

Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques



Évaluation des effets des changements climatiques sur les données de conception climatique au Canada



Auteurs: Alex J. Cannon, Dae Il Jeong, Xuebin Zhang et Francis W. Zwiers

Collaborateurs: Charles L. Curry, Guilong Li, Hui Wan, Chao Li, Vivek K. Arora, Trevor Q. Murdock,

Stephen R. Sobie, et Bárbara Tencer

Réviseur : Francis W. Zwiers

Révision externe : Groupe de travail sur les données et les charges climatiques du Conseil

national de recherches

No de cat. : En4-415/2020F-PDF ISBN : 978-0-660-36479-7

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

Environnement et Changement climatique Canada Centre de renseignements à la population 12º étage, édifice Fontaine 200, boulevard Sacré-Cœur Gatineau (Québec) K1A 0H3 Téléphone: 819-938-3860

Ligne sans frais: 1-800-668-6767 (au Canada seulement)

Courriel: ec.enviroinfo.ec@canada.ca

Photo: © Getty Images

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'Environnement et du Changement climatique, 2020

Also available in English

CONTEXTE

De nombreux aspects de l'infrastructure du Canada sont directement touchés par la variabilité et les changements du climat. Les observations fournissent des données sur le climat historique et constituent donc la base de référence à laquelle on compare les changements futurs. Dans le cadre des contributions Environnement et Changement climatique Canada (d'ECCC) aux normes et aux codes canadiens, ces données historiques ont été fournies par le Service météorologique du Canada dans ses mises à jour régulières des données historiques de conception climatique. En revanche, la Division de la recherche climatique (DRC) de la Direction générale des sciences et de la technologie (DGST) d'ECCC se concentre sur les données relatives aux changements climatiques futurs, nécessaires pour évaluer les répercussions d'un climat changeant et planifier les mesures d'adaptation. Ces données ne peuvent être obtenues de manière fiable par l'analyse de données historiques et l'extrapolation des tendances observées. Les données quantitatives sur les changements climatiques futurs concernant les bâtiments et les infrastructures publiques de base (BIPB) du Canada nécessitent plutôt des projections axées sur des modèles climatiques et sur une série de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. La crédibilité des résultats des modèles climatiques diffère pour chaque variable de conception climatique et, par conséquent, les projections de changements dans chaque type de valeur de conception climatique doivent être accompagnées d'une évaluation des limites du modèle et d'une évaluation de l'incertitude. La mise au point et la communication des projections climatiques futures, et de leur incertitude, en rapport avec les codes et les normes, de la fin du 20e siècle à la fin du 21e siècle, sont les sujets de ce projet. La DRC d'ECCC, en collaboration avec le Pacific Climate Impact Consortium et le Conseil national de recherches, a entrepris cette activité pour soutenir le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques et appuyer les objectifs des Infrastructures vertes du gouvernement fédéral.

SURVOL DU RAPPORT

Le rapport fournit une évaluation de la manière dont les données de conception climatique pertinentes pour le Code national du bâtiment du Canada (CNBC 2015, tableau C-2) et le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CHBDC/CSA S6 2014, annexe A3.1) pourraient changer à mesure que le climat continue de se réchauffer. L'approche adoptée dans ce rapport repose sur une évaluation de la compréhension actuelle des changements climatiques à partir d'évaluations nationales et internationales, ainsi que d'autres documents pertinents, et est complétée par les efforts de recherche en cours au sein de la DRC d'ECCC et ailleurs, ainsi que par des recherches ciblées menées expressément pour ce projet. Les décisions relatives à la conception doivent toujours être prises en tenant compte des normes et des codes appropriés. Il importe de souligner qu'il incombe aux utilisateurs de déterminer la pertinence des données climatiques pour l'usage prévu.

Le chapitre 2 fournit des renseignements de base sur la modélisation climatique et une description générale des modèles et des méthodes utilisés pour élaborer et évaluer les projections pour chaque variable de conception climatique. Ce chapitre comprend un exemple concret de changement de la température annuelle moyenne, rassemblant l'évaluation scientifique et les projections quantitatives des modèles climatiques pour suggérer une approche possible de l'ajustement des données de conception futures qui tient compte du degré de confiance dans les changements projetés que la science permet. Par la suite, les chapitres 3 à 6 appliquent cette approche à chacune des quatre grandes catégories de variables de conception climatique des BIPB (température, précipitations et humidité, vent, et neige et glace). L'annexe 1 comprend des tableaux des changements prévus pour chaque variable de conception climatique pour différents niveaux de réchauffement climatique

(de +0,5 °C à +3,5 °C au-dessus de la température moyenne mondiale de 1986 à 2016¹). Les scénarios décrivant la manière dont les données de conception futures peuvent changer par rapport à la période 1986-2016 sont présentés sous forme de tableaux pour des localités similaires à celles du tableau C-2 du CNBC et sont accompagnés d'évaluations de la confiance et d'indications de l'incertitude des projections, comme le montrent les références aux sections spécifiques des chapitres 3 à 6.

