5-Land, obtenir <i>tasmin</i> et <i>tasmax</i> en prenant le minimum et le maximum quotidien des valeurs horaires de <i>tas</i>.
Transfert de grille / interpolation	Interpolation bilinéaire des simulations climatiques régionales ayant des résolutions spatiales de 0,44° ou 0,22° sur la grille ERA5-Land à 0,1° de résolution à l'aide du logiciel xESMF (Zhuang et coll., 2020). L'interpolation est faite selon une méthode bilinéaire, qui approxime les champs entre quatre points de grille comme ayant la forme $f(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy$.
Post-traitement	Ajustement des biais par la technique <i>Detrended Quantile Mapping</i> (section C.1.1 La technique du Detrended Quantile Mapping). Les facteurs d'ajustement sont appliqués en mode additif sur <i>tasmin</i> et <i>tasmax</i> .
Calcul d'indicateurs	<p>Pour les 12 scénarios basés RCP4.5 et les 12 basés sur RCP8.5 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Liste des indicateurs définis dans le tableau 3.1 et calculés à l'aide de diverses fonctions provenant de la programmation xclim V0.18 (DOI : 10.5281/zenodo.5080548) <ul style="list-style-type: none"> ○ Fréquence $T_{min} < -25^{\circ}\text{C}$ ○ Fréquence $T_{max} > 35^{\circ}\text{C}$ ○ Fréquence, durée maximale et durée totale des vagues de chaleur (<i>tasmin</i> > 22 et <i>tasmax</i> > 30). ○ Longueur, début et fin de la saison de gel ○ Cycles Gel/dégel ○ Amplitude thermique diurne moyenne et maximale ○ Durée et fréquence des vagues de froid selon 4 définitions • Suite au calcul des indicateurs, moyenne, entre les points de grille de 0,1°, pondérée au prorata de leur couverture des sites représentés par la zone orange de la figure 3.2a pour le Port de Montréal et de la Figure 3-2b pour le terminal de Contrecoeur. • Calcul des moyennes climatiques sur les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour chaque indicateur, à chaque site.
Statistiques d'ensemble	Pour chaque indicateur, moyenne, minimum et maximum de chacun des ensembles formés par les moyennes climatiques de chacun des scénarios basés respectivement sur RCP4.5 et RCP8.5.
Visualisation	<ul style="list-style-type: none"> • Moyenne et intervalle défini par le minimum et le maximum [format : moy (min – max)] de l'ensemble des 12 moyennes climatiques RCP4.5 et des 12 moyennes climatiques basées sur RCP8.5 fournis pour chaque indicateur et chaque période dans les Tableau D-1 et Tableau D-2. • Graphiques d'évolution de la moyenne, du minimum et du maximum des ensembles des 12 scénarios RCP4.5 et des 12 scénarios RCP8.5 pour chaque année 1950 et 2100. Les lignes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3 (voir Annexe E pour le site du port de Montréal et Annexe F pour le terminal de Contrecoeur)

Tableau C-2. Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour la précipitation totale.

Identification des données sources	<ul style="list-style-type: none"> • Simulations climatiques régionales CORDEX pour le domaine Amérique du Nord (NA). • Simulations climatiques régionales additionnelles produites par Ouranos respectant le protocole CORDEX-NA. • Réanalyses ERA5-Land comme données de référence pour le post-traitement.
Sélection des données	<p>Variable pr provenant de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 12 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et de 12 basées sur RCP8.5 CORDEX-NA et d'Ouranos, archivées à une fréquence horaire ou aux 3 heures, de 1950 à 2100 (Tableau B-1) • La somme cumulative des précipitations en équivalent liquide (mm d'eau) de ERA5-Land à une fréquence horaire entre 1981 et 2010. Cette somme se réinitialise après minuit pour chaque jour de donnée.
Découpage spatio-temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction de la région correspondant approximativement à la Figure 3-2c pour les données de ERA5-Land et celles des simulations climatiques. • Pour ERA5-Land, obtenir le flux de précipitation horaire à partir de la somme cumulative des précipitations. • Valeurs quotidiennes obtenues en effectuant les moyennes quotidiennes du flux de précipitation horaire ou aux 3h pour les simulations climatiques et ERA5-Land.
Transfert de grille / interpolation	<p>Interpolation bilinéaire des simulations climatiques régionales ayant des résolutions spatiales de 0,44° ou 0,22° sur la grille ERA5-Land à 0,1° de résolution à l'aide du logiciel xESMF (Zhuang et coll., 2020). L'interpolation est faite selon une méthode bilinéaire, qui approxime les champs entre quatre points de grille comme ayant la forme $f(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy$.</p>
Post-traitement	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustement des jours secs (section C.1.3. L'ajustement des jours secs) • Ajustement des biais par la technique Detrended Quantile Mapping (section C.1.1 La technique du Detrended Quantile Mapping). Les facteurs d'ajustement sont appliqués en mode multiplicatif sur pr.
Calcul d'indicateurs	<p>Pour les 12 scénarios basés RCP4.5 et les 12 basés sur RCP8.5 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Liste des indicateurs définis dans le Tableau 3-1 et calculés à l'aide de diverses fonctions provenant de la programmathèque xclim V0.18 (DOI : 10.5281/zenodo.5080548) <ul style="list-style-type: none"> ○ Précipitations moyennes ○ Intensité des précipitations quotidiennes > 10 mm ○ Maximum de précipitation quotidienne. ○ Durée maximale d'une période sèche. • Suite au calcul des indicateurs, moyenne, entre les points de grille de 0,1°, pondérée au prorata de leur couverture des sites représentés par la zone orange de la Figure 3-2a pour le Port de Montréal et de la Figure 3-2b pour le terminal de Contrecoeur. • Calcul des moyennes climatiques sur les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour chaque indicateur, à chaque site.
Statistiques d'ensemble	<p>Pour chaque indicateur, moyenne, minimum et maximum de chacun des ensembles formés par les moyennes climatiques de chacun des scénarios basés respectivement sur RCP4.5 et RCP8.5.</p>
Visualisation	<ul style="list-style-type: none"> • Moyenne et intervalle défini par le minimum et le maximum [format : moy (min – max)] basé sur chaque RCP et fournis pour chaque indicateur et chaque période dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D. • Graphiques d'évolution de la moyenne, du minimum et du maximum des ensembles des 12 scénarios RCP4.5 et des 12 scénarios RCP8.5 pour chaque année 1950 et 2100. Les lignes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3 (voir Annexe E pour le site du port de Montréal et Annexe F pour le terminal de Contrecoeur.

Tableau C-3. Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour le verglas.

Identification des données sources	<ul style="list-style-type: none"> • Simulations climatiques régionales MRCC5 produites pour CORDEX sur le domaine Amérique du Nord (NA). • Simulations climatiques régionales additionnelles produites par Ouranos. • Observations brutes de la station météorologique d'ECCC (section B1.1) de l'aéroport Trudeau, pour l'occurrence de verglas rapportée à une fréquence horaire (code de station 7025250). Elles ont servi à évaluer la performance des simulations climatiques régionales sur la période historique en comparant avec les données du MRCC aux points de grille des sites portuaires.
Sélection des données	<ul style="list-style-type: none"> • Variable <i>prfr</i> flux de précipitations verglaçantes, archivée à une fréquence de 3 heures, de 1950 à 2100 provenant de 4 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et 8 basées sur RCP8.5 (Tableau B-1) • Conversion d'unités : $1 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ correspond à 1 mm/s, car 1 kg réparti sur une surface 1 m^2 correspond à une épaisseur de 1 mm.
Découpage spatio-temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Pour chaque simulation climatique régionale MRCC5, extraction du point de grille – ou des points- couvrant en tout en partie chacun des sites (Port de Montréal et terminal de Contrecoeur, Figure 3-2a et Figure 3-2b).
Transfert de grille / interpolation	Aucun traitement requis.
Post-traitement	Aucun post-traitement en raison de l'absence de données fiables d'observations ou de réanalyses pouvant servir de référence.
Calcul d'indicateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul des indicateurs : <ul style="list-style-type: none"> ○ Nombre d'épisodes totaux ○ Nombre d'épisodes de verglas ≤ 6 heures ○ Nombre d'épisodes de verglas > 6 heures ○ Quantité de verglas tombé lors des épisodes $>$ de 6 heures ○ Nombre d'épisodes de verglas avec accumulation $\geq 10 \text{ mm}$ ($\geq 15 \text{ mm}$, $\geq 20 \text{ mm}$ et $\geq 25 \text{ mm}$) ○ Nombre d'heures d'occurrence de verglas • Suivant le calcul des indicateurs pour les 4 scénarios RCP4.5 et les 8 scénarios RCP8.5, on effectue, pour chacun d'entre eux au site de Contrecoeur, une moyenne entre les 2 points de grille, pondérée au prorata de leur couverture du site (60,4% et 40,6%) représenté par la zone orange de la Figure 3-2b • Calcul des moyennes climatiques sur les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100.
Statistiques d'ensemble	<ul style="list-style-type: none"> • Pondérer l'ensemble RCP8.5, car 5 des 8 simulations sont issues de MRCC5 piloté par 5 simulations produites par CanESM2 causant un déséquilibre dans la composition de l'ensemble. Les résultats de ces 5 scénarios sont préalablement moyennés afin de ne conserver qu'une seule représentation de la combinaison MRCC5/CanESM2 dans l'ensemble. • Pour chaque indicateur, moyenne, minimum et maximum de chacun des ensembles formés par les moyennes climatiques de chacun des 4 scénarios basés sur RCP4.5 et maintenant 4 scénarios RCP8.5 découlant de simulations climatiques régionales de MRCC5.
Visualisation	<u>Moyenne et intervalle défini par le minimum et le maximum de l'ensemble [format : moy (min – max)] basé sur chaque RCP et fournis pour chaque indicateur et chaque période dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 de l'Annexe D.</u>

Tableau C-4. Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour les précipitations neigeuses.

Identification des données sources	<ul style="list-style-type: none"> • Simulations climatiques régionales CORDEX pour le domaine Amérique du Nord (NA). • Simulations climatiques régionales additionnelles produites par Ouranos respectant le protocole CORDEX-NA. • Observations provenant de la 2^e génération de données homogénéisées de la station météorologique d'ECCC (section B.1.2) de l'aéroport Trudeau, fournies sous forme d'équivalent en eau en mm/j (code de station 7025250). Elles ont servi à évaluer la performance des simulations climatiques régionales sur la période historique.
Sélection des données	Variable <i>prsn</i> du flux de précipitations sous forme de neige, archivée à une fréquence de 3 heures ou quotidienne, de 1950 à 2100 provenant de 10 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et 8 basées sur RCP8.5 (Tableau B-1).
Découpage spatio-temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les simulations dont les données n'étaient pas déjà à une fréquence quotidienne, les valeurs ont été obtenues en effectuant les moyennes quotidiennes du flux de précipitation neigeuse <i>prsn</i> archivé aux 3h. • Conversion d'unités : <ul style="list-style-type: none"> ○ Les flux quotidiens sont multipliés par 86400 s/j; ○ 1 kg réparti sur une surface 1 m² correspond à une épaisseur de 1 mm; ○ Selon les hypothèses usuelles sur la densité typique de la neige, 1 cm de neige équivaut à 1 mm d'eau. • Selon la résolution spatiale et la projection cartographique de la grille de chaque simulation climatique régionale, extraction du point de grille – ou des points- couvrant en tout en partie chacun des sites représentés par la zone orange de la Figure 3-2a pour le Port de Montréal et de la Figure 3-2b pour le terminal de Contrecoeur.
Transfert de grille / interpolation	Aucun traitement sur la simulation climatique régionale si un seul point de grille a été extrait pour le site. Sinon, on effectue une moyenne pondérée entre les 2 points de grille, au prorata de leur couverture du site.
Post-traitement	Aucun post-traitement en raison d'enjeux de fiabilité des sources de données d'observations ou de réanalyses pouvant servir de référence et de leur trop grande disparité les unes par rapport aux autres.
Calcul d'indicateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de jours avec <i>prsn</i> \geq 25 mm (correspondant à 25 cm) • Calcul des moyennes climatiques sur les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100.
Statistiques d'ensemble	Pour chaque indicateur, moyenne, minimum et maximum de chacun des ensembles des moyennes climatiques de chacun des scénarios basés respectivement sur RCP4.5 et RCP8.5 découlant de simulations climatiques régionales.
Visualisation	Moyenne et intervalle défini par le minimum et le maximum de l'ensemble [format : moy (min – max)] basé sur chaque RCP et fournis pour chaque indicateur et chaque période dans les Tableau D-1 et Tableau D-2.

Tableau C-5. Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour la neige au sol.

Identification des données sources	<ul style="list-style-type: none"> • Simulations climatiques régionales CORDEX pour le domaine Amérique du Nord (NA). • Simulations climatiques régionales additionnelles produites par Ouranos respectant le protocole CORDEX-NA • Observations brutes de la station météorologique d'ECCC (section B.1.1) de l'aéroport Trudeau, fournies en m à une fréquence quotidienne (code de station 7025250). Elles ont servi à évaluer la performance des simulations climatiques régionales sur la période historique.
Sélection des données	Variable <i>snd</i> l'épaisseur de neige au sol, archivée à une fréquence de 3 heures ou quotidienne, de 1950 à 2100 provenant de 11 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et 9 basées sur RCP8.5 (Tableau B-1).
Découpage spatio-temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Selon la résolution spatiale et la projection cartographique de la grille de chaque simulation climatique régionale, extraction du point de grille – ou des 2 points- couvrant en tout en partie chacun des sites représentés par la zone orange de la Figure 3-2a pour le Port de Montréal et de la Figure 3-2b pour le terminal de Contrecoeur. • Pour les simulations dont les données n'étaient pas déjà à une fréquence quotidienne, les valeurs ont été obtenues en effectuant les moyennes quotidiennes de l'épaisseur de neige au sol archivées aux 3h.
Transfert de grille / interpolation	Aucun traitement sur la simulation climatique régionale si un seul point de grille a été extrait pour le site. Sinon, on effectue une moyenne pondérée entre les 2 points de grille, au prorata de leur couverture du site.
Post-traitement	Aucun post-traitement en raison d'enjeux de fiabilité des sources de données d'observations ou de réanalyses pouvant servir de référence et de leur trop grande disparité les unes par rapport aux autres.
Calcul d'indicateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum annuel de <i>snd</i> ajusté selon une distribution GEV (<i>Generalized Extreme Value</i>) permettant de calculer la valeur attendue pour une période de retour 1 fois en 50 ans. Ce calcul a été effectué à l'aide de la fonction <i>frequency_analysis</i> de la programmation xclim V0.18 (DOI : 10.5281/zenodo.5080548) • Calcul des moyennes climatiques sur les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100.
Statistiques d'ensemble	Pour chaque indicateur, moyenne, minimum et maximum de chacun des ensembles formés par les moyennes climatiques de chacun des scénarios basés respectivement sur RCP4.5 et RCP8.5.
Visualisation	Moyenne et intervalle défini par le minimum et le maximum de l'ensemble [format : moy (min – max)] basé sur chaque RCP et fournis pour chaque indicateur et chaque période dans les Tableau D-1 et Tableau D-2.

Tableau C-6. Fiche technique des étapes du processus de scénarisation climatique pour la vitesse du vent à la hauteur de l'anémomètre.

Identification des données sources	<ul style="list-style-type: none"> • Simulations climatiques régionales CORDEX pour le domaine Amérique du Nord (NA). • Simulations climatiques régionales additionnelles produites par Ouranos respectant le protocole CORDEX-NA. • Réanalyses ERA5-Land pour la création d'un proxy de données de référence pour le post-traitement (section B.2). • Observations de la vitesse du vent aux stations de l'Administration portuaire de Montréal pour la création d'un proxy de données de référence pour le post-traitement (section B.1.3).
Sélection des données	<ul style="list-style-type: none"> • Variable <i>sfcWindmax</i> qui représente le maximum quotidien du vent à 10 m provenant de 9 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et de 9 basées sur RCP8.5 (Tableau B-1) • Variables <i>uas</i> et <i>vas</i> qui représentent respectivement les composantes est et nord du vent à 10m d'ERA5-Land à une fréquence horaire. • Vitesse du vent aux stations de l'Administration portuaire de Montréal archivées la fréquence d'une minute.
Découpage spatio-temporel	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction des points de grille les plus proches des stations d'observation nommées « Quai M-3 », « Quai 42 », « Quai 55 », et « Terminal Cast » et « Contrecoeur » de l'Administration portuaire de Montréal pour : <ul style="list-style-type: none"> ○ Les données des 9 simulations climatiques régionales basées sur RCP4.5 et les 9 simulations basées RCP8.5. ○ Les données ERA2-Land • Obtenir <i>sfcWindmax</i> quotidien pour ERA5-Land à partir des données horaires des composantes est et nord du vent • Obtenir <i>sfcWindmax</i> quotidien à partir des données à la minute de la vitesse du vent pour les stations de l'Administration portuaire de Montréal.
Transfert de grille / interpolation	Aucun traitement requis.
Post-traitement	<ul style="list-style-type: none"> • Création d'un proxy sur la période 1981-2010 à l'échelle des sites « Quai M-3 », « Quai 42 », « Quai 55 », et « Terminal Cast » et « Contrecoeur » à partir des observations de l'Administration portuaire de Montréal et des données ERA5-Land (voir section C.1.4. La technique par proxy) • Ajustement des biais à l'échelle des sites « Quai M-3 », « Quai 42 », « Quai 55 », et « Terminal Cast » et « Contrecoeur » pour toutes les simulations climatiques régionales sélectionnées. L'ajustement se fait par rapport au proxy selon la technique du <i>Quantile Mapping</i> avec fenêtre mobile (voir section C.1.2. La technique du Quantile Mapping). Chaque jour de l'année possède sa propre fonction d'ajustement appliquée à <i>sfcWindmax</i> en mode multiplicatif.
Calcul d'indicateurs	<p>Pour tous les scénarios et pour les sites « Quai M-3 », « Terminal Cast » et « Contrecoeur » (voir section B.1.3 de l'Annexe B et section 3.3.4)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nombre de jours où la vitesse maximale quotidienne des vents se situe : <ul style="list-style-type: none"> ○ Entre]50 ; 62] km/h (force 7) ○ Entre]62 ; 75] km/h (force 8) ○ Entre]75 ; 89] km/h (force 9) • Calcul des moyennes climatiques sur les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100.
Statistiques d'ensemble	Pour chaque indicateur, moyenne, minimum et maximum de chacun des ensembles formés par les moyennes climatiques de chacun des scénarios basés respectivement sur RCP4.5 et RCP8.5.
Visualisation	Moyenne et intervalle défini par le minimum et le maximum de l'ensemble [format : moy (min – max)] basé sur chaque RCP et fournis pour chaque indicateur et chaque période dans les Tableau D-1 et Tableau D-2 pour les sites « Quai M-3 », « Terminal Cast » et « Contrecoeur ».