Il est important de noter que les évaluations contenues dans ce rapport sont faites de l'échelle régionale à nationale. Bien que des projections propres à chaque site soient proposées dans tous les cas, le degré de confiance lié aux données se rapportant à chaque site doit être estimé inférieur à celui des évaluations à l'échelle régionale à nationale. En outre, le degré de confiance varie considérablement entre les différents types de données de conception, si bien que de nombreuses projections peuvent ne pas convenir à une application directe, mais être plutôt utilisées pour des évaluations de la résilience et des risques qui tiennent compte de conditions climatiques futures physiquement plausibles. Le chapitre 7, qui résume les principales conclusions du projet, comprend donc également des suggestions sur la manière dont les projections pourraient être utilisées lors de l'examen de l'impact des changements climatiques sur les variables de conception climatiques des BIPB du Canada. Enfin, l'annexe 2 comprend des liens vers des articles publiés associés à des recherches ciblées menées dans le cadre de ce projet.

¹ Notez que le réchauffement planétaire mentionné dans ce rapport est référencé par rapport à une période récente de 31 ans, soit de 1986 à 2016, plutôt que par rapport à une période antérieure comme 1851-1900, comme l'utilise le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, ou par rapport à une période « préindustrielle », généralement considérée comme 1750, comme le mentionne la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Les compensations peuvent être utilisées pour associer les niveaux de réchauffement qui sont exprimés par rapport à différentes périodes de référence. Ce rapport utilise une période de base récente, car les données de conception présentées dans le CNBC de 2015 et le CHBDC de 2014 reposent en général sur des observations instrumentales récentes. En outre, les observations des dernières décennies sont généralement plus complètes que celles des périodes préindustrielles ou industrielles antérieures, et aucune simulation des changements climatiques utilisée dans ce rapport pour projeter les changements possibles des valeurs de calcul ne s'applique aux périodes antérieures à 1951.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION
1.1	Contexte
1.2	Approche de l'évaluation des changements prévus de la valeur de la conception en fonction du climat
2.	CONTEXTE ET MÉTHODES
2.1	Modèles climatiques
2.2	Formulation de projections sur les changements climatiques
2.3	Communication de l'incertitude
2.4	Recherche ciblée
2.5	Lignes directrices et recommandations
2.6	Exemple – Température annuelle moyenne
3.	TEMPÉRATURE
3.1	Degrés-jours de chauffage, températures de conception et températures moyennes quotidiennes minimales et maximales
4.	PRÉCIPITATIONS ET HUMIDITÉ42
4.1	Précipitations et pluies totales annuelles
4.2	Pluies d'une journée et pluies de 15 minutes
4.3	Humidité relative annuelle
5.	PRESSIONS DU VENT
5.1	Pressions horaires du vent
5.2	Pression de la pluie chassée par le vent
6.	NEIGE ET GLACE
6.1	Charges de neige
6.2	Charges d'accumulation de glace
6.3	Pergélisol83
7.	RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS98
7.1	Température
7.2	Précipitations et humidité99
7.3	Vent
7.4	Neige et glace
7.5	Conclusions et voie à suivre
RÉFÉ	ÉRENCES
Anne	exe 1.1 : Déroulement du réchauffement planétaire112
Anne	exe 1.2 : Changements projetés
Anne	exe 2 : Liens vers les publications

LISTE DES ABRÉVIATIONS

```
BIPB – Bâtiments et infrastructures publiques de base
CanAM4 - Modèle atmosphérique canadien (CCmaC), version 4
CanESM2 - Modèle canadien du système terrestre (CCmaC), version 2
CanRCM4 - Modèle régional canadien du climat (CCmaC), version 4
CC - Clausius-Clapeyron
CCmaC – Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique
CGCM3 - Modèle couplé canadien du climat mondial, version 3
CHBDC - Code canadien sur le calcul des ponts routiers (Canadian Highway Bridge Design Code)
CLASS – Schéma canadien de surface terrestre (Canadian Land Surface Scheme)
CMIP - Projet de comparaison de modèles couplés (Coupled Model Intercomparison Project)
(phase 3, CMIP3; et phase 5, CMIP5)
CNBC - Code national du bâtiment du Canada
CNRC - Conseil national de recherches du Canada
CORDEX - Expérience régionale coordonnée de réduction d'échelle (Coordinated Regional
Downscaling Experiment)
CRCM5 - Modèle régional canadien du climat, version 5
CV - Coefficient de variation, rapport entre l'écart type et la moyenne d'une série chronologique
de valeurs maximales annuelles
DRC – Division de la recherche climatique
ECCC - Environnement et Changement climatique Canada
ECN - Étendue de la couverture neigeuse
EEN - Équivalent en eau de la neige
MST - Modèle du système terrestre (Earth System Model)
GEM - Modèle global environnemental multiéchelle
GES - Gaz à effet de serre
GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HRCONUS – High-resolution Contiguous United States
IDF - Intensité-durée-fréquence
```

IGS - Indice de gel de surface

IPA - International Permafrost Association

LE – Grand ensemble (*Large Ensemble*)

MCM – Modèle climatique mondial

MCR - Modèle climatique régional

NARCCAP - North American Regional Climate Change Assessment Program

PCIC - Pacific Climate Impacts Consortium

PPCV – Pression de la pluie chassée par le vent

PV – Précipitations verglaçantes

Rapport bruit/signal (rapport B/S) – mesure de la dispersion de l'ensemble, divisée par l'ampleur de la variation projetée (*NS ratio – noise-to-signal ratio*)

RCP - Profil représentatif d'évolution de concentration (Representative Concentration Pathway)

SRES – Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (*Special Report on Emissions Scenarios*)

T850 – Température de l'air à 850 hPa

Ts - Température de l'air près de la surface

WRF – Weather Research and Forecasting Model

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Les changements climatiques représentent un énorme défi à long terme pour tous les pays. Ils constituent une réelle menace aux bâtiments et infrastructures publiques de base (BIPB) du Canada, qui incluent les bâtiments, les ponts, les routes, les réseaux de transports en commun, l'eau potable, les eaux pluviales et les réseaux d'égouts sanitaires. La menace comporte la possibilité d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité de certains phénomènes météorologiques extrêmes, comme les tempêtes de pluie et les inondations, et d'autres dangers qui pourraient occasionner des dommages aux infrastructures ou la défaillance de celles-ci. Les approches actuelles utilisées pour la conception et la réfection des BIPB du Canada ont des limites, car elles sont basées sur les charges climatiques historiques. Ces charges pourraient ne pas être représentatives de celles qui pourraient être subies dans un climat futur, plus chaud. Le fait de ne pas tenir compte de l'évolution des charges climatiques pourrait par conséquent mener à une défaillance prématurée plus fréquente des éléments des BIPB du Canada. Les conséquences des défaillances des infrastructures peuvent être très lourdes et comprendre notamment des décès, des blessures et des maladies, des interruptions ou des pertes de service, une augmentation des coûts pour les propriétaires des infrastructures, des coûts imprévus pour les utilisateurs des infrastructures et des répercussions socio-économiques négatives considérables pour les administrations municipales, provinciales ou territoriales et fédérales.

Le risque de défaillance de l'un des systèmes mentionnés ci-dessus dépend tant des charges exercées sur le système que de sa résistance aux charges. Ces deux paramètres sont tributaires du climat par l'intermédiaire de facteurs appelés charges climatiques, notamment celles dues à la température, à la pluie, à la neige, au vent, à la glace, etc. Les systèmes des BIPB sont généralement conçus pour une longue durée de vie qui peut varier de 50 à 100 ans; ils seront donc exposés à des charges climatiques variables au cours de leur vie utile. Il est donc nécessaire d'évaluer les projections de la manière dont les chargements climatiques pourraient avoir une incidence sur les charges climatiques futures.

En gardant cela à l'esprit, le présent chapitre commence avec un résumé de l'état actuel des connaissances sur les changements observés et prévus de la température, des précipitations et de la cryosphère au Canada. Ces renseignements sont extraits d'une évaluation exhaustive effectuée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) dans le cadre du *Rapport sur le climat changeant au Canada* (RCCC) :

Bush, E. et Lemmen, D.S., éditeurs : *Rapport sur le climat changeant du Canada*, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2019, 446 p. https://changingclimate.ca/CCCR2019/fr/

Les principales conclusions du RCCC fournissent le contexte pour le reste du présent rapport, qui présente une évaluation de la façon dont les données de conception en fonction du climat pertinentes pour le développement des BIPB du Canada pourraient changer à mesure que le climat continue de se réchauffer.