ANNEXE D

SCENARIOS PORTS MONTRÉAL ET CONTRECOEUR

Tableau D-1. Port de Montréal

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Température							
Fréq. Tmin<-25°C	Jours	Déc	0.7 (0.5 - 1.1)	0.1 (0.0 - 0.3)	0.0 (0.0 - 0.2)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.0)
Fréq. Tmin<-25°C	Jours	Jan	3.0 (2.8 - 3.2)	0.7 (0.2 - 1.5)	0.5 (0.1 - 1.2)	0.4 (0.1 - 0.9)	0.1 (0.0 - 0.3)
Fréq. Tmin<-25°C	Jours	Fév	1.0 (0.8 - 1.2)	0.2 (0.0 - 0.7)	0.2 (0.0 - 0.6)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.0)
Fréq. Tmax>35°C	Jours	Mai	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.4 (0.0 - 0.9)
Fréq. Tmax>35°C	Jours	Juin	0.0 (0.0 - 0.1)	0.2 (0.0 - 0.6)	0.4 (0.1 - 0.8)	0.3 (0.2 - 0.6)	1.6 (0.3 - 3.2)
Fréq. Tmax>35°C	Jours	Juillet	0.0 (0.0 - 0.1)	0.4 (0.1 - 0.8)	0.7 (0.2 - 1.4)	0.8 (0.1 - 1.7)	2.9 (0.8 - 5.2)
Fréq. Tmax>35°C	Jours	Août	0.0 (0.0 - 0.0)	0.2 (0.0 - 1.0)	0.5 (0.0 - 1.3)	0.4 (0.0 - 1.2)	2.2 (0.3 - 5.4)
Fréq. Tmax>35°C	Jours	Sept	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.1 (0.0 - 0.3)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.5 (0.0 - 1.4)
Fréq. Vague de chaleur		Annuelle	0.1 (0.0 - 0.2)	0.7 (0.3 - 1.1)	1.2 (0.4 - 2.2)	0.9 (0.3 - 1.5)	3.4 (1.6 - 6.3)
Durée totale Vague de chaleur	Jours	Annuelle	0.2 (0.0 - 0.7)	2.7 (0.9 - 4.4)	5.1 (1.7 - 9.8)	3.6 (1.0 - 6.3)	18.7 (7.6 - 37.3)
Durée maximale Vague de chaleur	Jours	Annuelle	0.2 (0.0 - 0.5)	2.1 (0.8 - 3.5)	2.9 (1.1 - 4.5)	2.4 (0.9 - 3.6)	8.0 (4.2 - 13.0)
Durée Saison de gel	Jours	Annuelle	144.5 (132.4 - 150.5)	127.1 (119.7 - 138.5)	113.6 (87.4 - 126.1)	119.8 (106.1 - 140.2)	91.8 (38.2 - 116.4)
Début Saison de gel	Jour au calendrier	Annuelle	321.4 (317.1 - 325.9)	330.3 (325.0 - 334.6)	334.0 (324.9 - 340.1)	332.2 (321.7 - 339.3)	341.2 (329.7 - 356.9)
Fin Saison de gel	Jour au calendrier	Annuelle	101.0 (91.4 - 106.2)	92.2 (86.7 - 98.3)	82.9 (64.6 - 90.6)	86.9 (77.0 - 96.7)	70.5 (44.1 - 81.7)
Cycle Gel/dégel	Jours	Annuelle	69.4 (65.2 - 72.5)	64.5 (58.2 - 72.9)	62.6 (53.8 - 73.0)	63.7 (58.5 - 74.6)	58.8 (47.4 - 76.2)
Amplitude thermique diurne- moyenne	°C	DJF	8.5 (8.4 - 8.6)	7.6 (6.8 - 8.1)	7.2 (6.4 - 8.0)	7.3 (6.5 - 8.0)	6.4 (4.6 - 7.9)

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Amplitude thermique diurne- moyenne	°C	JJA	8.6 (8.6 - 8.7)	8.7 (8.4 - 9.1)	8.8 (8.3 - 9.2)	8.8 (8.4 - 9.1)	8.8 (8.2 - 9.3)
Amplitude thermique diurne- moyenne	°C	MAM	9.8 (9.8 - 9.8)	9.6 (9.4 - 9.9)	9.4 (9.0 - 9.9)	9.6 (9.4 - 10.0)	9.1 (8.5 - 9.6)
Amplitude thermique diurne- moyenne	°C	SON	7.0 (7.0 - 7.1)	7.0 (6.7 - 7.7)	7.0 (6.5 - 7.6)	7.1 (6.7 - 8.0)	6.9 (6.5 - 7.7)
Amplitude thermique diurne- maximale	°C	DJF	20.3 (18.6 - 21.9)	17.9 (16.2 - 19.5)	17.6 (15.4 - 19.8)	17.8 (15.7 - 19.5)	15.9 (13.2 - 17.8)
Amplitude thermique diurne- maximale	°C	JJA	15.2 (14.0 - 16.0)	15.3 (14.1 - 15.9)	15.4 (14.0 - 16.7)	15.2 (14.0 - 16.2)	15.3 (13.8 - 16.6)
Amplitude thermique diurne- maximale	°C	MAM	19.3 (18.3 - 20.6)	18.6 (17.5 - 19.4)	18.7 (17.0 - 20.0)	18.5 (17.0 - 19.6)	18.2 (16.7 - 20.1)
Amplitude thermique diurne- maximale	°C	SON	14.7 (13.7 - 15.8)	14.6 (13.5 - 16.2)	14.6 (13.7 - 15.7)	14.6 (13.6 - 16.1)	14.5 (13.0 - 15.8)
Fréq. Vague de froid (-23°C, 3 jours)		Annuelle	0.7 (0.4 - 1.0)	0.1 (0.0 - 0.3)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.0)
Fréq. Vague de froid (-23°C, 6 jours)		Annuelle	0.0 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)
Fréq. Vague de froid (-20°C, 3 jours)		Annuelle	1.7 (1.3 - 2.2)	0.5 (0.2 - 1.2)	0.3 (0.0 - 0.5)	0.3 (0.1 - 0.6)	0.0 (0.0 - 0.1)
Fréq. Vague de froid (-20°C, 6 jours)		Annuelle	0.2 (0.1 - 0.5)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.0)
Durée Vague de froid (-23°C, 3 jours)	Jours	Annuelle	2.5 (1.5 - 4.3)	0.4 (0.1 - 0.9)	0.2 (0.0 - 0.7)	0.2 (0.0 - 0.6)	0.0 (0.0 - 0.0)
Durée Vague de froid (-23°C, 6 jours)	Jours	Annuelle	0.3 (0.0 - 1.3)	0.0 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)
Durée Vague de froid (-20°C, 3 jours)	Jours	Annuelle	6.7 (5.1 - 10.0)	1.9 (0.5 - 4.2)	1.0 (0.1 - 2.0)	1.0 (0.3 - 2.1)	0.1 (0.0 - 0.4)
Durée Vague de froid (-20°C, 6 jours)	Jours	Annuelle	1.5 (0.6 - 3.6)	0.3 (0.0 - 0.9)	0.1 (0.0 - 0.7)	0.1 (0.0 - 1.1)	0.0 (0.0 - 0.0)
Précipitation totale							
Précipitation totale moyenne	Mm	DJF	227.3 (219.9 - 235.9)	245.1 (217.7 - 275.4)	264.1 (238.2 - 313.6)	260.0 (244.5 - 286.7)	282.1 (254.3 - 324.4)
Précipitation totale moyenne	Mm	JJA	305.9 (299.0 - 312.1)	308.4 (283.8 - 341.7)	309.7 (273.3 - 366.0)	305.9 (273.4 - 330.4)	317.2 (264.7 - 396.4)
Précipitation totale moyenne	Mm	MAM	271.5 (266.8 - 273.7)	284.9 (254.5 - 340.8)	302.7 (279.9 - 332.0)	305.6 (284.4 - 347.0)	320.5 (273.2 - 383.1)

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Précipitation totale moyenne	Mm	SON	307.3 (289.9 - 316.8)	320.2 (289.4 - 346.8)	323.1 (278.0 - 367.6)	318.1 (276.9 - 364.1)	330.7 (297.8 - 364.3)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	DJF	17.3 (16.9 - 17.8)	18.4 (16.7 - 20.0)	18.9 (17.8 - 20.7)	18.6 (17.9 - 19.7)	19.6 (18.1 - 21.6)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	JJA	18.5 (17.7 - 19.7)	19.4 (17.8 - 21.7)	19.5 (17.7 - 22.6)	19.8 (17.9 - 23.2)	19.8 (17.4 - 25.1)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	MAM	17.2 (16.5 - 18.6)	18.4 (17.6 - 20.2)	18.5 (17.2 - 19.2)	18.5 (17.7 - 19.6)	19.3 (17.9 - 20.6)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	SON	19.7 (18.9 - 20.3)	20.2 (18.9 - 21.7)	21.0 (19.5 - 22.5)	20.7 (19.4 - 22.4)	21.5 (20.0 - 23.2)
Maximum de précip. Quotidienne	mm/jour	Annuelle	47.4 (43.1 - 54.0)	52.1 (47.8 - 58.8)	53.8 (47.4 - 63.2)	54.2 (47.6 - 64.4)	57.7 (50.9 - 79.7)
Maximum de jours consécutifs secs	Jours	DJF	9.6 (8.8 - 10.4)	10.1 (8.5 - 11.1)	9.4 (8.3 - 11.4)	9.3 (8.5 - 10.0)	9.4 (8.3 - 10.6)
Maximum de jours consécutifs secs	Jours	JJA	8.6 (7.4 - 11.2)	8.8 (7.9 - 9.3)	9.1 (7.5 - 11.4)	8.9 (7.9 - 10.1)	9.3 (7.5 - 11.9)
Maximum de jours consécutifs secs	Jours	MAM	10.2 (9.1 - 12.1)	10.1 (9.1 - 11.2)	9.9 (8.4 - 11.0)	10.3 (9.5 - 11.6)	9.7 (8.3 - 10.4)
Maximum de jours consécutifs secs	Jours	SON	9.4 (8.3 - 12.1)	9.3 (8.0 - 11.6)	9.7 (8.5 - 11.1)	9.6 (7.7 - 12.5)	10.1 (8.2 - 13.1)
Précipitation neigeuse et neige au sol							
Nombre de chutes de neige > 25 cm	Chutes de neige	Hiver	0,5 (0,0-0,9)	0,4 (0,0-0,8)	0,4 (0,0-0,9)	0,5 (0,0-1,3)	0,2 (0,0-0,7)
Accumulation de la neige au sol 1/50 ans	Cm	Hiver	67,5 (24,1-97,6)	62,1 (12,9-100,0)	61,7 (10,9-105,6)	69,8 (18,0-128,6)	43,5 (10,9-73,8)
Verglas							
Nombre d'épisodes courts	Épisodes	Annuelle	5,6 (4,9 - 6,5)	4,7 (4,2 - 5,0)	4,4 (3,5 - 5,5)	4,9 (3,6 - 6,5)	3,3 (2,2 - 4,7)
Nombre d'épisodes longs	Épisodes	Annuelle	2,2 (1,8 - 2,8)	1,5 (1,2 - 1,9)	1,3 (0,8 - 2,2)	1,7 (1,1 - 1,9)	0,8 (0,5 - 1,3)

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Quantité de verglas lors des épisodes longs	Mm	Annuelle	14,0 (10,6 - 18,7)	7,4 (5,1 - 10,4)	7,5 (5,1 - 14,6)	9,0 (6,3 - 11,7)	4,4 (1,7 - 8,4)
Nombre d'épisodes de verglas >= 10 mm	Épisodes	Annuelle	0,5 (0,3 - 0,7)	0,2 (0,1 - 0,3)	0,2 (0,1 - 0,5)	0,3 (0,1 - 0,5)	0,2 (0,07 - 0,3)
Nombre d'épisodes de verglas >= 15 mm	Épisodes	Annuelle	0,2 (0,1 - 0,2)	0,07 (0,03 - 0,13)	0,08 (0 - 0,3)	0,1 (0,03 - 0,2)	0,06 (0 - 0,17)
Nombre d'épisodes de verglas >= 20 mm	Épisodes	Annuelle	0,08 (0,02 - 0,2)	0,02 (0 - 0,7)	0,03 (0 - 0,7)	0,02 (0 - 0,03)	0,02 (0 - 0,07)
Nombre d'épisodes de verglas >= 25 mm	Épisodes	Annuelle	0,04 (0 - 0,1)	0,02 (0 - 0,07)	0,02 (0 - 0,07)	0,01 (0 - 0,03)	0,01 (0 - 0,07)
Nombre d'heures d'occurrence de verglas	Heures	Annuelle	50,8 (44,7 - 56,9)	36,4 (30,7 - 42,5)	34,0 (25,7 - 49,0)	38,7 (26,6 - 49,3)	22,2 (14,6 - 33,8)
Nombre d'épisodes totaux de verglas	Épisodes	Annuelle	7,9 (7,0 - 8,6)	6,1 (5,4 - 6,9)	5,8 (4,5 - 7,3)	6,5 (4,7 - 8,4)	4,1 (2,8 - 6,0)
Vent							
Fréq. des vents de Force 7 (50 à 62 km/h)	Jours	Annuelle	Quai M-3 : 0,53 (0,20 - 0,83) Terminal Cast : 0,99 (0,73 - 1,3)	Quai M-3 : 0,50 (0,20 - 0,77) Terminal Cast : 1,0 (0,80 - 1,6)	Quai M-3 : 0,57 (0,30 - 0,83) Terminal Cast : 1,2 (0,70 - 1,6)	Quai M-3 : 0,51 (0,30 - 0,63); Terminal Cast : 1,0 (0,37 - 1,5)	Quai M-3 : 0,46 (0,30 - 0,93); Terminal Cast : 1,1 (0,63 - 1,3)
Fréq. des vents de Force 8 (62 à 75 km/h)	Jours	Annuelle	Quai M-3 : 0,12 (0 - 0,20) Terminal Cast : 0,04 (0 - 0,23)	Quai M-3 : 0,10 (0 - 0,27) Terminal Cast : 0,05 (0 - 0,10)	Quai M-3 : 0,09 (0 - 0,30) Terminal Cast : 0,08 (0 - 0,27)	Quai M-3 : 0,12 (0 - 0,33); Terminal Cast : 0,02 (0 - 0,03)	Quai M-3 : 0,13 (0 - 0,30); Terminal Cast : 0,09 (0 - 0,27)
Fréq. des vents de Force 9 (75 à 89 km/h)	Jours	Annuelle	Quai M-3 : 0 (0 - 0,03) Terminal Cast : 0 (0 - 0)	Quai M-3 : 0 (0 - 0,03) Terminal Cast : 0 (0 - 0)	Quai M-3 : 0,01 (0 - 0,03) Terminal Cast : 0 (0 - 0,03)	Quai M-3 : 0 (0 - 0,03); Terminal Cast : 0 (0 - 0)	Quai M-3 : 0,01 (0 - 0,03); Terminal Cast : 0,01 (0 - 0,03)

Tableau D-2. Terminal de Contrecœur

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Température							
Fréq. Tmin<-25°C	jours	Déc	1.1 (0.8 - 1.5)	0.2 (0.0 - 0.6)	0.1 (0.0 - 0.4)	0.2 (0.0 - 0.4)	0.0 (0.0 - 0.1)
Fréq. Tmin<-25°C	jours	Jan	3.8 (3.6 - 4.2)	1.2 (0.3 - 2.1)	0.8 (0.2 - 1.9)	0.7 (0.2 - 1.5)	0.1 (0.0 - 0.7)
Fréq. Tmin<-25°C	jours	Fév	1.4 (1.2 - 1.7)	0.4 (0.0 - 0.9)	0.2 (0.0 - 0.6)	0.1 (0.0 - 0.4)	0.0 (0.0 - 0.1)
Fréq. Tmax>35°C	jours	Mai	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.3 (0.1 - 0.8)
Fréq. Tmax>35°C	jours	Juin	0.0 (0.0 - 0.0)	0.1 (0.0 - 0.5)	0.4 (0.1 - 0.7)	0.3 (0.2 - 0.4)	1.5 (0.2 - 3.0)
Fréq. Tmax>35°C	jours	Juil	0.0 (0.0 - 0.1)	0.4 (0.2 - 0.8)	0.6 (0.2 - 1.2)	0.7 (0.1 - 1.5)	2.7 (0.8 - 4.6)
Fréq. Tmax>35°C	jours	Aout	0.0 (0.0 - 0.0)	0.2 (0.0 - 0.8)	0.5 (0.0 - 1.1)	0.3 (0.0 - 1.2)	2.1 (0.2 - 5.1)
Fréq. Tmax>35°C	jours	Sept	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.1 (0.0 - 0.3)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.5 (0.0 - 1.4)
Fréq. Vague de chaleur		Annuelle	0.0 (0.0 - 0.1)	0.4 (0.2 - 0.8)	0.8 (0.4 - 1.4)	0.6 (0.2 - 1.1)	2.7 (1.3 - 5.2)
Durée totale Vague de chaleur	jours	Annuelle	0.1 (0.0 - 0.4)	1.6 (0.8 - 2.9)	3.2 (1.4 - 5.6)	2.2 (0.7 - 4.4)	13.8 (5.8 - 27.9)
Durée maximale Vague de chaleur	jours	Annuelle	0.1 (0.0 - 0.3)	1.4 (0.7 - 2.3)	2.1 (1.0 - 3.5)	1.7 (0.6 - 3.0)	6.2 (3.5 - 9.8)
Durée Saison de gel	jours	Annuelle	152.6 (139.8 - 157.9)	135.3 (127.3 - 143.9)	122.0 (94.3 - 139.3)	128.8 (115.2 - 147.5)	100.8 (57.6 - 125.3)
Début Saison de gel		Annuelle	316.8 (311.1 - 322.2)	324.7 (320.4 - 328.2)	328.4 (319.1 - 335.0)	327.6 (319.2 - 337.2)	325.4 (261.8 - 342.9)
Fin Saison de gel		Annuelle	104.5 (93.3 - 108.8)	94.9 (89.8 - 101.1)	86.4 (67.9 - 94.0)	91.3 (82.4 - 101.4)	74.1 (53.5 - 85.9)
Cycle Gel/dégel	jours	Annuelle	74.6 (70.2 - 77.9)	69.0 (64.9 - 77.7)	66.7 (58.5 - 76.4)	67.9 (62.5 - 78.3)	63.3 (52.1 - 81.3)
Amplitude thermique diurne-moyenne	°C	DJF	9.0 (8.9 - 9.1)	8.0 (7.0 - 8.6)	7.7 (7.0 - 8.3)	7.8 (6.7 - 8.4)	6.8 (5.1 - 8.2)
Amplitude thermique diurne-moyenne	°C	JJA	9.2 (9.2 - 9.3)	9.4 (9.0 - 9.7)	9.4 (8.9 - 9.8)	9.4 (9.0 - 9.8)	9.4 (8.8 - 9.9)
Amplitude thermique diurne-moyenne	°C	MAM	10.1 (10.1 - 10.2)	9.9 (9.8 - 10.2)	9.7 (9.2 - 10.1)	9.9 (9.7 - 10.3)	9.4 (8.7 - 9.9)
Amplitude thermique diurne-moyenne	°C	SON	7.7 (7.6 - 7.7)	7.6 (7.3 - 8.3)	7.6 (7.2 - 8.2)	7.7 (7.4 - 8.6)	7.5 (7.0 - 8.4)
Amplitude thermique diurne-maximale	°C	DJF	20.9 (19.1 - 22.7)	18.5 (16.5 - 20.5)	18.3 (15.8 - 20.7)	18.4 (16.5 - 19.8)	16.5 (14.1 - 18.7)
Amplitude thermique diurne-maximale	°C	JJA	16.1 (14.6 - 17.0)	16.2 (14.7 - 17.0)	16.4 (14.7 - 18.1)	16.3 (14.7 - 17.3)	16.3 (14.5 - 17.6)
Amplitude thermique diurne-maximale	°C	MAM	19.9 (18.8 - 20.8)	19.0 (17.9 - 19.7)	19.0 (17.1 - 20.0)	19.0 (17.4 - 20.0)	18.6 (16.9 - 20.0)
Amplitude thermique diurne-maximale	°C	SON	15.7 (14.4 - 16.7)	15.5 (14.3 - 17.1)	15.5 (14.2 - 16.5)	15.5 (14.1 - 17.1)	15.4 (13.7 - 17.1)
Fréq. Vague de froid (-23°C, 3 jours)		Annuelle	1.0 (0.7 - 1.4)	0.2 (0.1 - 0.6)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.1 (0.0 - 0.3)	0.0 (0.0 - 0.1)

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Fréq. Vague de froid (-23°C, 6 jours)		Annuelle	0.1 (0.0 - 0.3)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.0)
Fréq. Vague de froid (-20°C, 3 jours)		Annuelle	2.2 (1.8 - 2.8)	0.7 (0.3 - 1.5)	0.4 (0.1 - 0.8)	0.5 (0.1 - 1.0)	0.1 (0.0 - 0.4)
Fréq. Vague de froid (-20°C, 6 jours)		Annuelle	0.3 (0.2 - 0.7)	0.1 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.2)	0.0 (0.0 - 0.1)	0.0 (0.0 - 0.0)
Durée Vague de froid (-23°C, 3 jours)	jours	Annuelle	3.9 (2.7 - 6.2)	0.8 (0.3 - 2.1)	0.4 (0.0 - 0.9)	0.4 (0.1 - 1.2)	0.0 (0.0 - 0.2)
Durée Vague de froid (-23°C, 6 jours)	jours	Annuelle	0.6 (0.2 - 1.9)	0.0 (0.0 - 0.3)	0.0 (0.0 - 0.0)	0.1 (0.0 - 0.4)	0.0 (0.0 - 0.0)
Durée Vague de froid (-20°C, 3 jours)	jours	Annuelle	9.1 (6.9 - 13.3)	2.8 (1.0 - 5.5)	1.6 (0.3 - 3.5)	1.7 (0.7 - 3.6)	0.2 (0.0 - 1.2)
Durée Vague de froid (-20°C, 6 jours)	jours	Annuelle	2.3 (1.0 - 5.7)	0.4 (0.0 - 1.1)	0.3 (0.0 - 1.5)	0.2 (0.0 - 1.1)	0.0 (0.0 - 0.0)
Précipitation totale							
Précipitation totale moyenne	mm	DJF	227.1 (219.5 - 234.9)	244.4 (217.9 - 272.8)	264.7 (236.9 - 319.4)	260.5 (240.8 - 288.6)	282.7 (253.1 - 328.2)
Précipitation totale moyenne	mm	JJA	298.2 (291.1 - 305.2)	301.3 (272.4 - 332.9)	303.8 (268.6 - 364.1)	300.5 (276.2 - 325.2)	311.5 (260.1 - 401.2)
Précipitation totale moyenne	mm	MAM	266.2 (260.8 - 271.3)	280.0 (255.3 - 329.0)	296.9 (278.9 - 324.4)	302.6 (276.8 - 342.7)	317.6 (272.6 - 375.2)
Précipitation totale moyenne	mm	SON	301.7 (287.3 - 308.2)	317.3 (295.2 - 346.2)	318.8 (271.8 - 364.6)	313.9 (274.4 - 358.7)	324.8 (293.9 - 362.5)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	DJF	17.5 (16.8 - 18.2)	18.3 (17.2 - 20.1)	19.1 (17.6 - 21.2)	18.8 (18.1 - 20.0)	19.9 (18.1 - 22.0)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	JJA	18.8 (18.2 - 20.2)	19.6 (17.8 - 22.1)	19.5 (18.0 - 22.3)	19.9 (18.1 - 22.9)	19.6 (16.9 - 24.8)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	MAM	17.2 (16.5 - 18.6)	18.1 (17.2 - 19.5)	18.4 (17.2 - 19.6)	18.5 (17.6 - 20.4)	19.2 (18.1 - 20.1)
Intensité des précip. quotidiennes > 10 mm	mm/jour	SON	19.7 (19.0 - 20.3)	20.2 (19.0 - 21.4)	21.0 (19.8 - 22.8)	20.6 (19.8 - 22.2)	21.4 (20.2 - 22.5)
Maximum de précip. quotidienne	mm/jour	Annuelle	46.9 (42.9 - 52.6)	51.3 (46.0 - 61.9)	52.8 (47.0 - 59.5)	53.3 (45.7 - 67.8)	57.0 (50.3 - 73.7)
Maximum de jours consécutifs secs	jours	DJF	9.7 (8.7 - 10.4)	10.3 (8.6 - 12.2)	9.6 (8.3 - 11.5)	9.4 (8.7 - 10.3)	9.6 (8.7 - 11.4)
Maximum de jours consécutifs secs	jours	JJA	8.8 (7.6 - 10.8)	8.8 (7.7 - 9.6)	9.1 (7.5 - 10.7)	9.0 (7.9 - 10.2)	9.2 (7.0 - 12.1)
Maximum de jours consécutifs secs	jours	MAM	10.2 (9.4 - 11.7)	10.1 (9.1 - 11.6)	9.9 (8.3 - 11.1)	10.5 (9.5 - 11.5)	9.6 (8.6 - 10.6)

Variable/indicateur	Unité	Échelle temporelle	Période 1981-2010	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
			Données modèles	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Maximum de jours consécutifs secs	jours	SON	9.5 (8.1 - 12.4)	9.5 (8.2 - 12.0)	9.9 (8.4 - 11.4)	9.7 (8.2 - 12.6)	10.2 (8.1 - 12.7)
Précipitation neigeuse et neige au sol							
Nombre de chutes de neige > 25 cm	Chutes de neige	Hiver	0,5 (0,0-0,9)	0,4 (0,0-0,8)	0,4 (0,0-0,9)	0,5 (0,0-1,2)	0,3 (0,0-0,7)
Accumulation de la neige au sol 1/50 ans	cm	Hiver	70,1 (24,1-102,0)	63,6 (12,9-103,7)	63,5 (10,9-105,1)	70,6 (18,0-139,8)	44,1 (10,9-75,1)
Verglas							
Nombre d'épisodes courts	Épisodes	Annuelle	5,7 (5,0 - 6,6)	5,0 (4,7 - 5,3)	4,9 (4,1 - 5,6)	5,5 (4,6 - 6,8)	4,0 (2,7 - 5,5)
Nombre d'épisodes longs	Épisodes	Annuelle	2,4 (2,0 - 3,0)	1,6 (1,3 - 2,2)	1,6 (1,1 - 2,3)	1,7 (1,4 - 1,9)	1,0 (0,5 - 1,6)
Quantité de verglas lors des épisodes longs	mm	Annuelle	14,3 (9,9 - 18,1)	8,0 (6,1 - 11,5)	8,4 (5,5 - 14,7)	9,8 (6,8 - 13,4)	5,6 (2,4 - 9,5)
Nombre d'épisodes de verglas >= 10 mm	Épisodes	Annuelle	0,5 (0,2 - 0,6)	0,2 (0,1 - 0,3)	0,3 (0,05 - 0,6)	0,4 (0,1 - 0,6)	0,2 (0,05 - 0,3)
Nombre d'épisodes de verglas >= 15 mm	Épisodes	Annuelle	0,2 (0,05 - 0,3)	0,07 (0 - 0,1)	0,09 (0 - 0,3)	0,1 (0,03 - 0,2)	0,09 (0 - 0,2)
Nombre d'épisodes de verglas >= 20 mm	Épisodes	Annuelle	0,08 (0,006 - 0,2)	0,02 (0 - 0,07)	0,04 (0 - 0,1)	0,05 (0 - 0,11)	0,02 (0 - 0,09)
Nombre d'épisodes de verglas >= 25 mm	Épisodes	Annuelle	0,03 (0 - 0,08)	0,01 (0 - 0,03)	0,02 (0 - 0,05)	0,02 (0 - 0,05)	0,004 (0 - 0,03)
Nombre d'heures d'occurrence de verglas	Heures	Annuelle	52,1 (44,4 - 59,3)	39,4 (35,6 - 46,4)	38,2 (30,0 - 50,9)	42,1 (34,0 - 51,8)	27,1 (18,8 - 38,0)
Nombre d'épisodes totaux de verglas	Épisodes	Annuelle	8,1 (7,1 - 9,1)	6,7 (6,1 - 7,4)	6,5 (5,4 - 7,9)	7,1 (6,1 - 8,7)	5,0 (3,5 - 6,9)
Vent							
Fréq. des vents de Force 7 (50 à 62 km/h)	Jours	Annuelle	13,3 (12,4 - 13,9)	12,8 (10,8 - 15,5)	14,1 (12,0 - 16,4)	13,1 (11,5 - 15,9)	13,2 (11,6 - 14,9)
Fréq. des vents de Force 8 (62 à 75 km/h)	Jours	Annuelle	2,0 (1,6 - 2,5)	2,1 (1,5 - 2,8)	2,2 (1,5 - 3,0)	2,0 (1,5 - 2,6)	2,4 (1,9 - 2,9)
Fréq. des vents de Force 9 (75 à 89 km/h)	Jours	Annuelle	0,35 (0,07 - 0,80)	0,45 (0,13 - 0,80)	0,45 (0,13 - 0,77)	0,57 (0,10 - 1,1)	0,55 (0,17 - 1,5)

ANNEXE E

ÉVOLUTION ANNUELLE DES INDICATEURS CLIMATIQUES ENTRE 1980 ET 2100 POUR LE SITE DU PORT DE MONTRÉAL

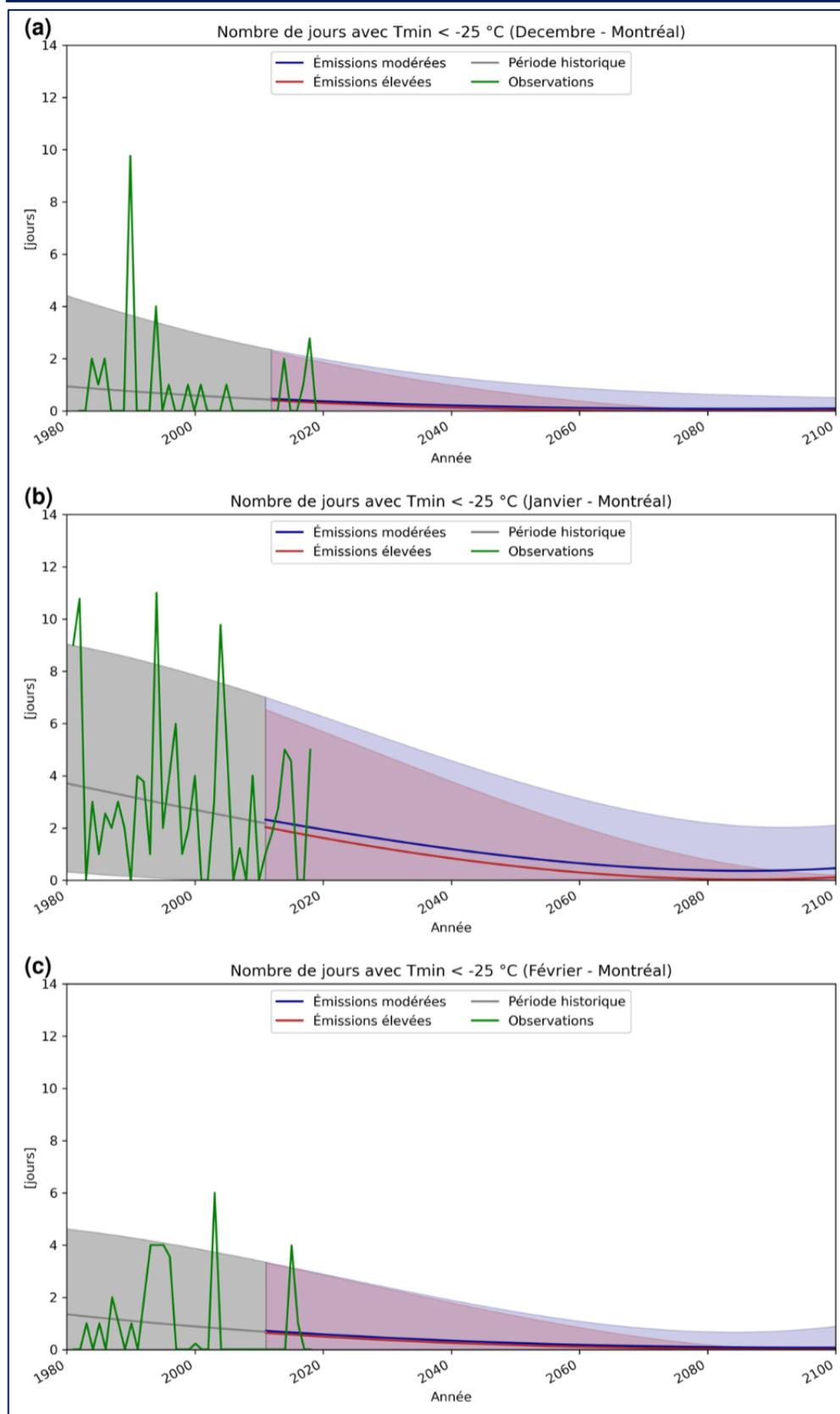


Figure E-1. Évolution annuelle du nombre de jours ayant des températures journalières minimales inférieures à 25°C au site du port de Montréal en (a) décembre, (b) janvier et (c) février

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

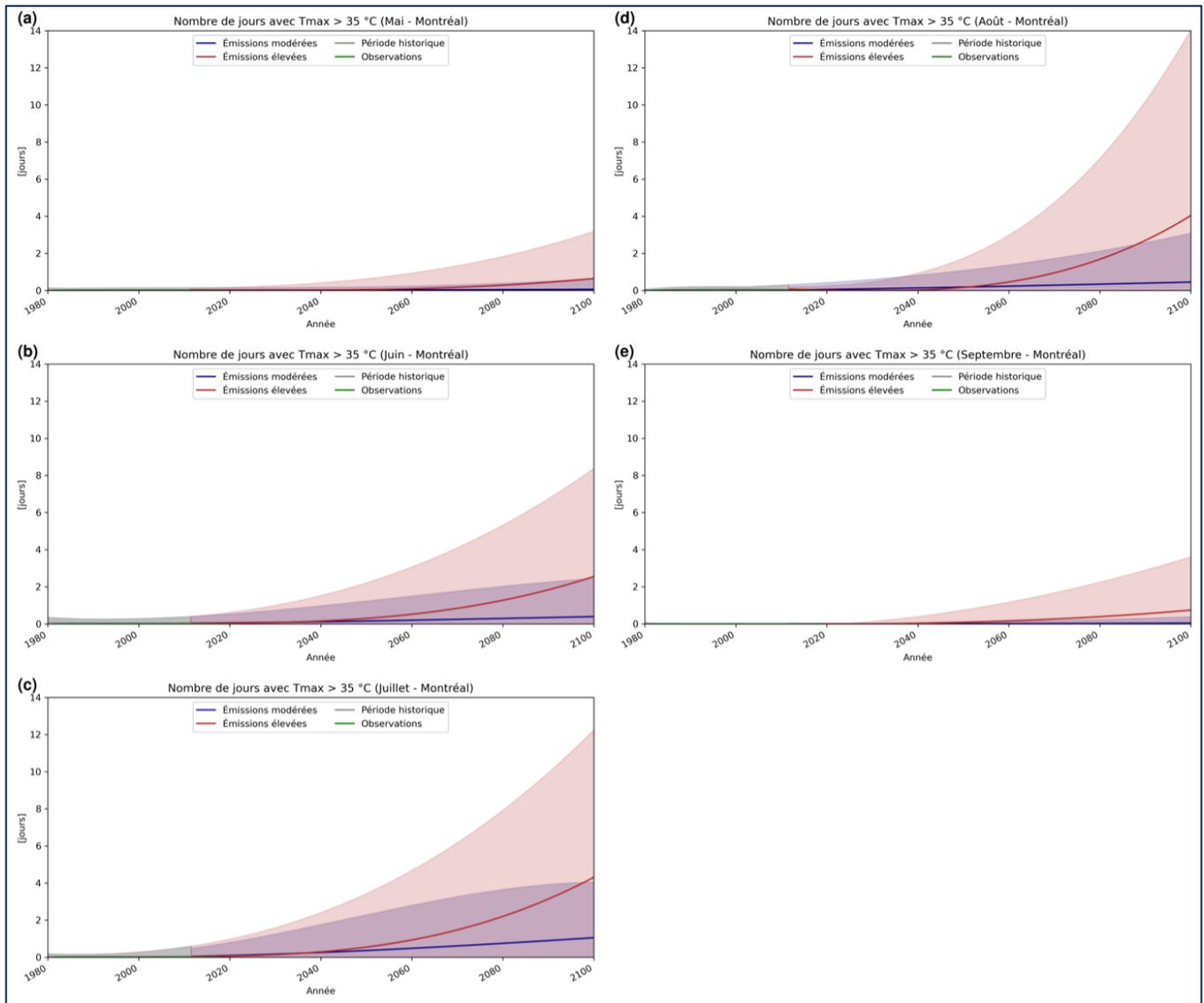


Figure E-2. Évolution du nombre de jours avec des températures maximales supérieures à 35°C pour les mois de (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août et (e) septembre pour le site du port de Montréal. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

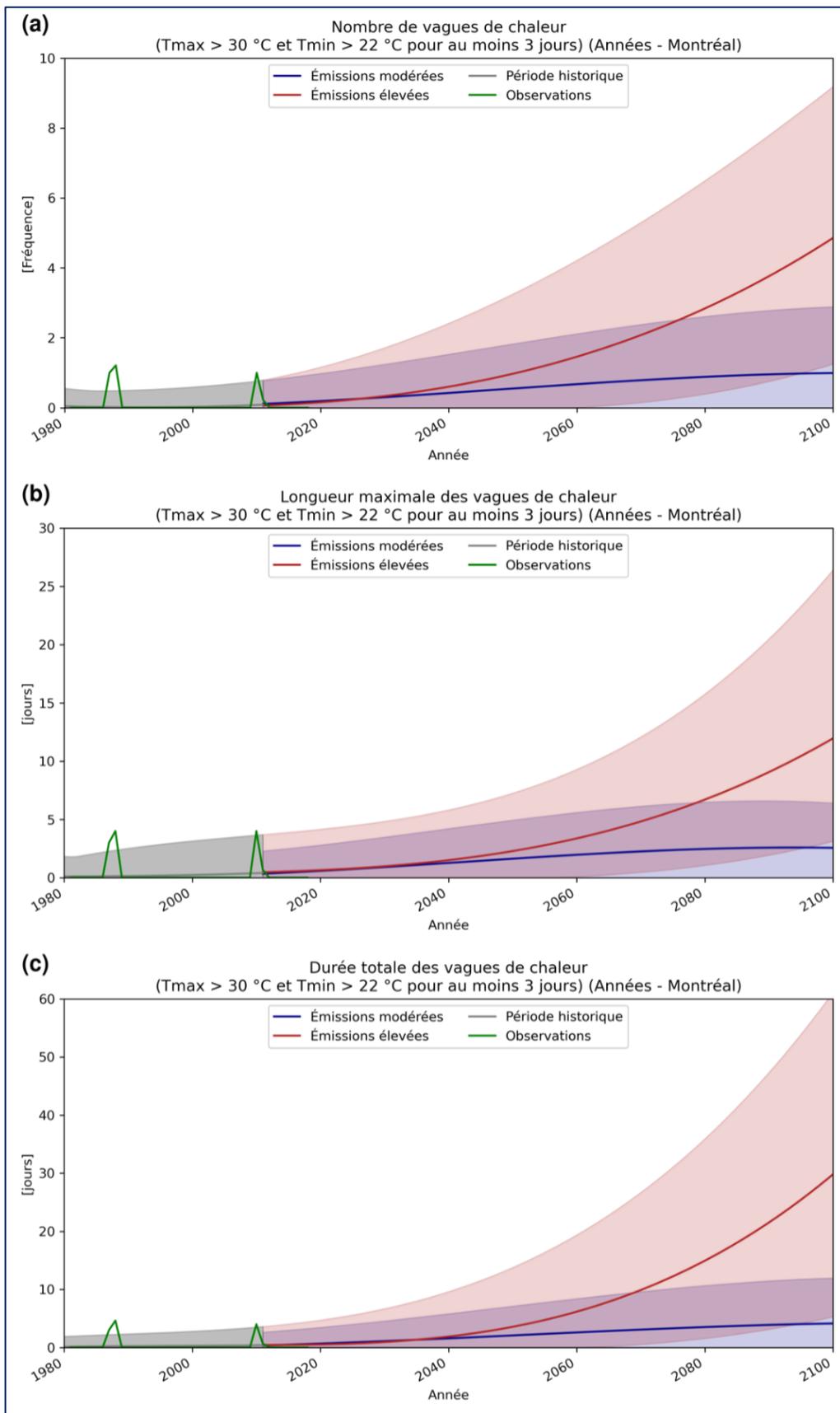


Figure E-3. Évolution annuelle des vagues de chaleur d'au moins 3 jours pour le site du port de Montréal avec en (a) l'évolution du nombre de vagues par année, (b) la durée de la vague la plus longue de l'année et (c) le nombre total de jours en condition de vagues par année, (b) la durée de la vague la plus longue de l'année et (c) le nombre total de jours en condition de vague de chaleur.

Les vagues de chaleur sont définies selon des températures minimales journalières supérieures à 20°C et des températures maximales journalières supérieures à 33°C. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

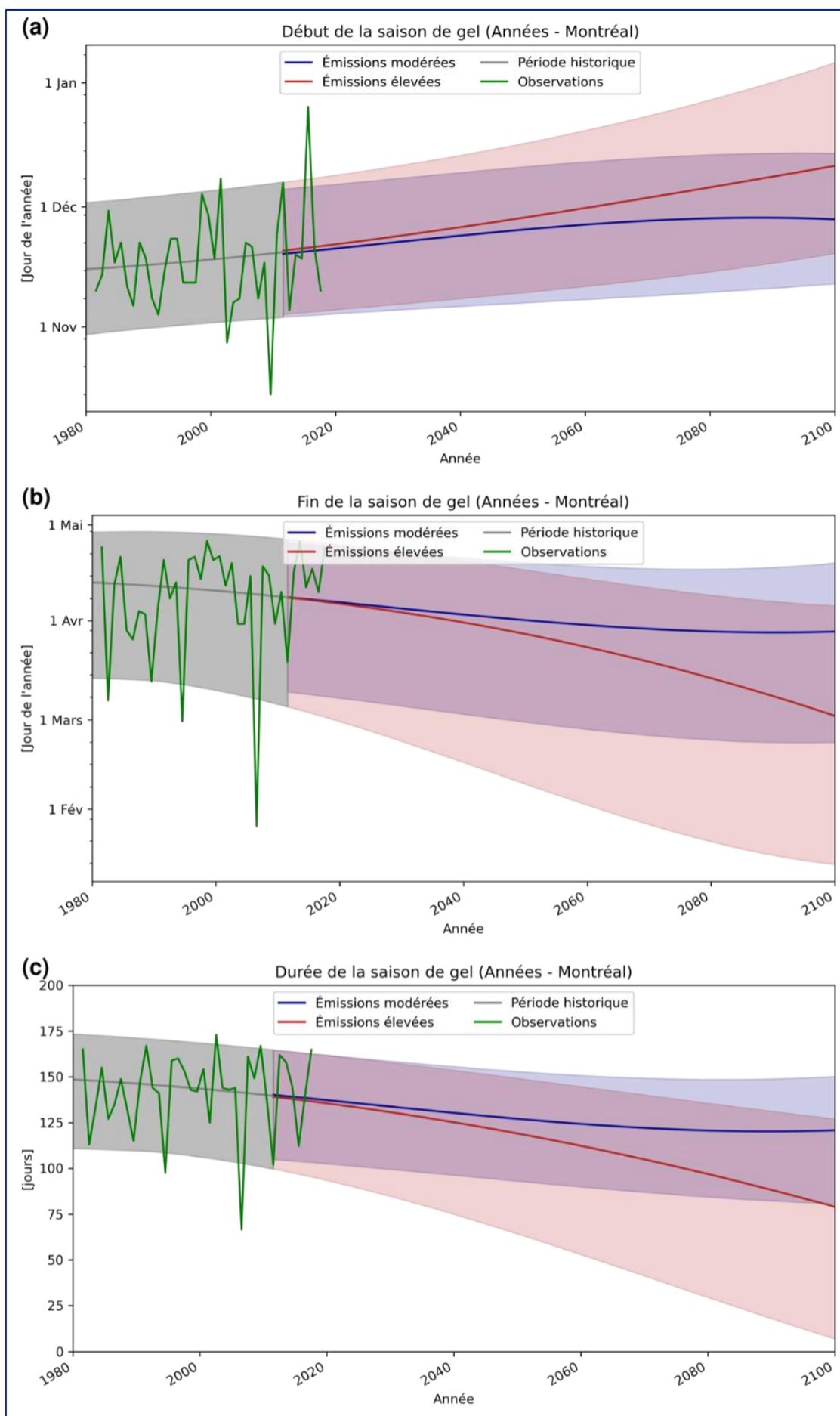


Figure E-4. Évolution annuelle des caractéristiques de la saison de gel au site du port de Montréal. Les graphiques montrent l'évolution de la date du début de la saison de gel (a), de la date de la fin de la saison (b) ainsi que de la durée de la saison (c). Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

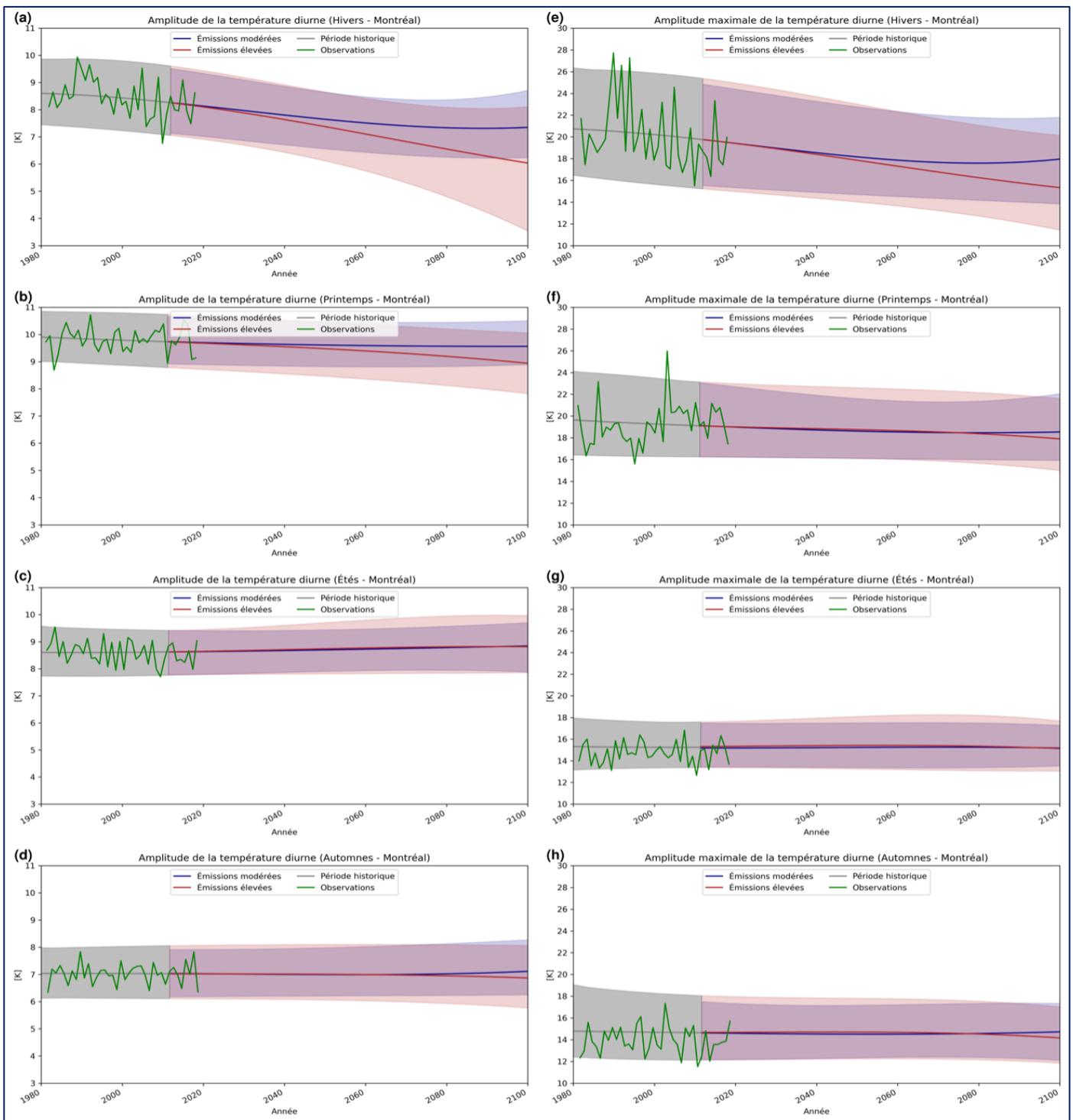


Figure E-5. Évolution annuelle de l'amplitude thermique diurne au site du port de Montréal.