Température

Il est *quasiment certain*² que le climat du Canada s'est réchauffé et qu'il se réchauffera davantage. Les augmentations observées et prévues de la température moyenne au Canada sont environ deux fois plus importantes que les augmentations correspondantes de la température moyenne mondiale, quel que soit le scénario d'émission.

Les températures moyennes annuelles et saisonnières ont augmenté partout au Canada, et le réchauffement le plus important s'est produit en hiver. Entre 1948 et 2016, la meilleure estimation de l'augmentation de la température moyenne annuelle est de 1,7 °C pour l'ensemble du Canada et de 2,3 °C pour le Nord du pays.

Bien que les activités humaines et les variations naturelles du climat aient contribué au réchauffement observé au Canada, le facteur humain est dominant. Il est *probable* que plus de la moitié du réchauffement observé au Canada soit due à l'influence des activités humaines.

Les températures moyennes annuelles et saisonnières devraient augmenter partout, les changements beaucoup plus importants se produisant dans le Nord du Canada en hiver. En moyenne dans tout le pays, le réchauffement prévu dans un scénario de faibles émissions est supérieur d'environ 2 °C à celui de la période de référence de 1986-2005 utilisée dans le RCCC, et demeurera relativement stable après 2050, tandis que dans un scénario d'émissions élevées, les augmentations de température se poursuivront, atteignant plus de 6 °C d'ici la fin du XXIe siècle.

Le réchauffement futur sera accompagné d'une saison de croissance plus longue, de moins de degrés-jours de chauffage, et de plus de degrés-jours de climatisation.

Les changements dans les températures extrêmes, tant dans les observations que dans les projections, concordent avec le réchauffement. Les températures extrêmement élevées sont devenues plus élevées, tandis que les températures extrêmement basses sont devenues moins basses. De tels changements devraient se poursuivre, l'ampleur des changements étant proportionnelle à l'ampleur de la variation de la température moyenne.

Précipitations

Le degré de confiance est *moyen* quant au fait que les précipitations moyennes annuelles aient augmenté, en moyenne, au Canada, et les augmentations en pourcentage sont plus importantes dans le Nord du pays. Ces augmentations concordent avec les simulations modélisées des changements climatiques anthropiques.

Les précipitations annuelles et hivernales devraient augmenter partout au Canada au cours du XXI^e siècle, et les variations en pourcentage seront plus importantes dans le Nord du pays. Les précipitations estivales devraient diminuer dans le Sud du Canada vers la fin du XXI^e siècle dans un scénario d'émissions élevées, mais seuls de petits changements sont prévus dans un scénario de faibles émissions.

Pour l'ensemble du Canada, il n'y a pas de données d'observation sur les changements relatifs aux précipitations extrêmes quotidiennes et de courtes durées. Cependant, à l'avenir, les précipitations quotidiennes extrêmes devraient augmenter (degré de confiance *élevé*).

² Tant le *Rapport sur le climat changeant du Canada* que le présent rapport utilisent le même langage calibré pour exprimer l'incertitude que le 5° *rapport d'évaluation* du GIEC (voir Mastrandrea et coll., 2011). Les cinq termes suivants sont utilisés pour exprimer les degrés de confiance évalués dans les conclusions selon la disponibilité, la qualité et le degré d'accord des données probantes : *très faible, faible, moyen, élevé, très élevé*. Les évaluations de probabilité quantifiées sont effectuées lorsque le degré de confiance est *élevé* ou *très élevé* et que les données probantes disponibles sont d'un type qui permet une telle quantification. Les termes suivants sont utilisés pour exprimer les probabilités évaluées des résultats : *quasiment certain* (probabilité de 99 à 100 %), *extrêmement probable* (probabilité de 95 à 100 %), *très probable* (probabilité de 90 à 100 %), *improbable* (probabilité de 0 à 33 %), *très improbable* (probabilité de 0 à 10 %), *extrêmement improbable* (probabilité de 0 à 1 %). Le langage calibré exprimant l'incertitude est mis en italique lorsqu'utilisé dans le texte.