Les graphiques du côté gauche représentent l'évolution de la moyenne saisonnière de l'amplitude thermique diurne pour (a) l'hiver, (b) le printemps, (c) l'été (d) l'automne. Les graphiques du côté droit représentent l'évolution du maximum saisonnier de l'amplitude thermique diurne pour (e) l'hiver, (f) le printemps, (g) l'été et (h) l'automne.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

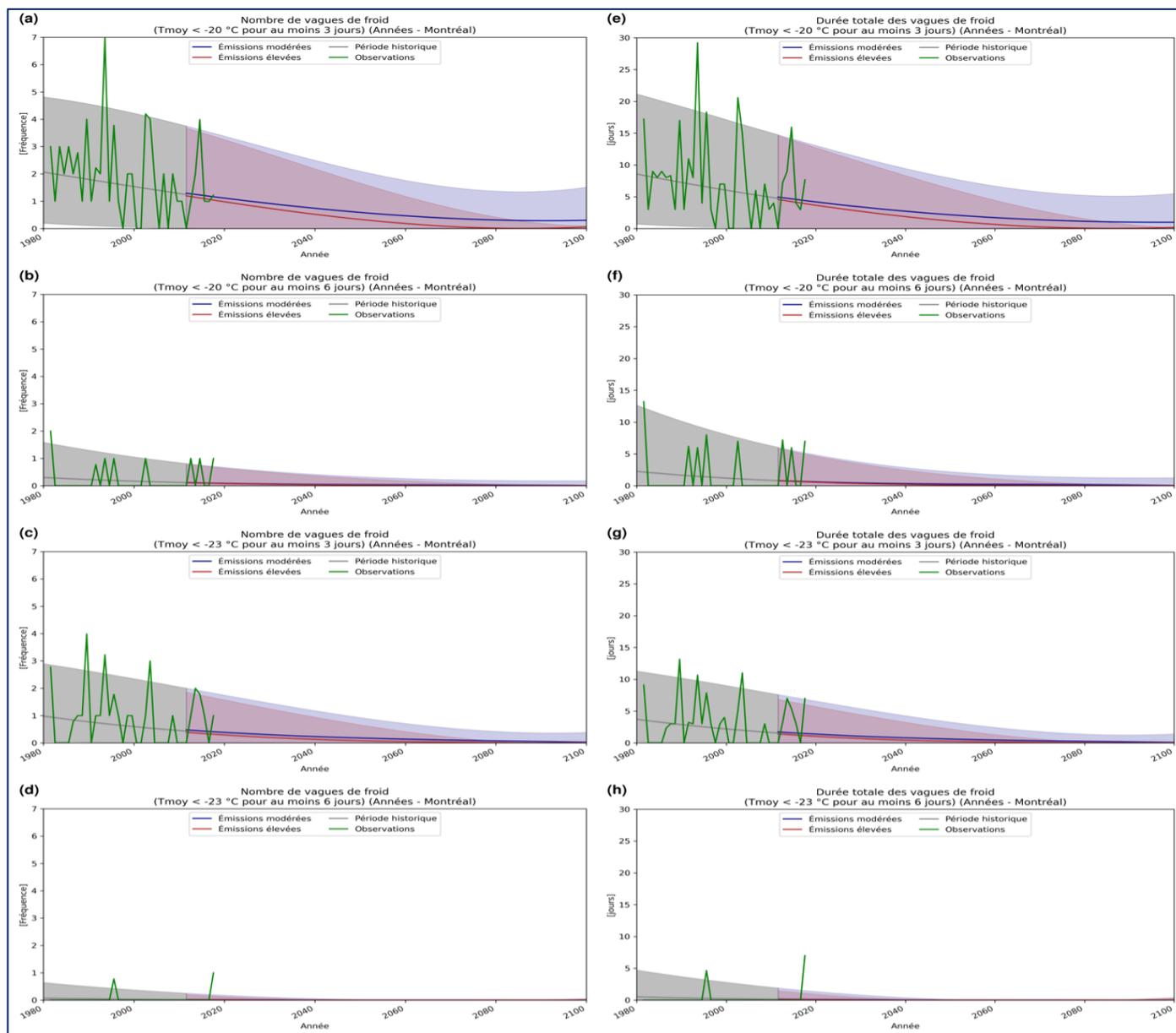


Figure E-6. Évolution annuelle des vagues de froid au port de Montréal.

Les graphiques de gauche représentent l'évolution la fréquence annuelle des vagues de froid selon: (a) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 3 jours consécutifs, (b) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 6 jours consécutifs, (c) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 3 jours consécutifs, (d) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 6 jours consécutifs. Les graphiques de droites représentent l'évolution du nombre total annuel de jours en condition de vague de froid selon : (e) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 3 jours consécutifs, (f) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 6 jours consécutifs, (g) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 3 jours consécutifs, (h) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 6 jours consécutifs. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

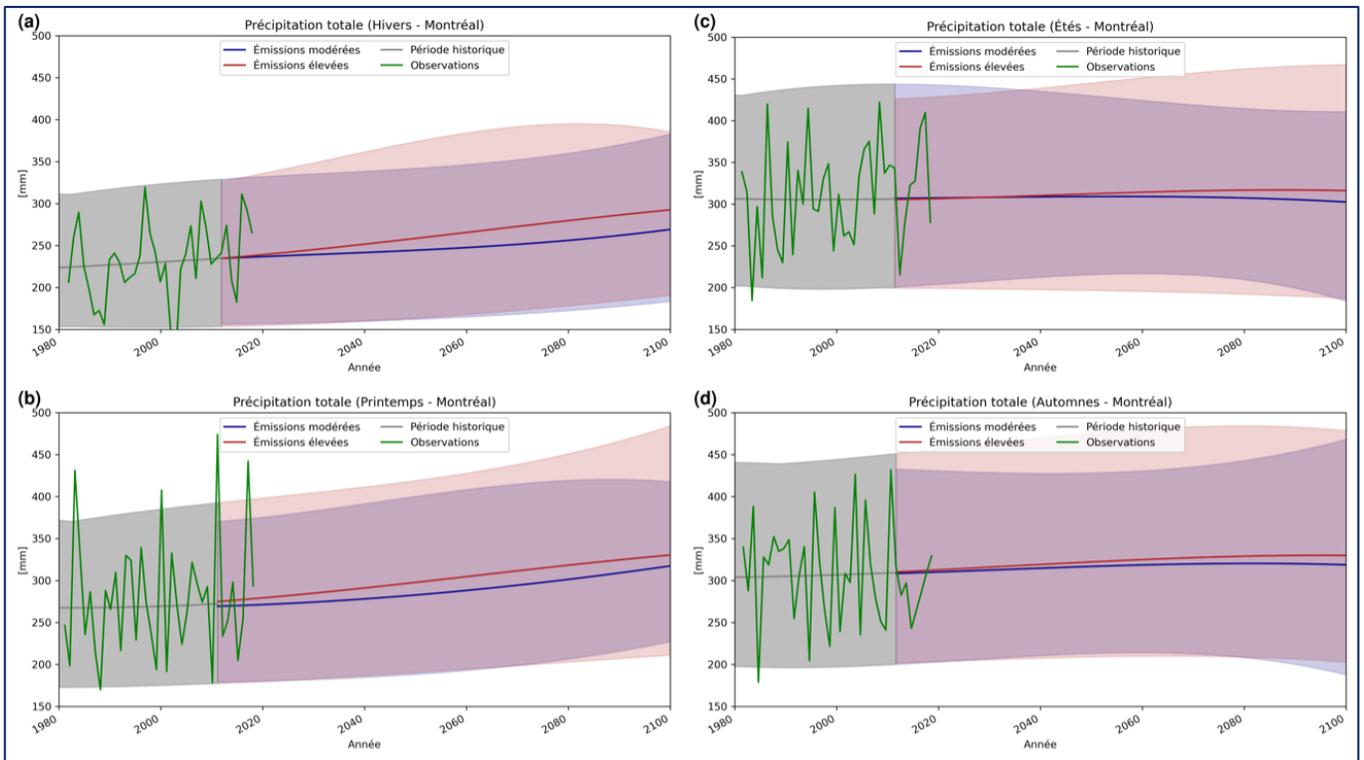


Figure E-7. Évolution annuelle du total saisonnier des précipitations pour le port de Montréal pour (a) l'hiver, (b) le printemps, (c) l'été et (d) l'automne.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

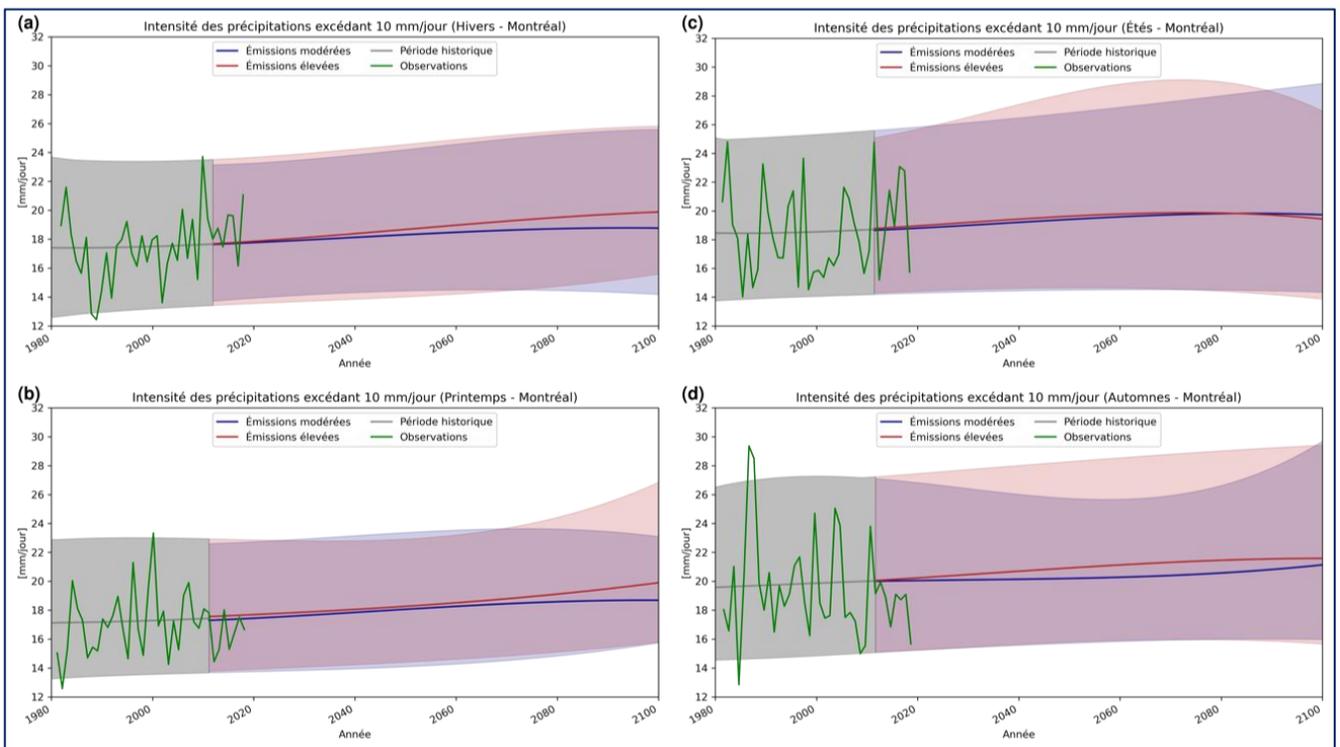


Figure E-8. Évolution annuelle de l'intensité moyenne des précipitations quotidiennes lorsqu'elles sont supérieures à 10mm en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d) pour le site du port de Montréal.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

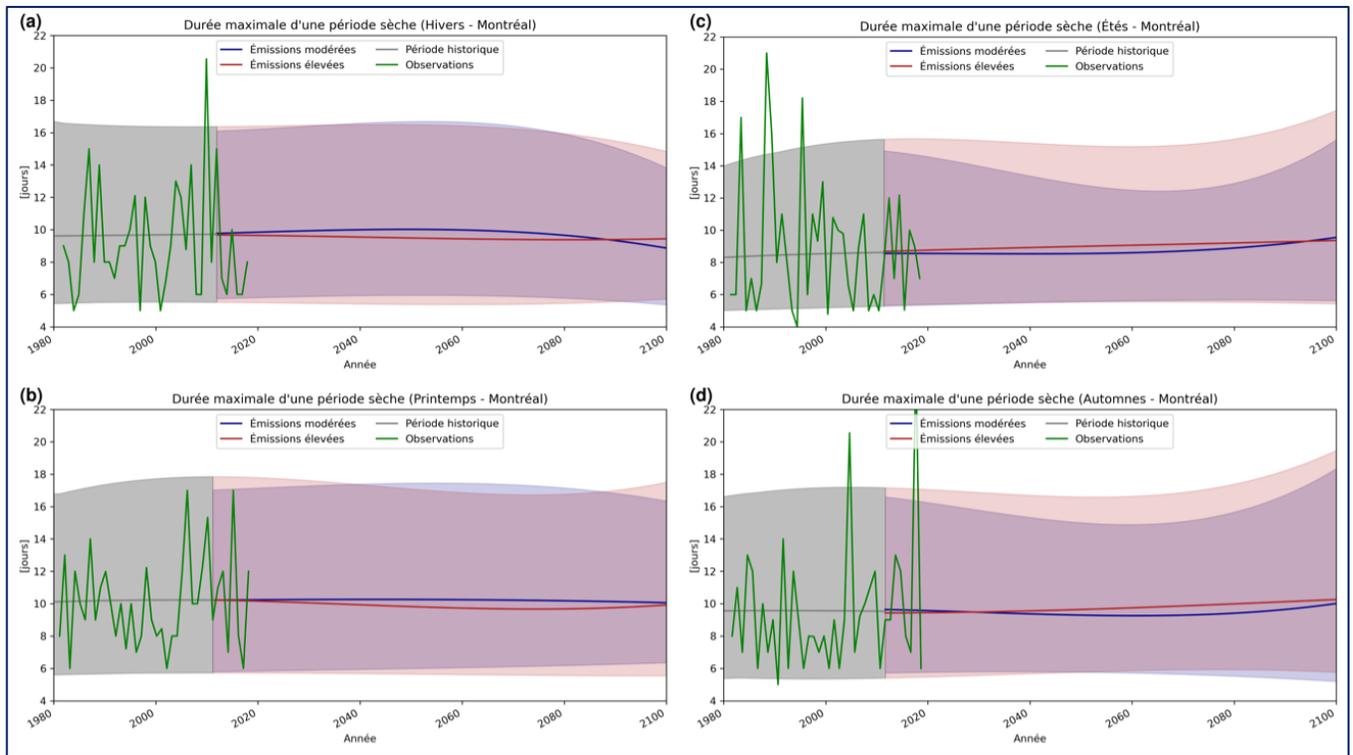


Figure E-9. Évolution annuelle de la durée maximale d'une période sèche pour le site du port de Montréal en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d).

Une période sèche est définie par le nombre de jours consécutifs pour lesquels les précipitations quotidiennes sont inférieures à 1mm. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

ANNEXE F

ÉVOLUTION DES INDICATEURS CLIMATIQUES ENTRE 1980 ET 2100 POUR LE SITE DU TERMINAL DU CONTRECOEUR

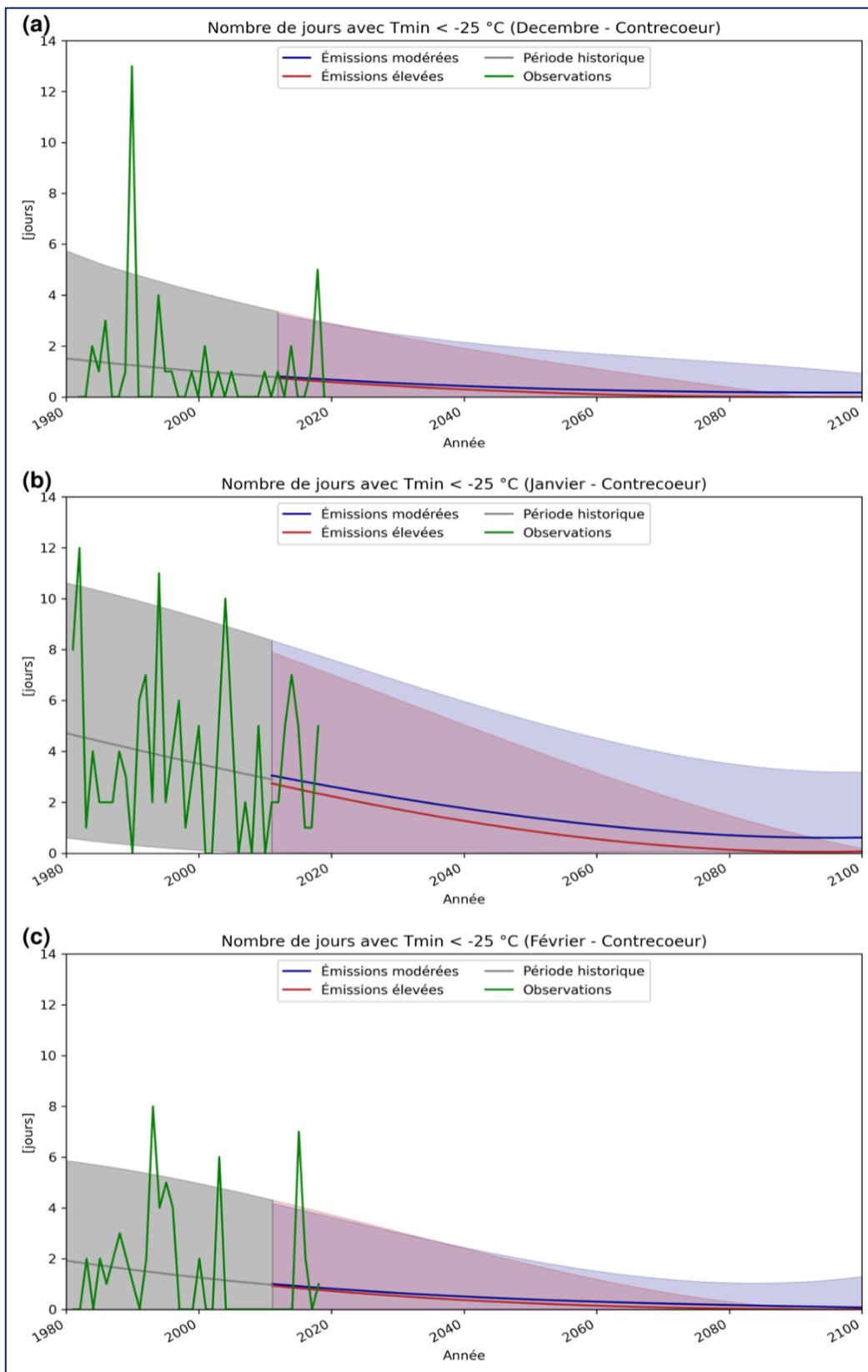


Figure F-1. Évolution annuelle du nombre de jours ayant des températures journalières minimales inférieures à -25°C au site terminal de Contrecoeur en (a) décembre, (b) janvier et (c) février.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