Neige et glace

La saison de couverture neigeuse a diminué de 5 à 10 % par décennie depuis 1981 sur la majeure partie du territoire canadien, en raison de l'arrivée tardive de la neige et de la fonte printanière précoce (degré de confiance *très élevé*). L'accumulation de neige saisonnière a également diminué de 5 à 10 % par décennie, à l'exception du Sud de la Saskatchewan et de certaines parties de l'Alberta et de la Colombie-Britannique (augmentation de 2 à 5 % par décennie) [degré de confiance *moyen*].

Il est *très probable* que la durée de la couverture neigeuse diminuera d'ici le milieu du siècle au Canada en raison de l'augmentation de la température de l'air en surface dans tous les scénarios d'émissions. Des différences se manifestent dans les projections de couverture neigeuse printanière dans les scénarios d'émissions d'ici la fin du siècle. On note une perte stable de couverture neigeuse dans un scénario d'émissions modérées, mais une perte constante dans un scénario d'émissions élevées. On prévoit une réduction de 5 à 10 % par décennie dans l'accumulation saisonnière de neige (jusqu'en 2050) dans une bonne partie du Sud du Canada; seuls des petits changements dans l'accumulation de neige sont prévus dans les régions du Nord du Canada, car des augmentations dans les précipitations hivernales devraient compenser une période plus courte d'accumulation de neige (degré de confiance *moyen*).

Les observations montrent des augmentations dans la température du pergélisol (0,1 °C par décennie dans le centre de la vallée du Mackenzie; de 0,3 à 0,5 °C par décennie dans le Haut-Arctique, au cours des trois ou quatre dernières décennies) et dans l'épaisseur de la couche active (environ 10 % depuis 2000 dans la vallée du Mackenzie) [degré de confiance *élevé*]), et la formation généralisée d'un relief de thermokarst dans le Nord du Canada (degré de confiance *moyen*).

Il est *quasiment certain* que les hausses prévues de la température moyenne de l'air sur les terres qui reposent sur du pergélisol dans tous les scénarios d'émissions entraîneront un réchauffement et un dégel continus du pergélisol dans de vastes régions d'ici le milieu du siècle; cela aura des répercussions sur les infrastructures du Nord et sur le rôle des écosystèmes terrestres du Nord dans le cycle du carbone.

1.2 Approche de l'évaluation des changements prévus de la valeur de la conception en fonction du climat

L'objectif de ce rapport est d'évaluer, à une échelle régionale à nationale, les changements prévus dans les données de conception en fonction du climat qui sont définies dans le Code national du bâtiment du Canada (CNBC) 2015 (Conseil national de recherche du Canada [CNRC], 2015) et dans la norme CSA S6 du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CHBDC-CSA-S6) [CSA, 2014] – ce sont les données qui sont largement utilisées par les ingénieurs pour calculer les charges climatiques ayant une incidence sur les BIPB du Canada.

Le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) présente une évaluation scientifique détaillée des tendances historiques et de l'état futur prévu de la température de surface, des précipitations et de la cryosphère au Canada. Dans de nombreux cas, les quantités précises évaluées dans le RCCC sont les mêmes que les variables de conception en fonction du climat requises pour les codes et normes d'infrastructure, par exemple les degrés-jours de chauffage, les précipitations annuelles totales et la quantité de pluie reçue en une journée. De façon plus générale, le Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) mène régulièrement des évaluations scientifiques exhaustives de la compréhension actuelle des bases scientifiques physiques des changements climatiques mondiaux et régionaux, récemment résumés dans le 5e rapport d'évaluation du Groupe de travail I du GIEC (GIEC, 2013)³.

L'approche adoptée dans le présent rapport est fondée, avant tout, sur une évaluation de la compréhension actuelle des changements climatiques à partir de ces évaluations nationales et internationales, ainsi que d'autres documents pertinents. Cette évaluation est complétée par les efforts de recherche continus au sein de la Division de la recherche climatique (DRC) d'ECCC ainsi qu'ailleurs, et par les recherches ciblées menées particulièrement pour ce projet.

³ Le 6^e rapport d'évaluation devrait être publié en 2021-2022.

Comme l'indiquent les principales conclusions du RCCC, la confiance scientifique dans les projections sur les changements climatiques varie en fonction de la variable climatique, dans certains cas, de la région. Par exemple, le degré de confiance associé à l'évolution de la température est plus élevé que le degré de confiance associé à l'évolution des précipitations, en grande partie parce que l'évolution de la température est une conséquence directe du déséquilibre radiatif associé à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols. D'autre part, l'évolution des précipitations est influencée par un certain nombre de processus complexes, y compris les augmentations de la capacité de rétention d'eau d'une atmosphère en réchauffement, les changements dans la circulation atmosphérique mondiale, les interactions avec la topographie, les changements dans l'évaporation, etc. En outre, le degré de confiance associé aux changements dans les événements composés, qui mettent en jeu de multiples variables (p. ex., les charges de neige et les pressions du vent et de la pluie battante), est plus bas que pour les variables individuelles des composants. Étant donné les degrés variables d'amélioration des connaissances scientifiques sur les différents éléments de conception en fonction du climat pertinents à la conception des BIPB, nous adoptons une approche à niveaux multiples en ce qui concerne la projection des changements de valeur de conception.

Dans la poursuite des objectifs de ce rapport, les variables de conception en fonction du climat ont été regroupées en trois niveaux en fonction de notre confiance dans leurs projections pour de grandes régions du Canada, sur la base des jugements sur les données disponibles, y compris les documents publiés tant au Canada qu'à l'étranger, et complétés par les données provenant de recherches ciblées basées sur les simulations du modèle climatique canadien.

Les variables de niveau 1 sont celles pour lesquelles il existe généralement un degré de confiance élevé ou très élevé dans les projections pour un niveau donné de réchauffement planétaire. Ce niveau de confiance est assuré par une compréhension approfondie des processus en jeu, ainsi que par des données solides et abondantes (y compris des données sur d'autres régions du monde) qui portent sur les causes des changements observés. Cela implique un degré relativement élevé de confiance dans les facteurs de changement projetés pour ces variables, ce qui suggère que les valeurs précises de ces facteurs de changement pourraient être prises en considération dans la conception d'une nouvelle infrastructure si cela est justifié selon une perspective d'ingénierie, et si des approches convenables existent pour tenir compte des incertitudes qui persistent, y compris l'incertitude relative à l'ampleur du réchauffement qui pourrait avoir lieu d'ici la fin de la vie utile de la structure qui est conçue.

Les variables de niveau 2 sont celles pour lesquelles il y a généralement un degré de confiance *moyen* dans les projections pour un niveau donné de réchauffement planétaire. Dans la plupart des cas, une évaluation de degré de confiance *moyen* signifie qu'il y a une certaine compréhension des processus qui mènent à des changements futurs. Cette compréhension pourrait être complétée par des données qui relient les causes des changements observés à grande échelle, mais en général, ces données seraient beaucoup moins abondantes, les études disponibles montrant un degré de cohérence moindre que pour les variables de niveau 1. Contrairement aux situations où les climatologues ont un degré de confiance *élevé* ou *très élevé*, les climatologues ne sont généralement pas en mesure d'estimer la probabilité d'un changement prévu lorsqu'ils déterminent qu'ils ont un degré de confiance *moyen* dans les projections. Les facteurs de changement pour ces variables conviennent donc davantage aux analyses coûtsavantages ou à une analyse des risques, ainsi qu'à l'étude de l'incertitude associée à la conception.

Les variables de niveau 3 sont celles pour lesquelles le degré de confiance dans les projections est faible ou très faible pour un niveau donné de réchauffement planétaire. Un degré de confiance faible ou très faible est accordé aux projections pour les variables qui n'ont pas été largement étudiées dans la documentation publiée ou pour lesquelles les processus en jeu sont mal compris. Dans certains cas, un degré de confiance très faible est accordé aux projections pour des variables qui sont diagnostiquées indirectement, par exemple, en utilisant des relations empiriques parce que la compréhension des processus est limitée. Bien que les facteurs de changement soient projetés, ils sont probablement les mieux adaptés à l'étude des répercussions potentielles des changements climatiques sur la fiabilité structurelle dans différents scénarios de réchauffement et de combinaisons de charges.

Les variables de conception en fonction du climat précises du CNBC (CNRC, 2015) et du CHBDC (CSA S6, 2014) abordées dans le présent document, ainsi que leurs regroupements en niveaux, sont les suivantes :

Chapitre 3 – Température

- Degrés-jours de chauffage (CNBC, niveau 1)
- Températures de conception horaires (2,5° percentile de janvier au thermomètre sec, 1° percentile de janvier au thermomètre sec, 2,5° percentile de juillet au thermomètre sec, et 2,5° percentile de juillet au thermomètre humide) [CNBC, niveau 1]
- Températures moyennes quotidiennes maximales et minimales de l'air (CHBDC, niveau 1)