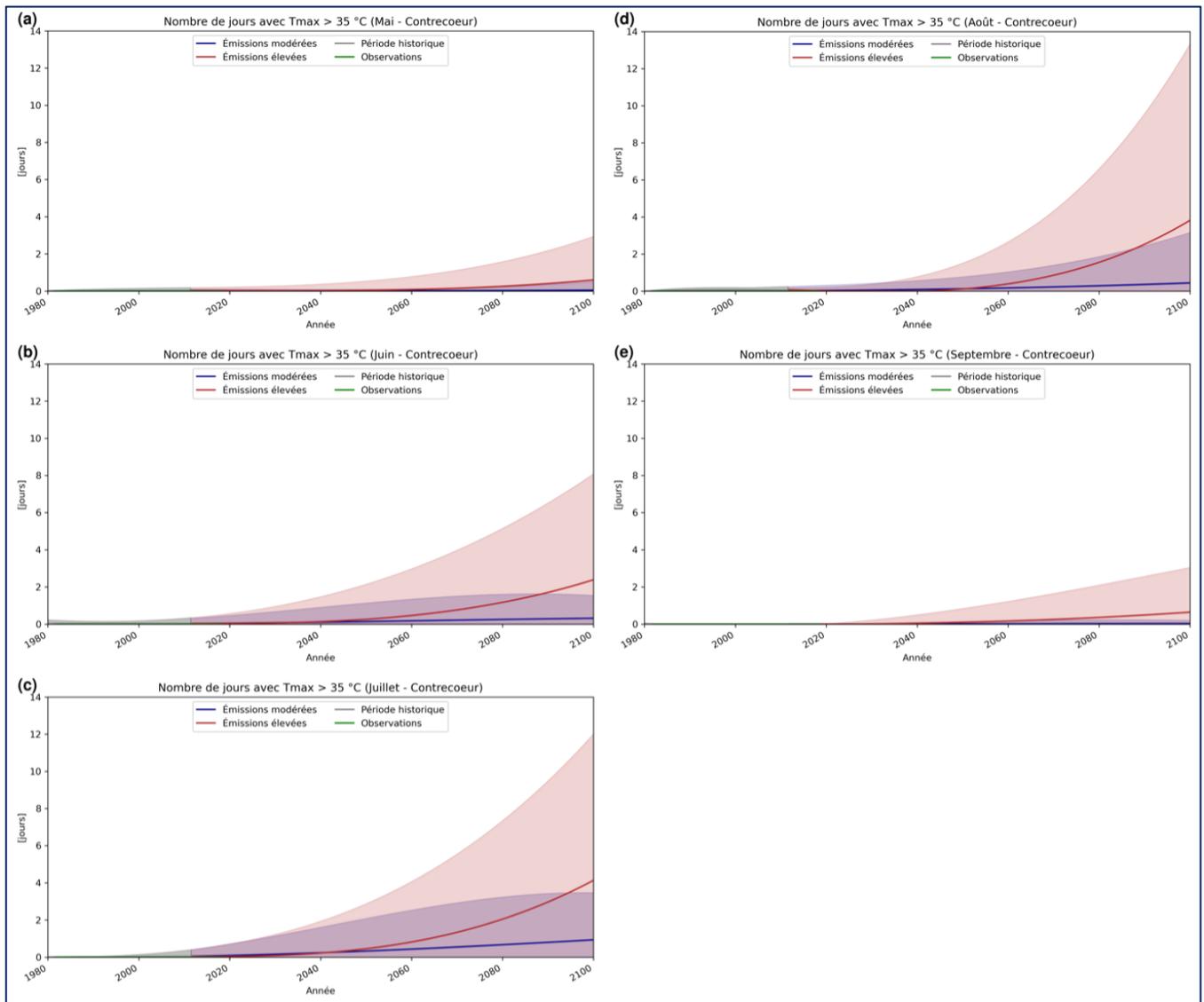


Figure F-2. Évolution du nombre de jours avec des températures maximales supérieures à 35°C pour les mois de (a) mai, (b) juin, (c) juillet, (d) août et (e) septembre pour le site du terminal de Contrecœur.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

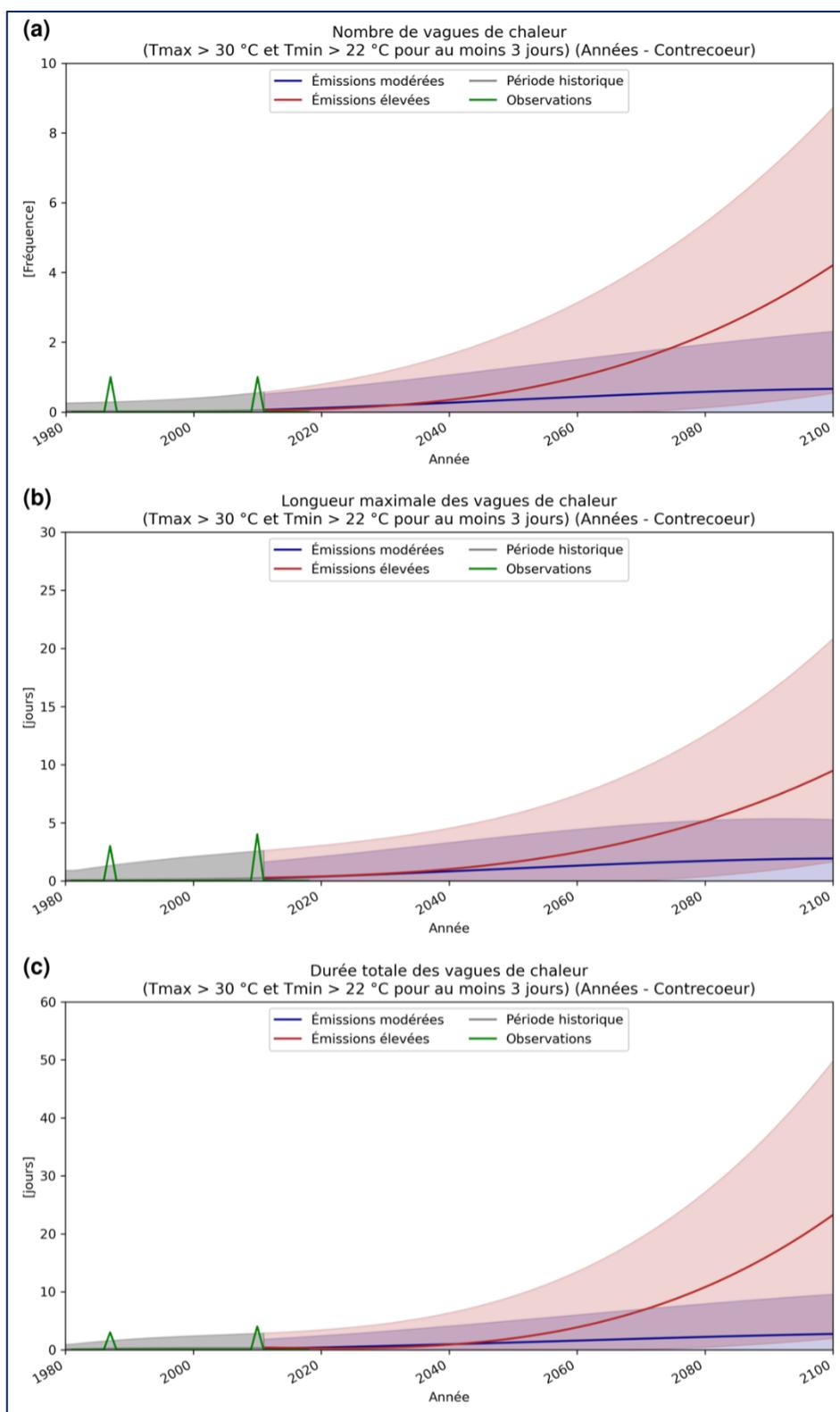


Figure F-3. Évolution annuelle des vagues de chaleur d'au moins 3 jours pour le site du terminal de Contrecoeur avec en (a) l'évolution du nombre de vagues par année, (b) la durée de la vague la plus longue de l'année et (c) le nombre total de jours en condition de vague de chaleur.

Les vagues de chaleur sont définies selon des températures minimales journalières supérieures à 20°C et des températures maximales journalières supérieures à 33°C. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

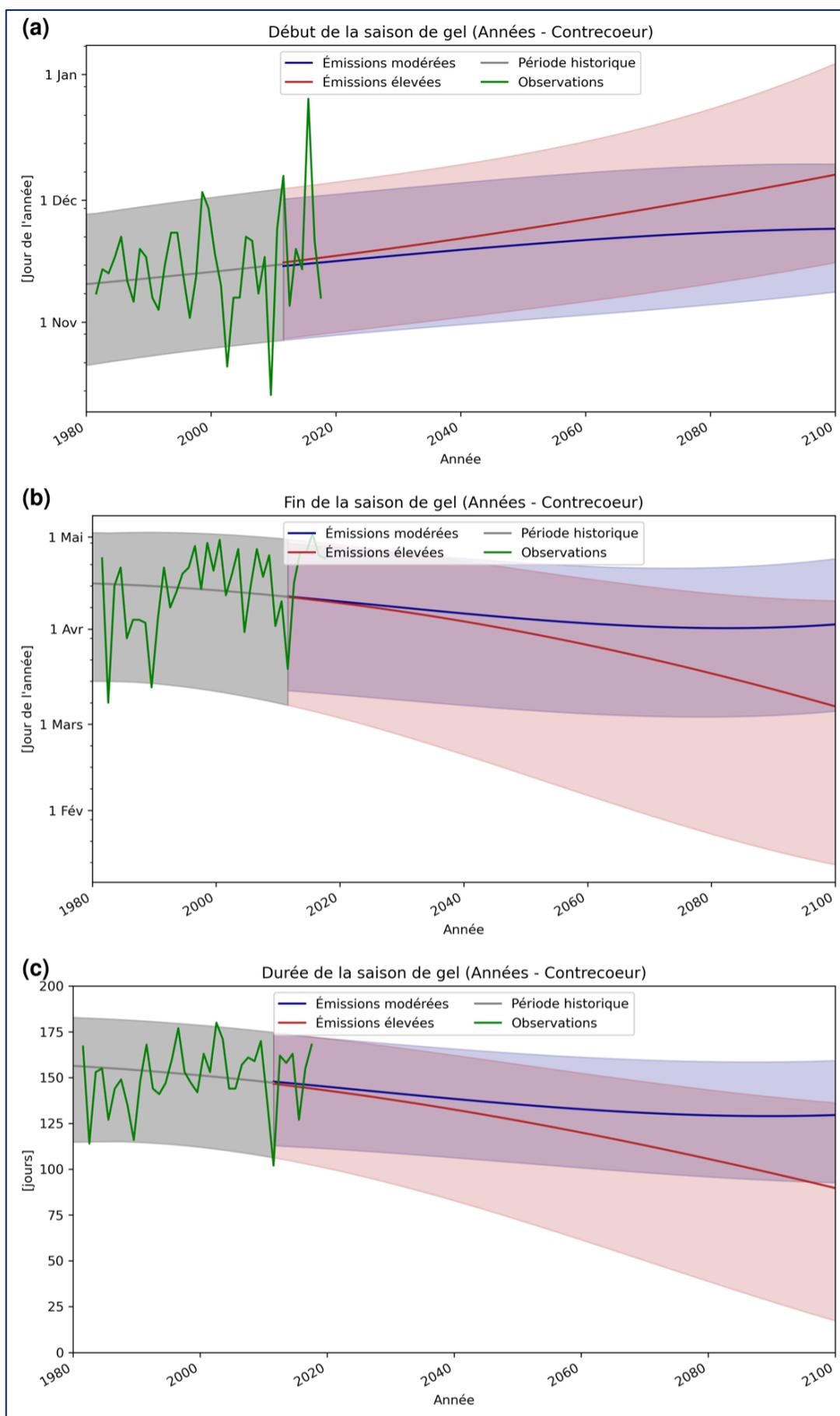


Figure F-4. Évolution annuelle des caractéristiques de la saison de gel au site du terminal de Contrecoeur.

Les graphiques montrent l'évolution de la date du début de la saison de gel (a), de la date de la fin de la saison (b) ainsi que de la durée de la saison (c). Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

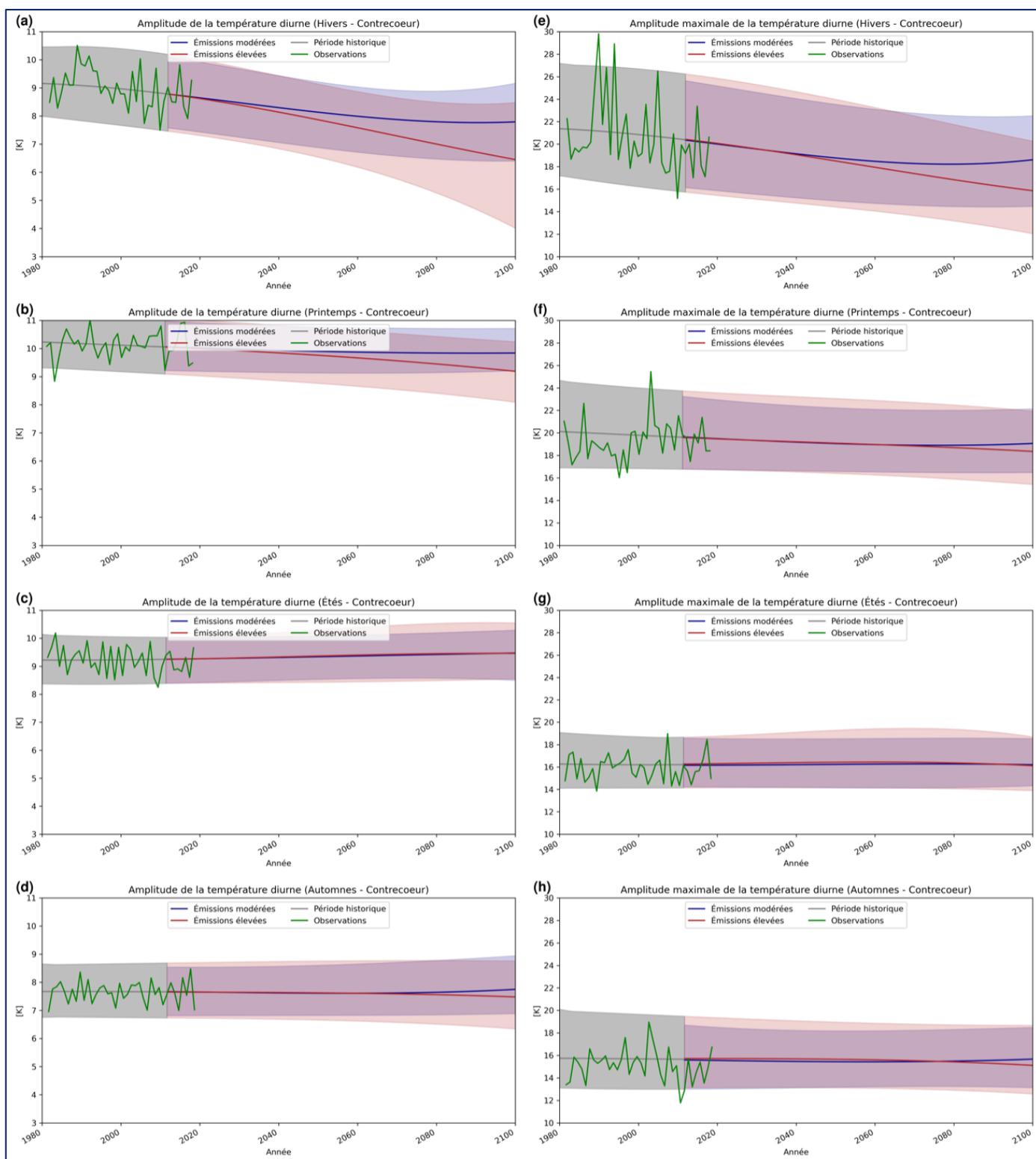


Figure F-5. Évolution annuelle de l'amplitude thermique diurne au site du terminal de Contrecoeur. Les graphiques du côté gauche représentent l'évolution de la moyenne saisonnière de l'amplitude thermique diurne pour (a) l'hiver, (b) le printemps, (c) l'été (d) l'automne. Les graphiques du côté droit représentent l'évolution du maximum saisonnier de l'amplitude thermique diurne pour (e) l'hiver, (f) le printemps, (g) l'été et (h) l'automne. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

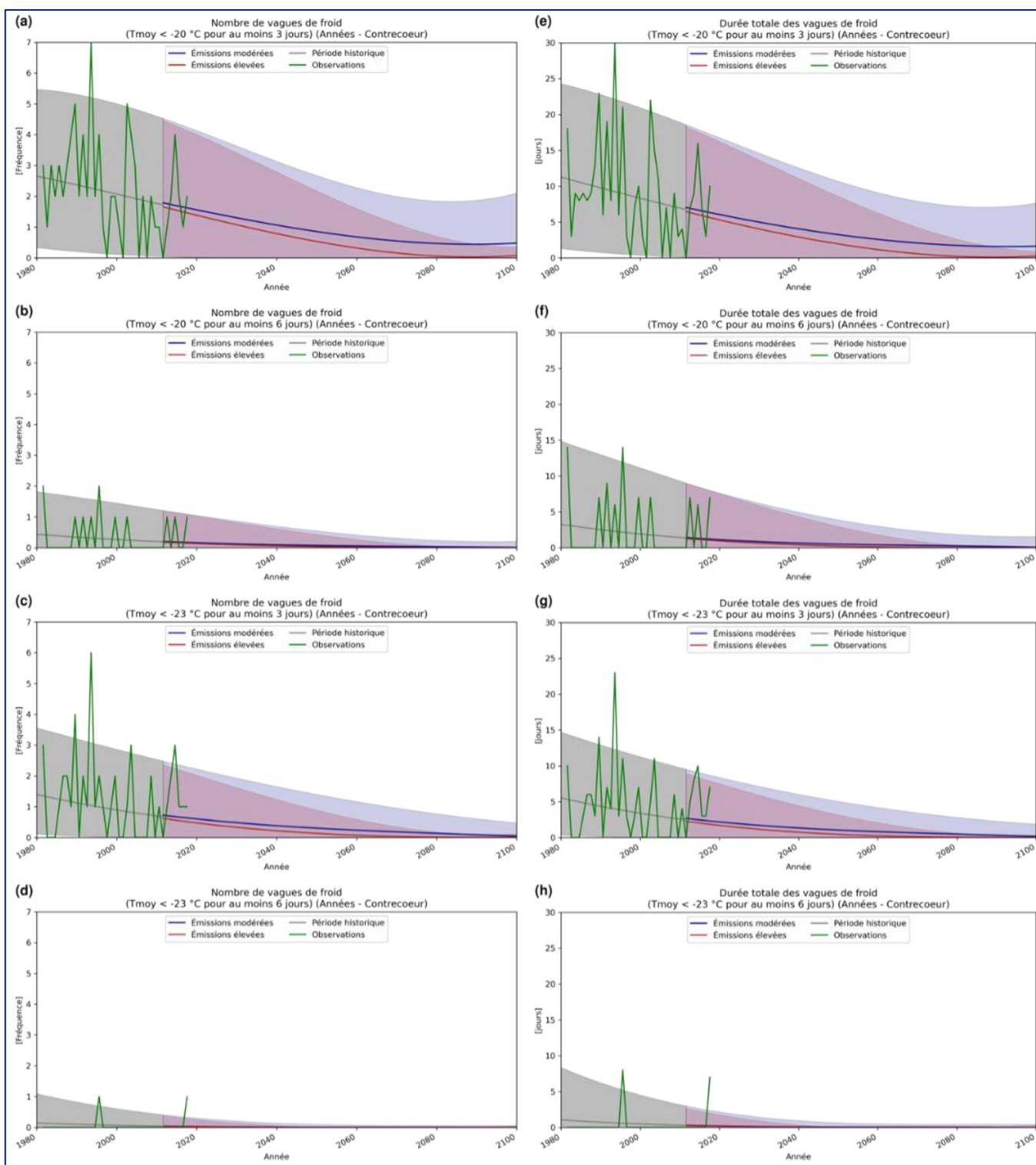


Figure F-6. Évolution annuelle des vagues de froid au terminal de Contrecoeur.