Chapitre 4 - Précipitations et humidité

- Précipitations totales annuelles et chutes de pluie totales annuelles (CNBC, niveau 2)
- Quantité maximale annuelle de pluie en une journée (période de récurrence de 50 ans)
 [CNBC, niveau 2]
- Chutes de pluie maximales annuelles en 15 minutes (période de récurrence de 10 ans)
 [CNBC, niveau 2]
- Humidité relative moyenne annuelle (CNBC et CHBDC, niveau 3)

Chapitre 5 - Vents

- Pressions horaires maximales annuelles du vent (périodes de récurrence de 10, 25, 50 et 100 ans) [CNBC et CHBDC, niveau 3]
- Pressions maximales annuelles du vent de pluie battante (période de récurrence de 5 ans)
 [CNBC, niveau 3]

Chapitre 6 – Neige et glace

- Charge de neige maximale annuelle (période de récurrence de 50 ans) [CNBC, niveau 3]
- Accumulation maximale annuelle de glace sur des surfaces exposées (CHBDC, période de récurrence de 20 ans) [niveau 3]
- Région de pergélisol (CHBDC, niveau 3)

L'interprétation des modifications de la valeur de conception prévue doit toujours tenir compte du degré de confiance scientifique dans les projections. Il convient de noter que le degré de confiance diminue à mesure que les projections deviennent plus précises. Par exemple, un degré de confiance plus faible est associé à des projections locales ou propres à un site plutôt qu'à des projections régionales, nationales ou mondiales correspondantes. Cela s'explique par le fait que les projections à l'échelle locale sont beaucoup plus susceptibles d'être touchées par une connaissance incomplète des processus et par des erreurs dans l'approximation des effets des processus que les modèles climatiques ne peuvent pas représenter explicitement. De plus, un degré de confiance plus élevé peut souvent être associé à la direction d'un changement prévu plutôt qu'à son ampleur.

Une évaluation scientifique de la science du climat actuelle, une description des recherches ciblées, des simulations de modèles climatiques, ainsi que des évaluations associées aux projections tabulées et cartographiées des changements climatiques sont données dans les chapitres suivants pour chacune des quatre principales catégories de variables. Reconnaissant que les analyses de risques et l'étude des voies potentielles de défaillance structurelle future peuvent nécessiter des renseignements

sur les changements possibles dans les distributions des valeurs extrêmes, les changements prévus dans les paramètres de distributions de valeurs extrêmes sont fournis comme documentation complémentaire pour certaines variables.

Les renseignements quantitatifs sur les changements climatiques futurs pertinents aux BIPB dépendent d'une combinaison de connaissances sur les processus physiques et de la modélisation climatique; par conséquent, le chapitre 2 examine d'abord les modèles climatiques et les sources d'incertitude dans la modélisation climatique, et il décrit comment l'incertitude est communiquée dans les projections de modèles climatiques.

Les variables climatiques pertinentes aux BIPB couvrent une vaste gamme d'échelles de temps, des extrêmes de moins d'une heure aux quantités moyennes annuelles. Dans certains cas, la littérature existante ne fournit pas suffisamment de renseignements pour éclairer une évaluation des projections des changements climatiques pour toutes les variables de conception en fonction du climat requises du CNBC et du CHBDC. Ainsi, l'évaluation globale intègre des résultats de recherches ciblées, menées dans le cadre du présent projet, au moyen d'extrants provenant d'un vaste ensemble de simulations climatiques régionales exécutées par le Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatiques (CCmaC) de la DRC. Cette recherche peut représenter la seule source de renseignements précis sur les changements prévus pour certaines données de conception en fonction du climat, et ainsi, les résultats devraient être considérés comme ayant un degré de confiance faible ou très faible, quelle que soit leur spécificité, puisqu'une évaluation ayant un degré de confiance plus élevé doit attendre l'achèvement, la publication et l'évaluation d'un ensemble plus vaste de recherches connexes. À la suite de l'examen de la modélisation climatique, le chapitre 2 décrit donc également l'ensemble de modèles climatiques du CCmaC utilisés pour soutenir ce projet.

Enfin, le chapitre 2 décrit les méthodes utilisées pour élaborer les projections pour chacune des variables de conception en fonction du climat. Ces méthodes comprennent un exercice pratique pour la variation de la température moyenne annuelle, qui réunit les évaluations scientifiques et les projections quantitatives de modèles climatiques utilisées afin de guider l'élaboration de conseils et de recommandations. Par la suite, les chapitres 3 à 6 appliquent cette approche pour fournir une orientation pour chacune des quatre grandes catégories de variables de conception en fonction du climat (température, précipitations et humidité, vents, neige et glace).