Les graphiques de gauche représentent l'évolution la fréquence annuelle des vagues de froid selon: (a) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 3 jours consécutifs, (b) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 6 jours consécutifs, (c) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 3 jours consécutifs, (d) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 6 jours consécutifs. Les graphiques de droite représentent l'évolution du nombre total annuel de jours en condition de vague de froid selon : (e) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 3 jours consécutifs, (f) une température minimale quotidienne inférieure à -20°C pour au moins 6 jours consécutifs, (g) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 3 jours consécutifs, (h) une température minimale quotidienne inférieure à -23°C pour au moins 6 jours consécutifs. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

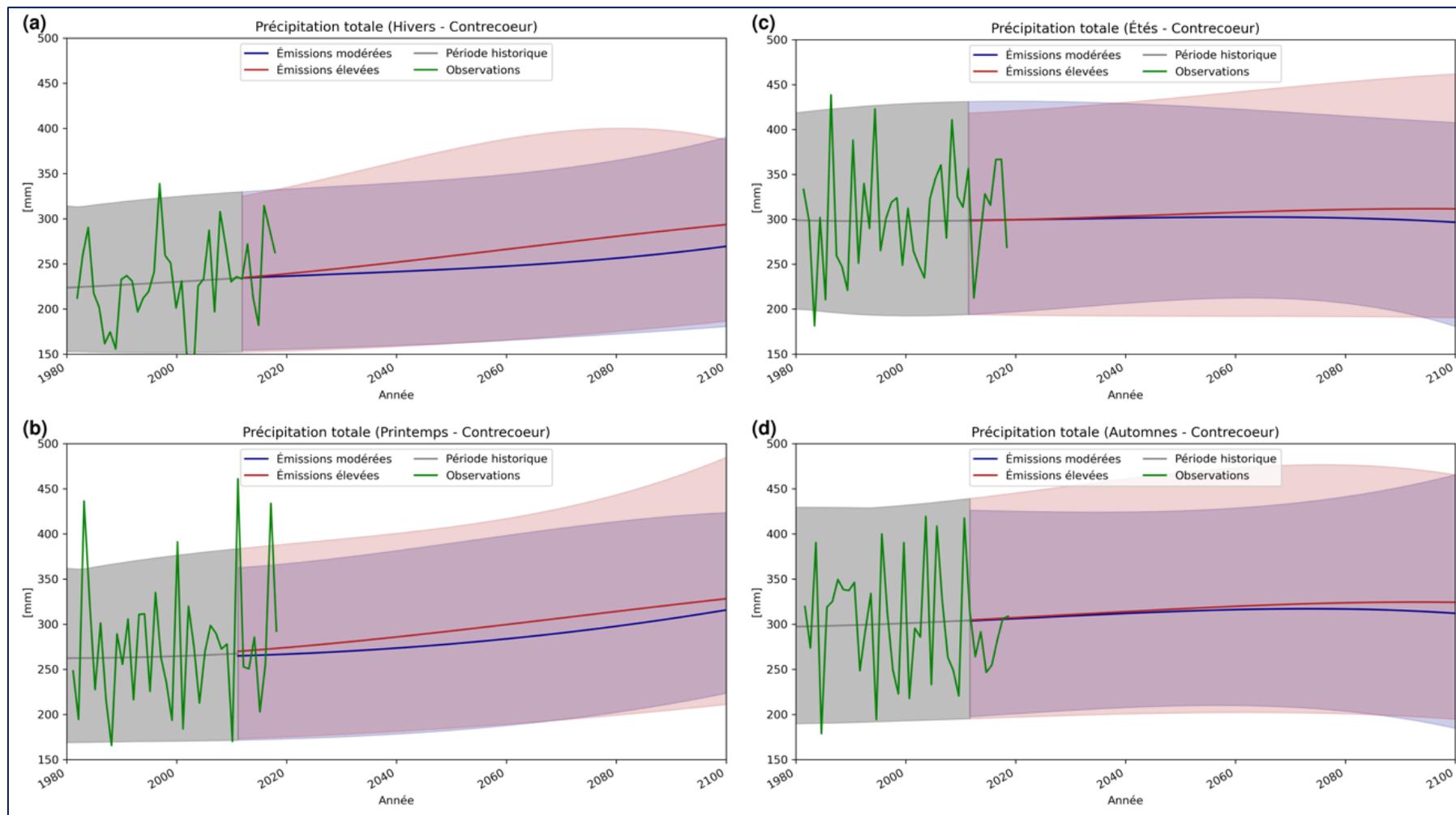


Figure F-7. Évolution annuelle du total saisonnier des précipitations pour le terminal Contrecoeur pour (a) l'hiver, (b) le printemps, (c) l'été et (d) l'automne.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

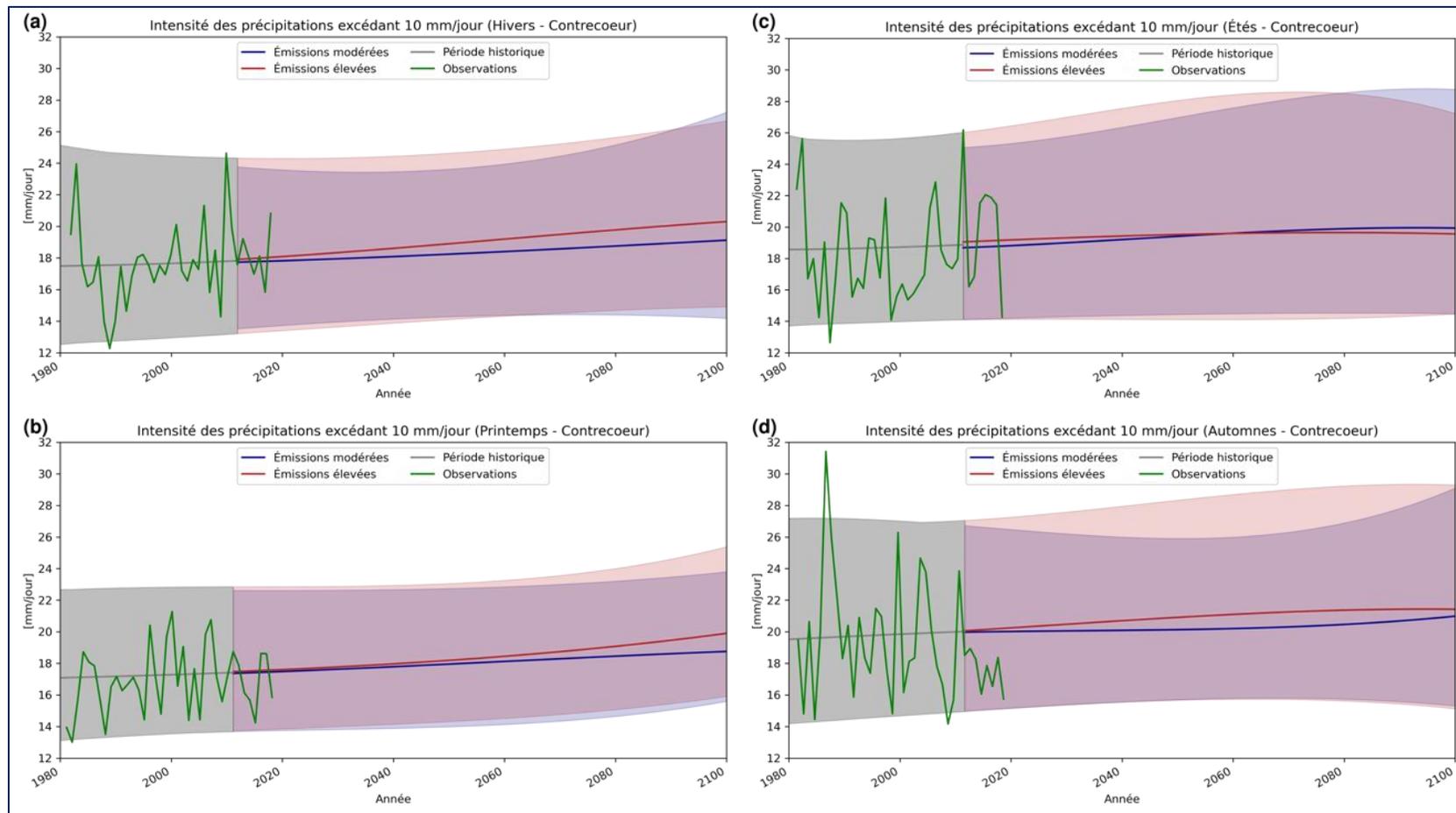


Figure F-8. Évolution annuelle de l'intensité moyenne des précipitations quotidiennes lorsqu'elles sont supérieures à 10mm en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d) pour le site du terminal Contrecoeur.

Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

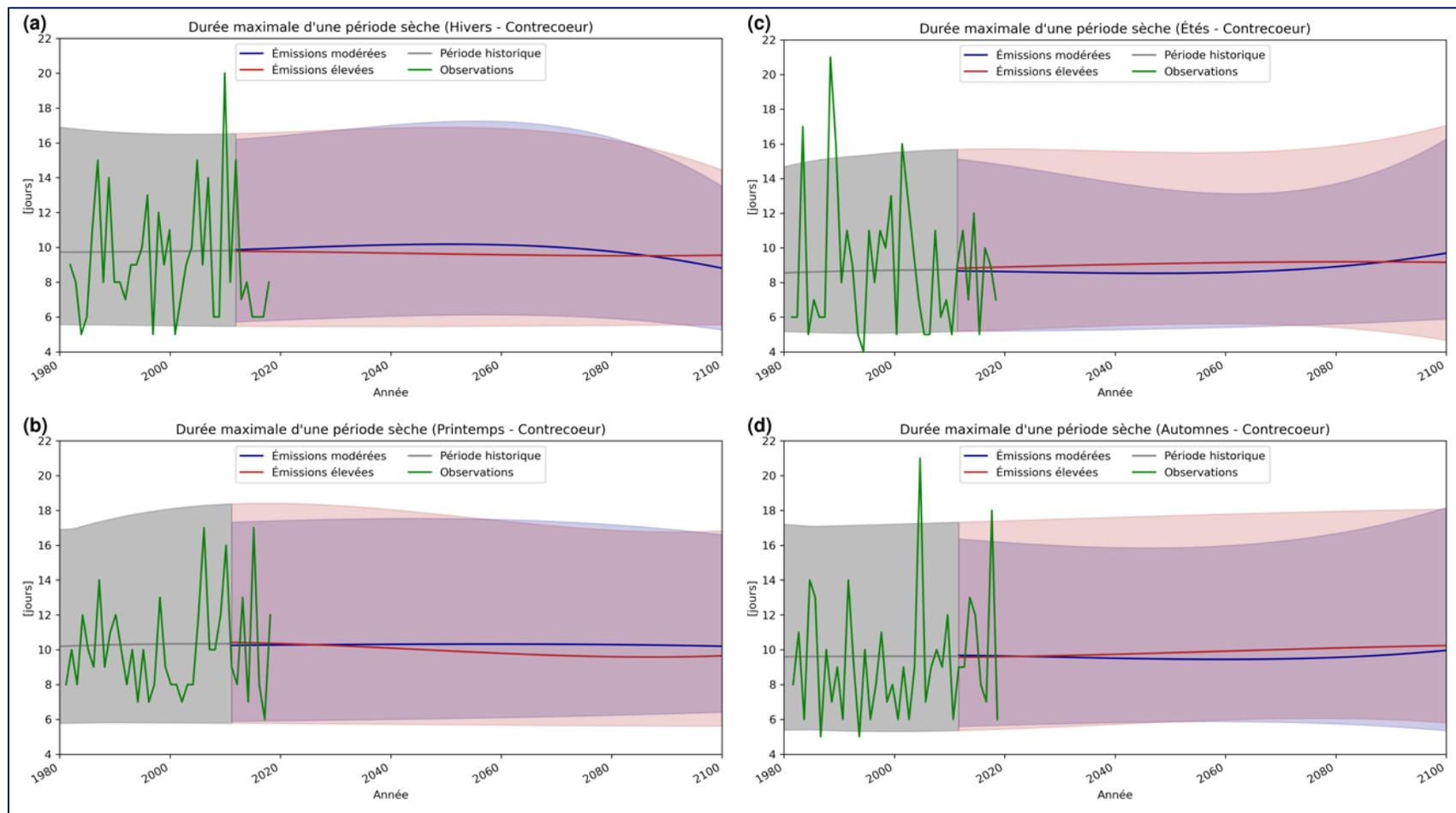


Figure F-9. Évolution annuelle de la durée maximale d'une période sèche pour le site du terminal Contrecoeur en hiver (a), au printemps (b), en été (c) et en automne (d).

Une période sèche est définie par le nombre de jours consécutifs pour lesquels les précipitations quotidiennes sont inférieures à 1 mm. Les lignes bleues et rouges correspondent à la moyenne d'un ensemble de projections climatiques basées respectivement sur un scénario d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) pour la période 2006-2100. Les zones de couleurs bleue (RCP 4.5) et rose (RCP 8.5) délimitent l'enveloppe définie par le minimum et le maximum de l'ensemble des simulations sur la période 2006-2100. La ligne en vert correspond aux valeurs de ERA5-land utilisées pour décrire le climat de référence. La zone de couleur grise délimite l'enveloppe de l'ensemble des simulations climatiques sur la période 1981-2005. Les enveloppes ont été lissées à l'aide d'un ajustement polynomial de degré 3.

ANNEXE G

ÉVOLUTION HISTORIQUE DES TORNADES ET DES TEMPÊTES D'ORIGINE TROPICALE, DES GRANDS LACS JUSQU'AU GOLFE DU SAINT-LAURENT

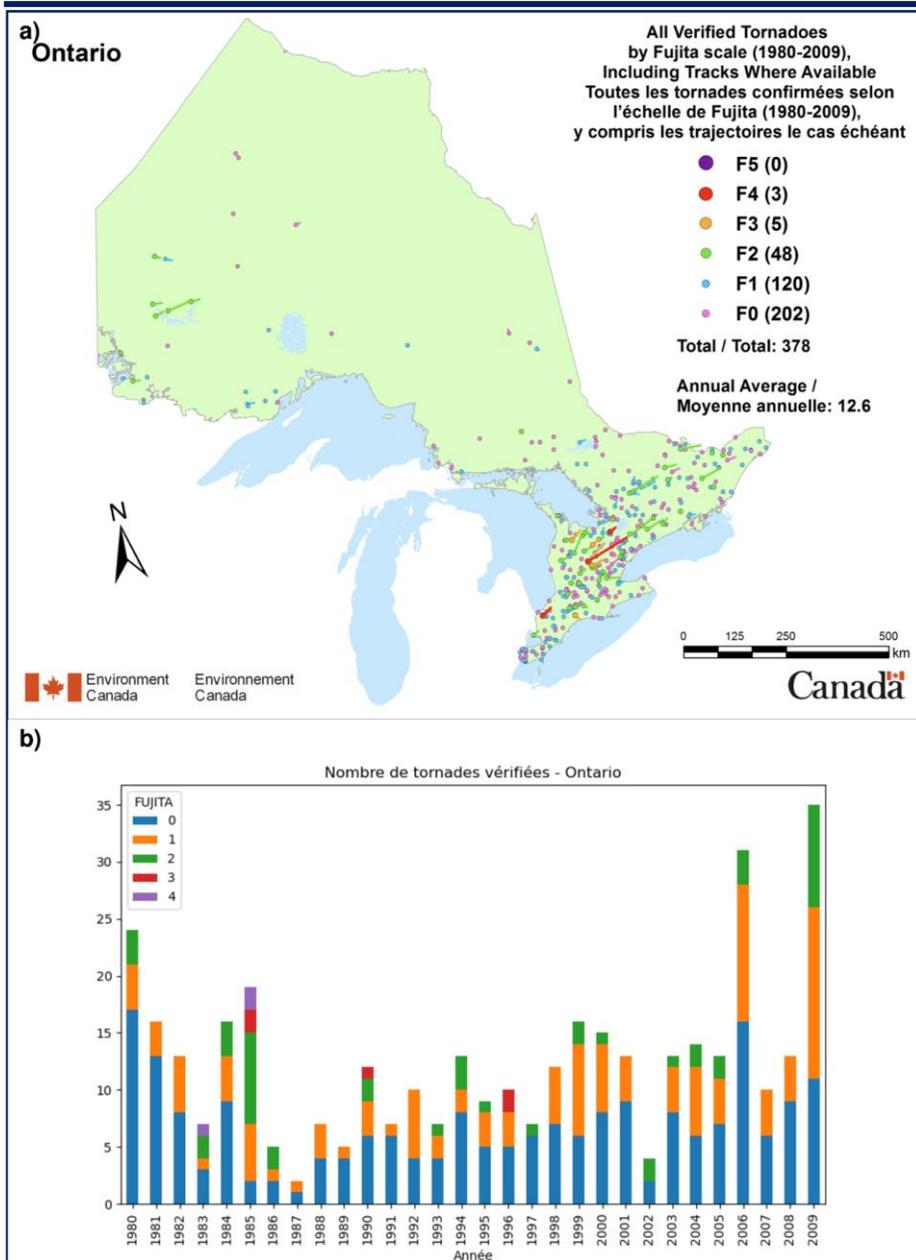


Figure G-1. Nombre de tornades vérifiées selon l'échelle Fujita en Ontario entre 1980 et 2009 d'après la Base de données nationale sur les tornades du Canada : Événements vérifiés 1980-2009 d'ECCE
<https://open.canada.ca/data/fr/dataset/f314a39f-009d-430b-97b9-d6e0>

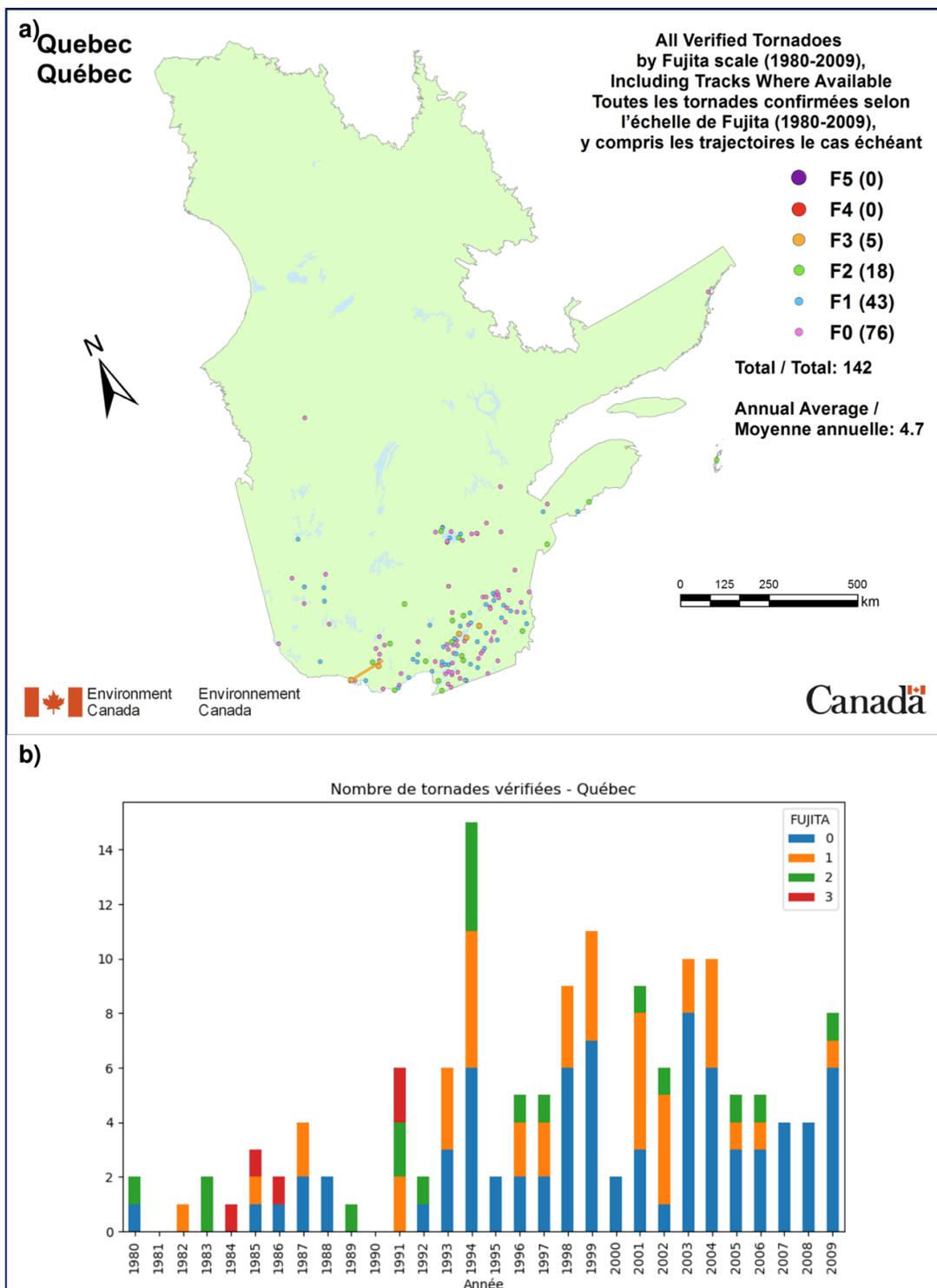


Figure G-2. Nombre de tornades vérifiées selon l'échelle Fujita au Québec entre 1980 et 2009 d'après la Base de données nationale sur les tornades du Canada:

Événements vérifiés 1980-2009 d'ECDC

(<https://open.canada.ca/data/fr/dataset/f314a39f-009d-43>)

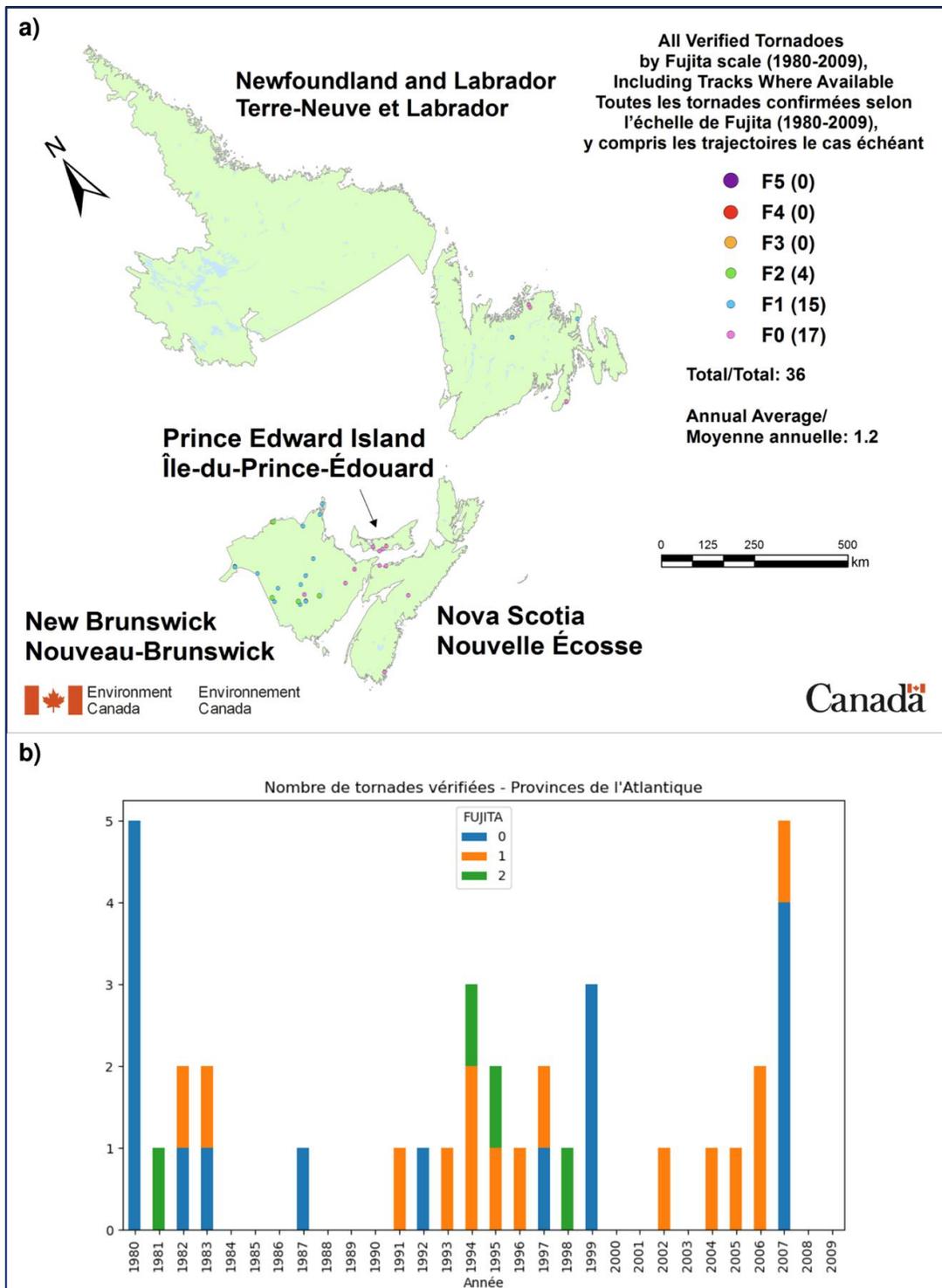


Figure G-3. Nombre de tornades vérifiées selon l'échelle Fujita au Nouveau Brunswick, en Nouvelle-Écosse, à l'Île-du-Prince-Édouard et à Terre-Neuve et Labrador entre 1980 et 2009 d'après la Base de données nationale sur les tornades du Canada.
 Événements vérifiés (<https://open.canada.ca/data/fr/dataset/f314a39f-009d-430b-97b9-d6e0cae22340>)

Tableau G-1. Classification des cyclones tropicaux de l'OMM pour le nord-est du Pacifique et le nord de l'Atlantique, incluant les seuils de vitesses de vents utilisés par le Centre canadien de prévisions des ouragans (CCPO).
 [Adapté du tableau 1.2 de (WMO, 2017)]

	Vent soutenu maximum (sur 1 minute) en nœuds					
	< 34	34-47	48-63	64-89	90-115	> 115
Force et appellation selon l'échelle de Beaufort	jusqu'à 7 (grand frais)	8 et 9 (coup de vent et fort coup de vent)	10 et 11 (tempête et violente tempête)	12 (vent d'ouragan)		
Classification de l'OMM et seuils utilisés par le CCPO	Dépression tropicale (37 à 62 km/h)	Tempête tropicale (63 à 117 km/h)		Ouragan (au moins 118 km/h)		
Échelle Saffir-Simpson	-	-	-	1	2-3	4-5
Identification	Par un numéro	Par un nom provenant des listes établies par le comité des cyclones tropicaux de l'OMM				

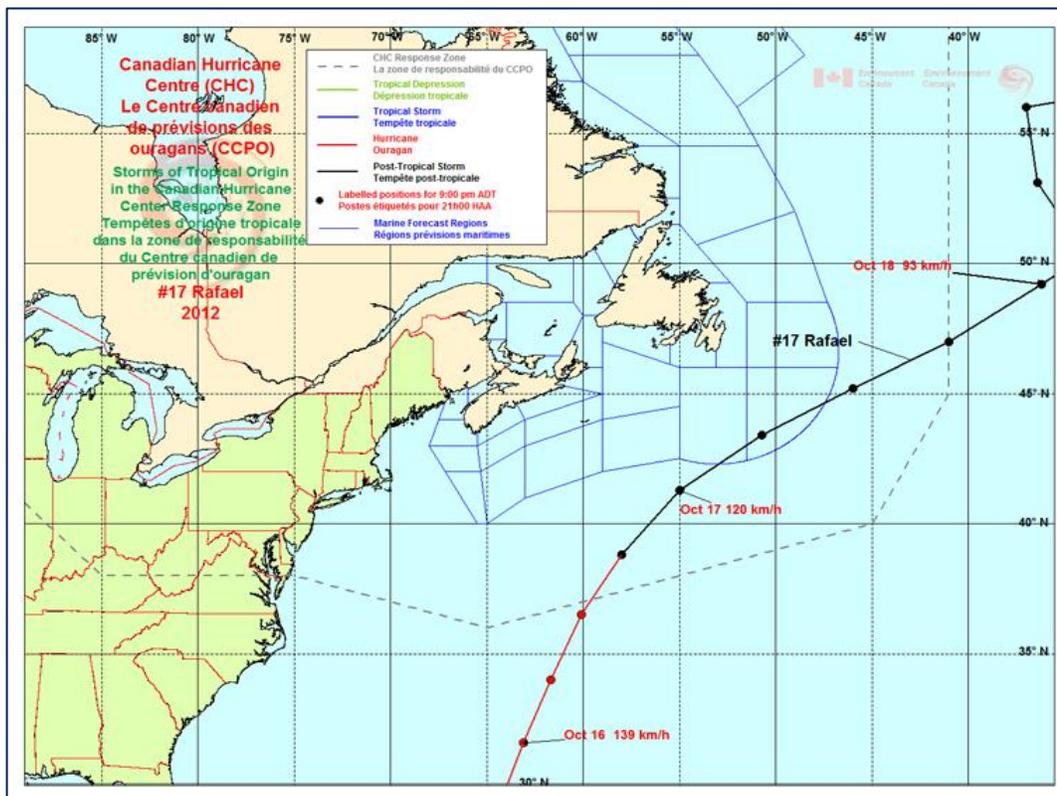


Figure G-4. Zone de responsabilité du Centre canadien de prévision des ouragans (tirets) et limites des régions de prévisions maritimes d'ECCC (lignes bleues).
 La carte montre la trajectoire de l'ouragan Rafael entre le 16 et 18 octobre 2012. [Source: <https://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/C6CBD872-302F-48DF-8601-23695C90991/TrackMap2012%20%2317Rafael-760.jpg>]

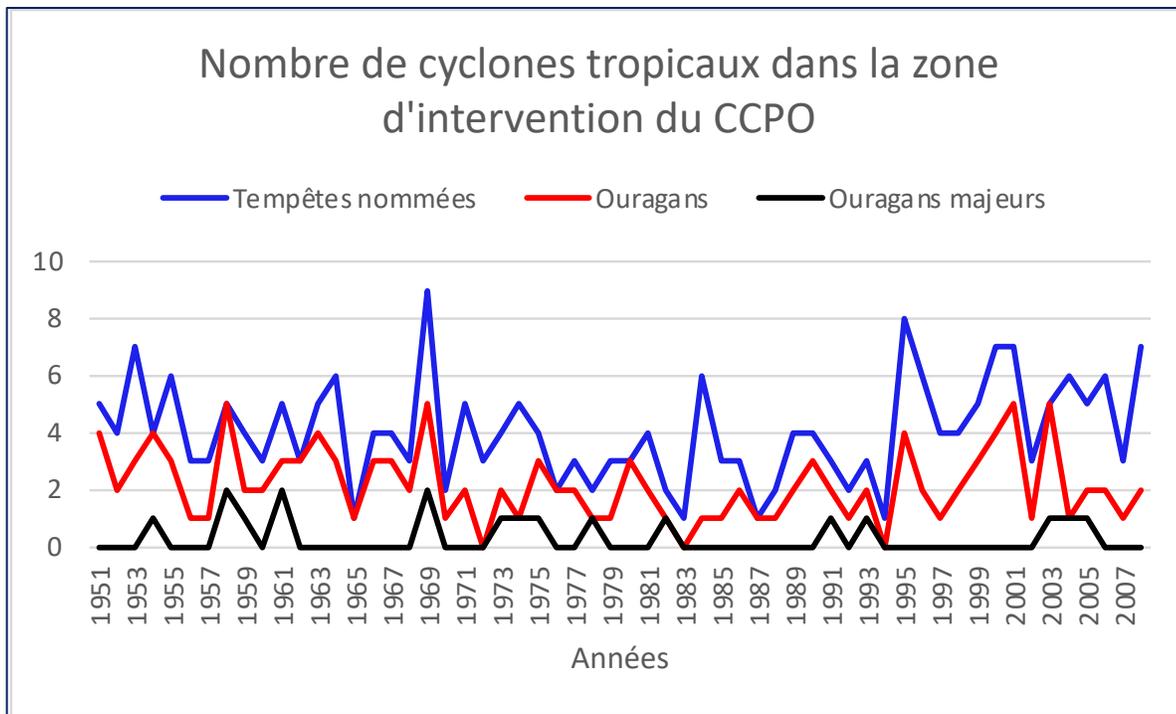


Figure G-5. Nombre de cyclones tropicaux dont la trajectoire s’est trouvée dans la zone d’intervention du Centre canadien de prévision des ouragans (CCPO) d’ECCC pour chaque année entre 1951 et 2008.
 Les tempêtes nommées sont en bleu, les ouragans en rouge et les ouragans majeurs de catégorie 3 à 5 en noir. Le graphique a été produit à partir des données de la Climatologie des ouragans pour l’est du Canada.
 [Source: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/previsions-faits-ouragans/climatologie-est-zone-intervention.html#shr-pg0>]

ANNEXE H

COUVERTURE DE GLACE DES GRANDS LACS, DE L'ESTUAIRE ET DE DU GOLFE DU SAINT-LAURENT DE 1981 À 2010.

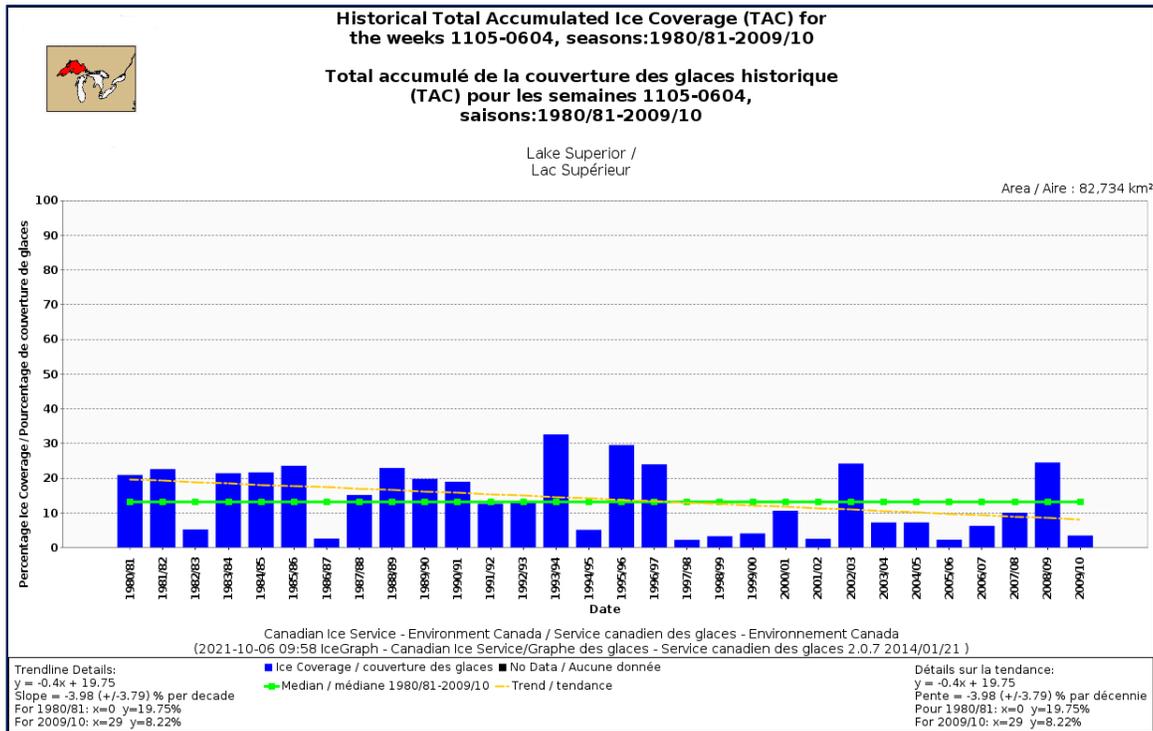


Figure H-1. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Supérieur.
 La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatologiques du Service canadien des glaces d'ECSC
[\[https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml\]](https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml).

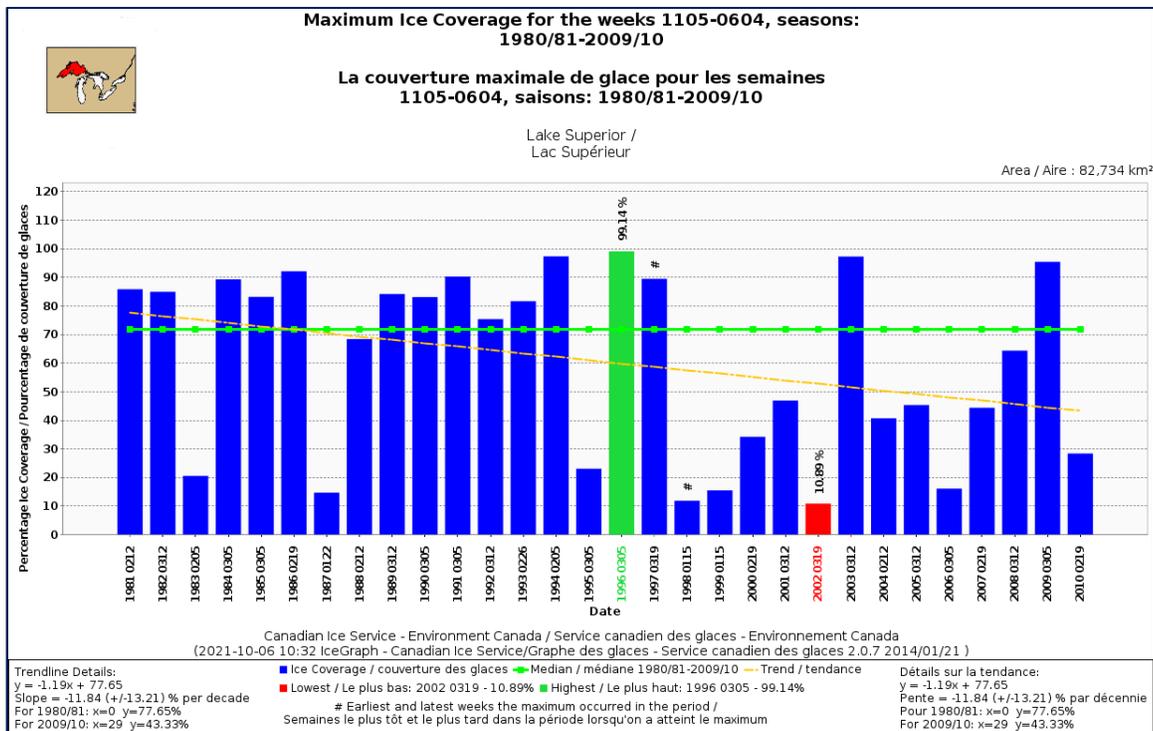


Figure H-2. Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Supérieur.

Les dates en abscisse indiquent la semaine durant laquelle la couverture de glace a atteint son maximum. La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECCC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>].

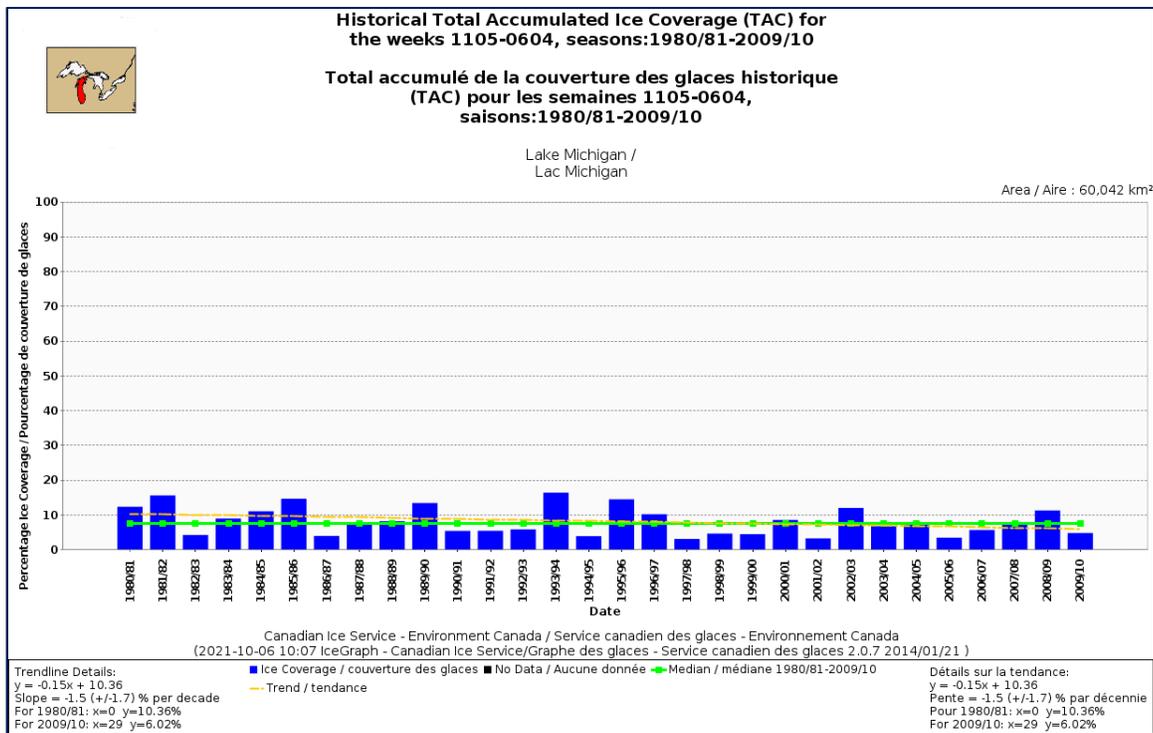


Figure H-3. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Michigan.

La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECSC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>].

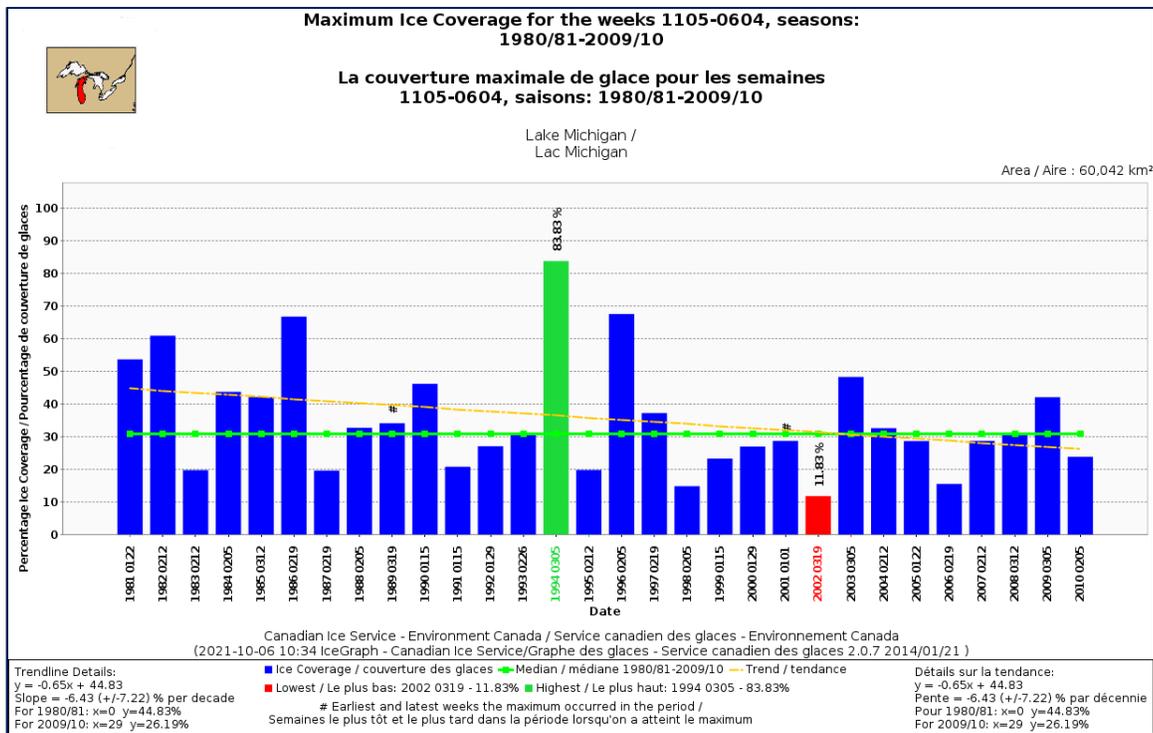


Figure H-4. Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Michigan.

Les dates en abscisse indiquent la semaine durant laquelle la couverture de glace a atteint son maximum. La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECCC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.shtml>].

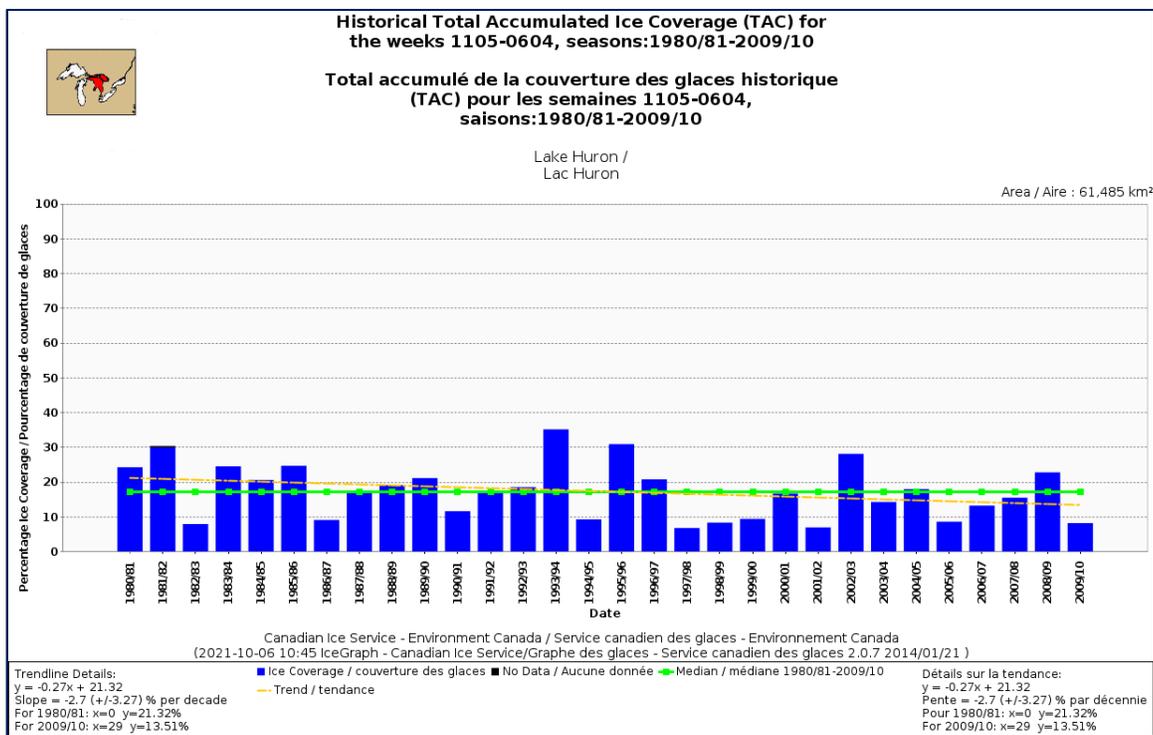


Figure H-5. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Huron.
 La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatologiques du Service canadien des glaces d'ECSC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>].

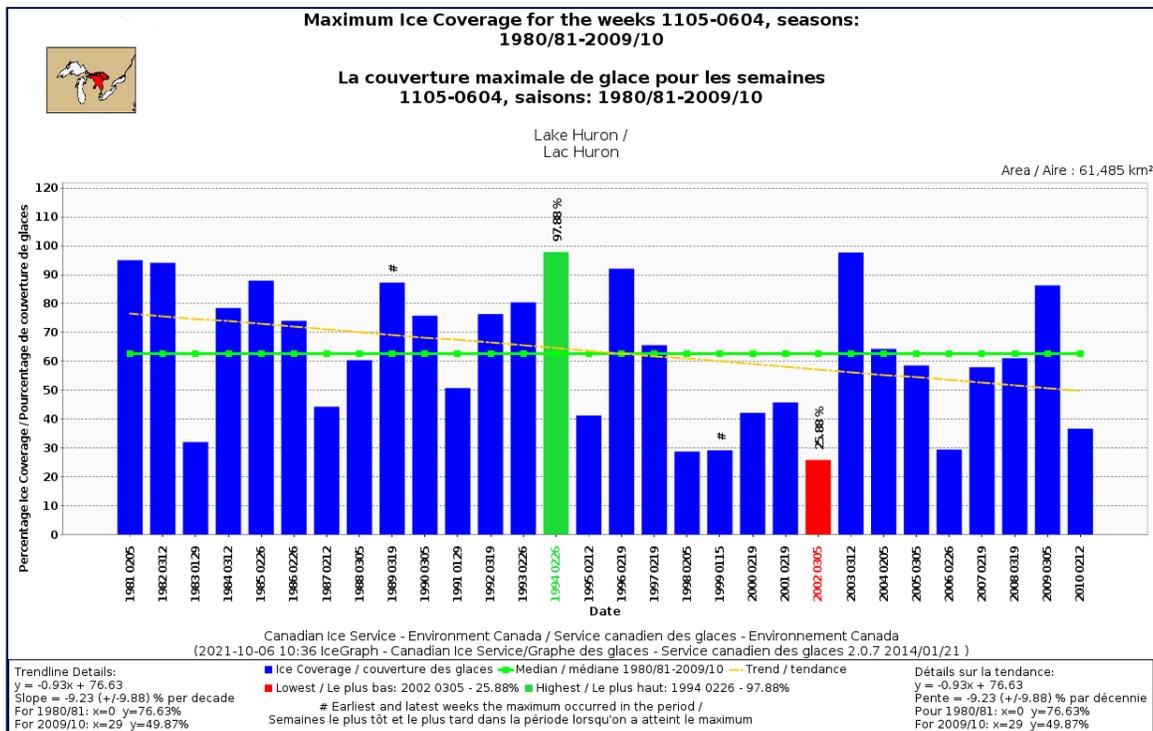


Figure H-6. Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Huron.
 Les dates en abscisse indiquent la semaine durant laquelle la couverture de glace a atteint son maximum. La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECCC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>] .

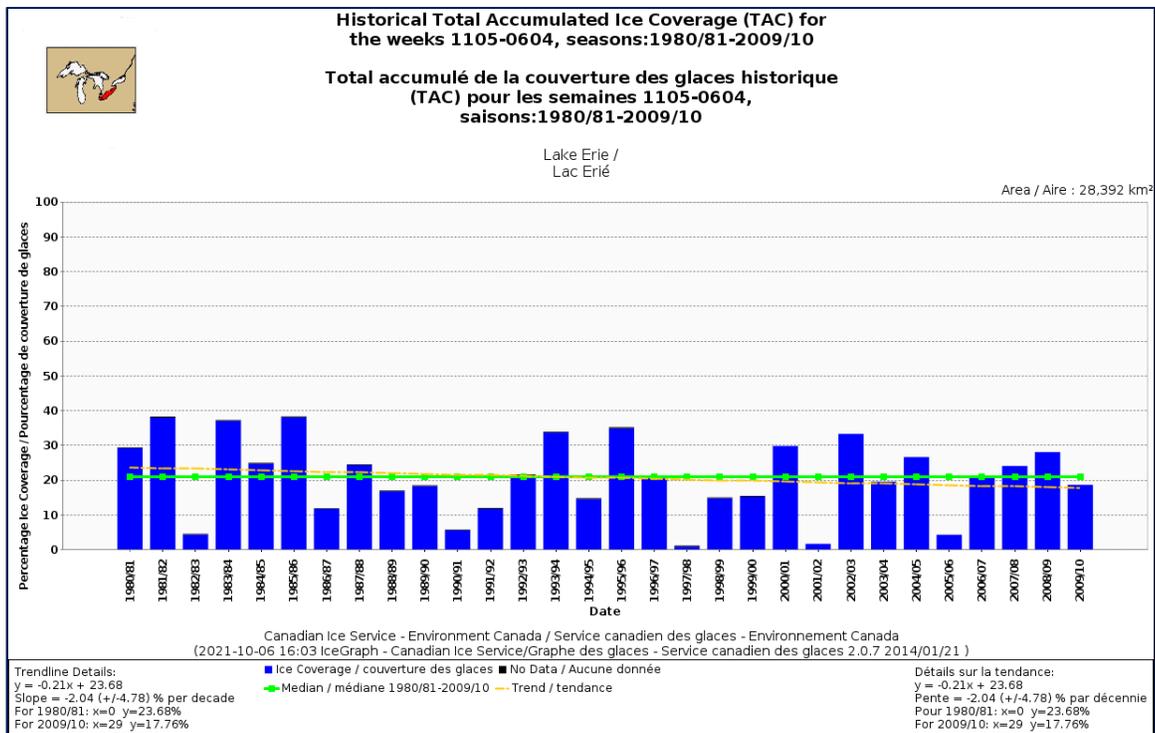


Figure H-7. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Érié.
 La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatologiques du Service canadien des glaces d'ECSC
[\[https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml\]](https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml).

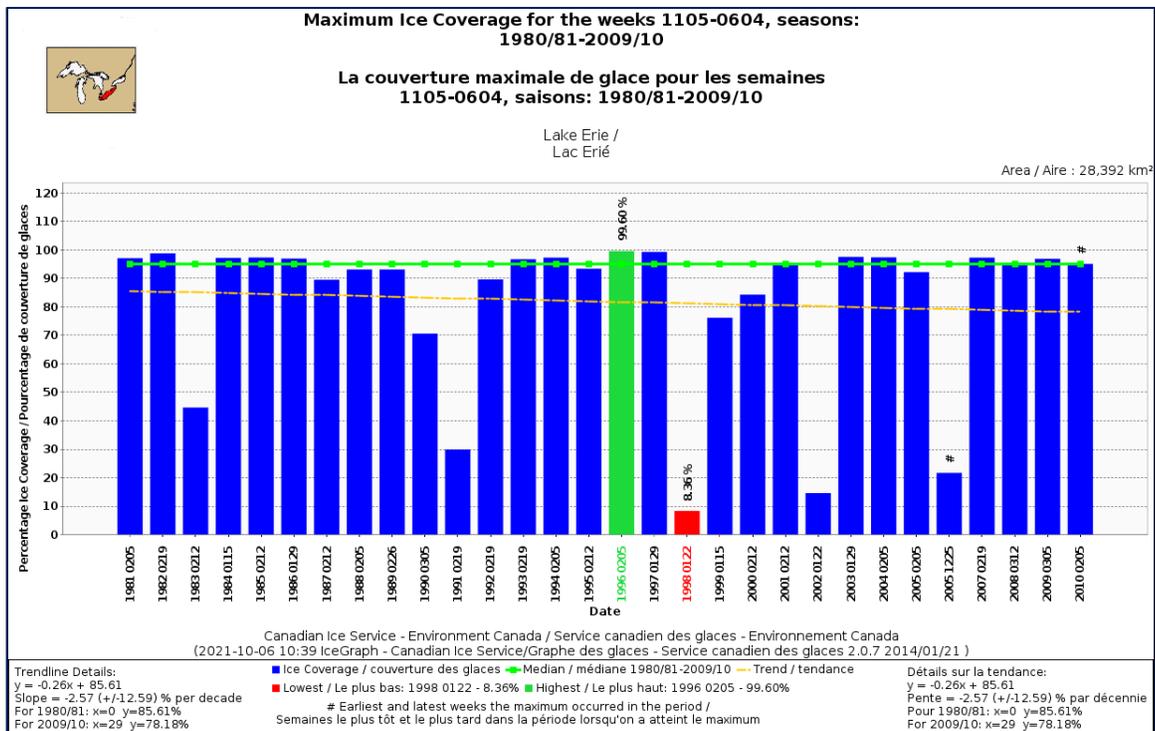


Figure H-8. Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Érié.

Les dates en abscisse indiquent la semaine durant laquelle la couverture de glace a atteint son maximum. La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECSC [https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.shtml].

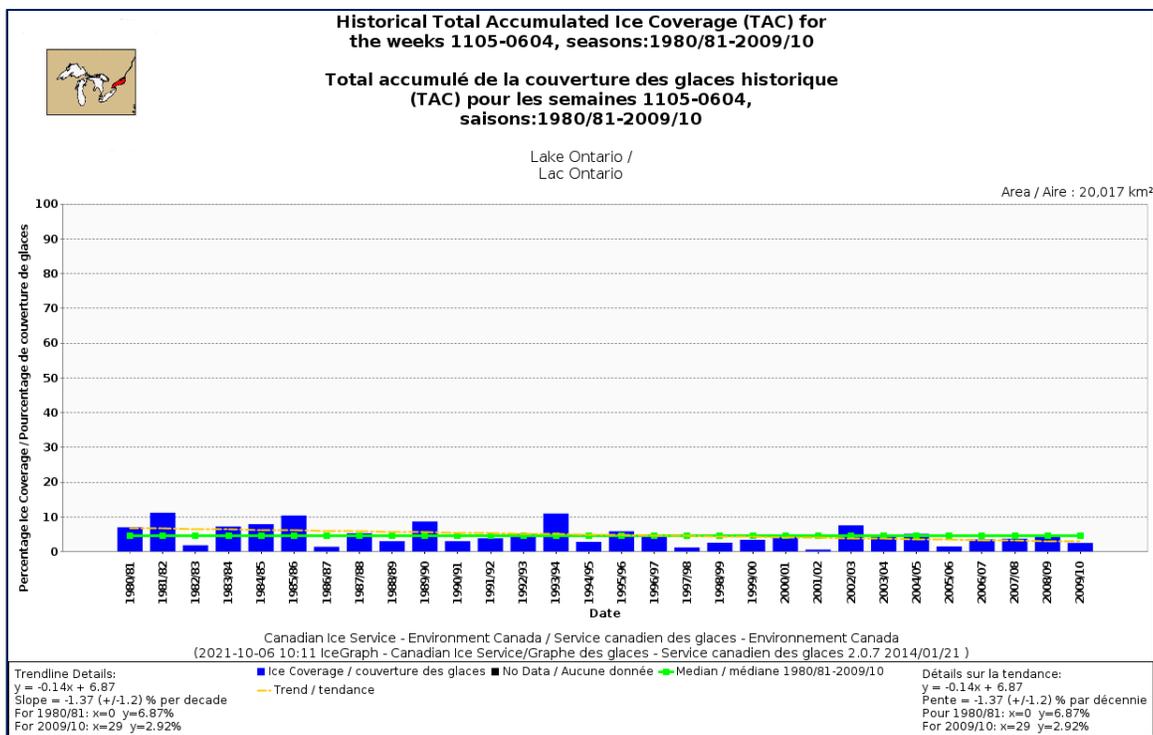


Figure H-9. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Ontario.
 La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatologiques du Service canadien des glaces d'ECCC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>].

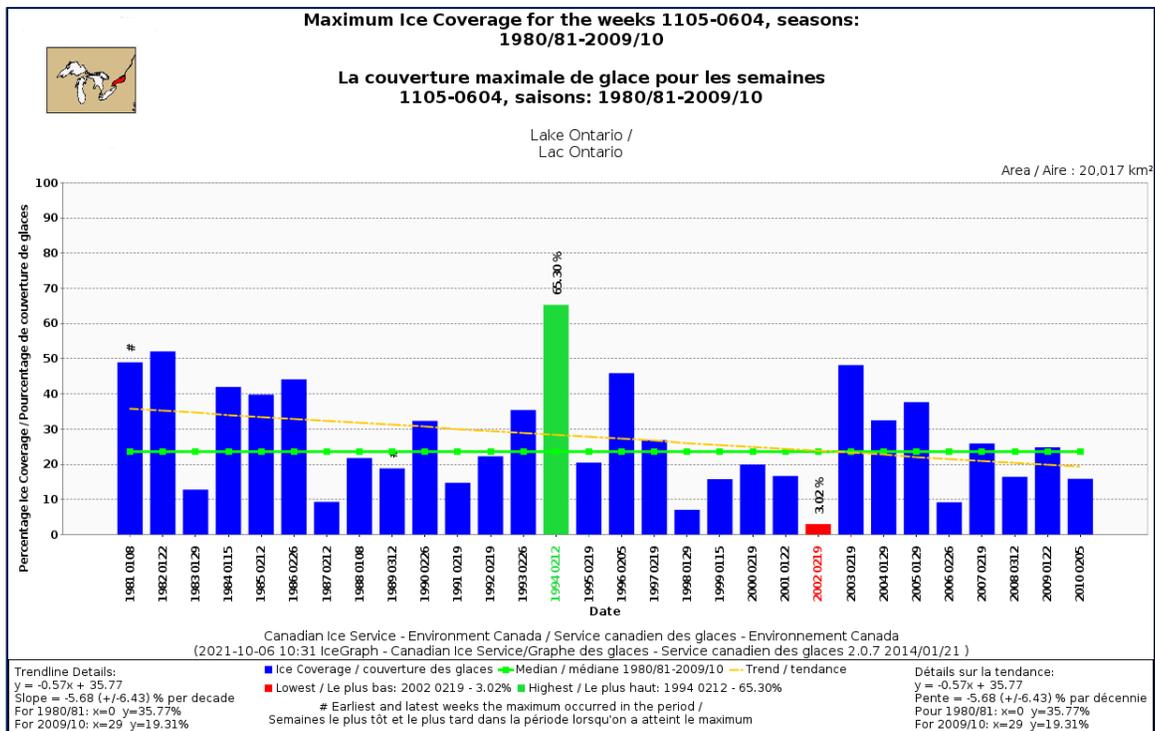


Figure H-10. Couverture de glace maximale entre le 5 novembre et le 4 juin pour chaque année de la période 1981-2010 pour le lac Ontario.

Les dates en abscisse indiquent la semaine durant laquelle la couverture de glace a atteint son maximum. La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECSC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>].

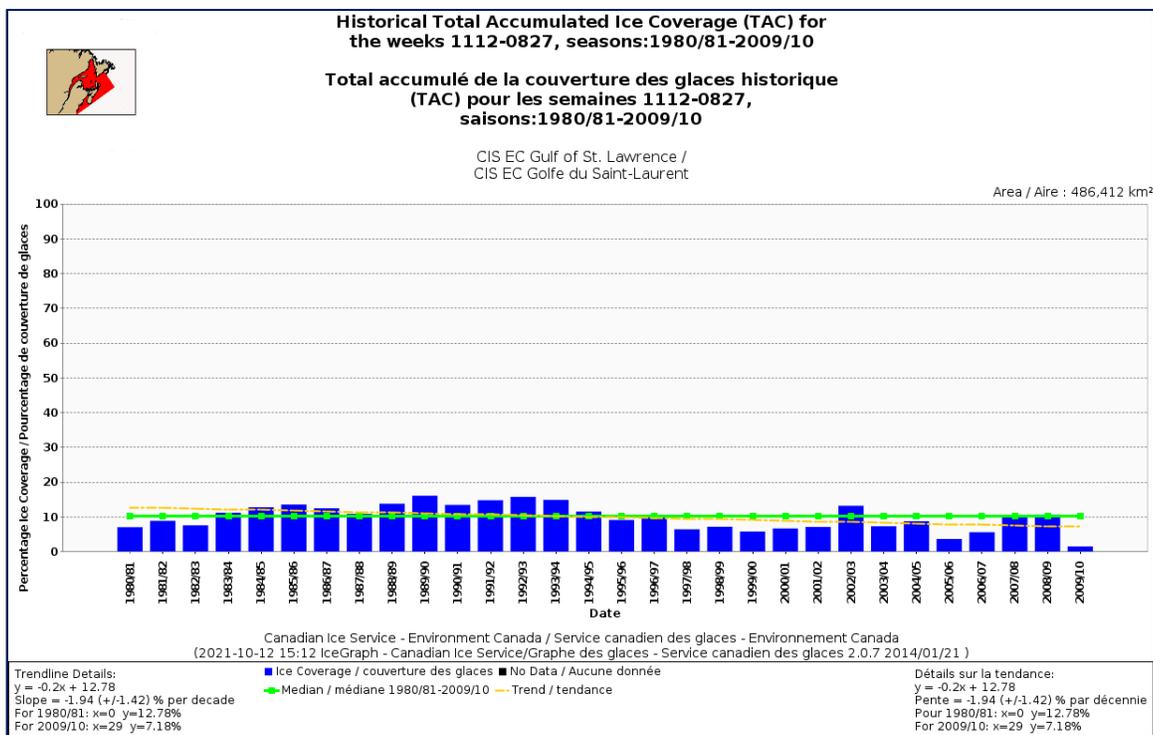


Figure H-11. Total accumulé de la couverture des glaces entre le 12 novembre et le 27 août pour chaque année de la période 1981-2010 pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatologiques du Service canadien des glaces d'ECSC

[\[https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml\]](https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml).

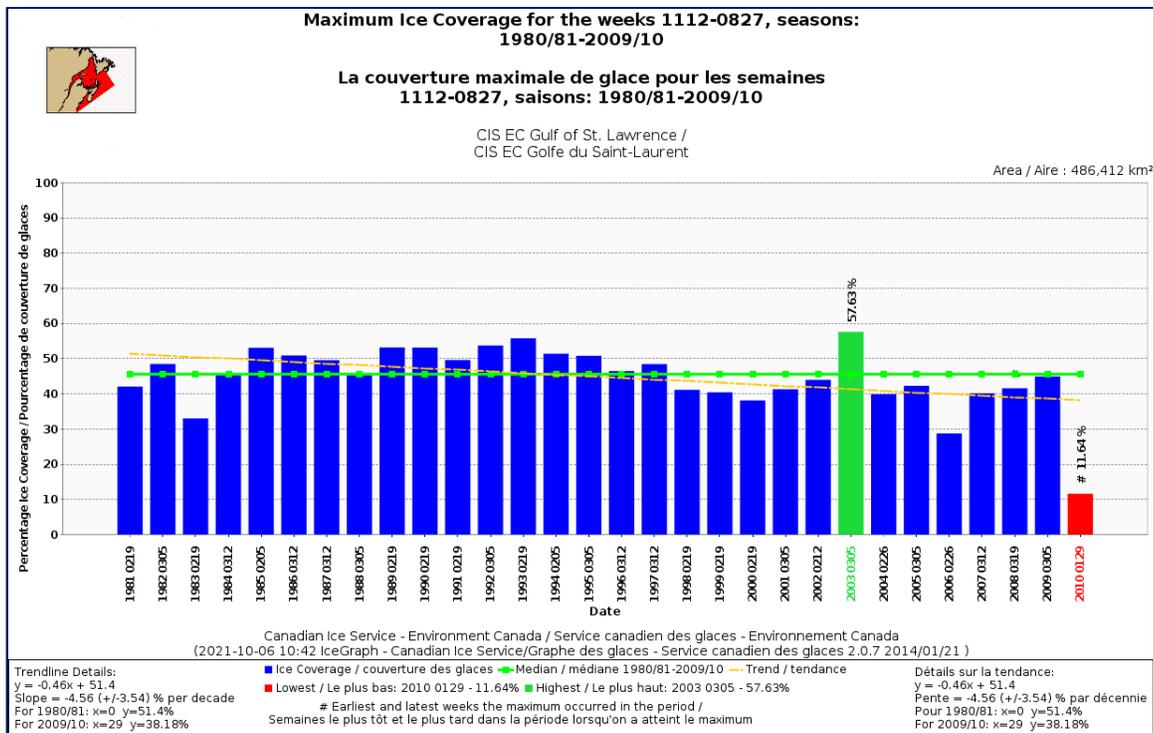


Figure H-12. Couverture de glace maximale entre le 12 novembre et le 27 août pour chaque année de la période 1981-2010 pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

Les dates en abscisse indiquent la semaine durant laquelle la couverture de glace a atteint son maximum. La ligne verte représente la médiane tandis que la ligne jaune correspond à la tendance pour la période. Produit grâce à l'application web et la base de données climatiques du Service canadien des glaces d'ECCC [<https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/IceGraph/page2.xhtml>].



550 SHERBROOKE OUEST, TOUR OUEST, 19^e ÉTAGE, MONTRÉAL, QC, CANADA, H3A 1B9 | TÉLÉPHONE 514 282.6464 | TÉLÉCOPIEUR 514 282.7131 | WWW.OURANOS.CA