Comme décrit au chapitre 2 et évalué aux chapitres 3 à 6, l'annexe 1 inclut des tableaux des changements prévus pour chaque variable de conception en fonction du climat sous différents niveaux de réchauffement planétaire. Les changements tabulés sont fournis pour des emplacements similaires à ceux précisés dans le tableau C-2 du CNBC et sont accompagnés d'indications sur l'incertitude de projection, comme le montrent les références à des sections précises des chapitres 3 à 6. Ce qui importe, c'est que les tableaux pour une valeur de conception donnée sont basés sur des projections de changements qui ont été évaluées à un degré de confiance donné pour la direction, le schéma et l'ampleur globale du changement sur la base de données à l'appui et la compréhension des processus. Ces évaluations sont conçues pour les changements qui se produisent à l'échelle régionale ou nationale. Les données propres à chaque emplacement doivent être considérées comme ayant un degré de confiance plus faible. Les applications convenables pour ces données dépendront fortement du degré de confiance. Dans certains cas, il pourrait être raisonnable de prendre en considération des données précises dans le calcul de charges futures tout en étant au fait des incertitudes qui persistent et de la gamme des niveaux de réchauffement possibles, tandis que dans les cas présentant un degré de confiance plus faible, les données précises sont peut-être mieux utilisées pour étudier les scénarios potentiels pour des charges futures plausibles et pour mener des analyses de risques.

Le chapitre 7 résume les principales conclusions du projet et les évaluations pour les variables de conception en fonction du climat des BIPB du Canada dans un contexte de changements climatiques.

Enfin, l'annexe 2 comporte des liens vers des documents publiés associés aux recherches ciblées menées dans le cadre de ce projet.

2. CONTEXTE ET MÉTHODES

Ce chapitre énonce le contexte nécessaire sur la modélisation et les scénarios climatiques (section 2.1), les projections (section 2.2) et la communication de l'incertitude (section 2.3) dans le but d'interpréter la recherche ciblée (section 2.4), ainsi que la méthode générale de formulation de lignes directrices et de recommandations (section 2.5) adoptée dans ce rapport. La dernière section (section 2.6) contient un exemple de calcul d'un changement de température annuelle moyenne, dont une description détaillée des méthodes employées pour produire des projections quantitatives, adaptées au site et régionales, ainsi que l'évaluation scientifique qui sous-tend les recommandations ultimes fournies pour cette variable climatique.

2.1 Modèles climatiques

2.1.1 Rôle

Pour pouvoir établir des projections climatiques crédibles à l'échelle régionale, il faut nécessairement partir des simulations de modèles climatiques du système climatique mondial. En effet, nombre des processus et rétroactions qui façonnent la réponse du système climatique à des forçages externes, comme des perturbations imposées à l'équilibre énergétique de la Terre, fonctionnent et interagissent à l'échelle mondiale. Les changements climatiques mondiaux anthropiques futurs sont forcés principalement par les émissions, qui à leur tour augmentent les concentrations atmosphériques de GES et modulent les concentrations des aérosols. Les modèles climatiques mondiaux (MCM) et les modèles du système terrestre (MST) sont des simulations informatiques du système climatique mondial qui peuvent servir à faire des projections climatiques, pour peu qu'ils reposent sur des scénarios prospectifs d'émissions de GES et d'aérosols. Les MCM représentent les processus et interactions physiques (figure 2.1a) qui se produisent entre l'atmosphère, les océans, la cryosphère (glace et neige), la surface du sol et, dans le cas des MST⁴, les cycles biogéochimiques, au moyen d'un cadre numérique et mathématique représenté sous forme de modèle informatique.

Le rythme auquel le système climatique mondial simulé répond à un scénario donné d'émissions anthropiques repose sur les émissions elles-mêmes, mais également sur la façon dont les processus qui font partie d'un MCM donné sont représentés. Ces deux types d'incertitude, soit celle attribuable à des hypothèses au sujet du **scénario** de forçage des GES et celle attribuable au **modèle** climatique et à notre connaissance des processus physiques représentés par le modèle, sont les deux principales sources d'incertitude qui doivent être communiquées dans les projections climatiques. La troisième source, **la variabilité interne**, est quant à elle quantifiable, à l'opposé de l'incertitude rattachée aux scénarios et aux modèles. La variabilité interne s'entend de la variabilité naturelle et chaotique qui se présente sous forme de conditions météorologiques et de manifestations liées à El Niño, ainsi de suite. Elle est intrinsèque au système climatique couplé et représente une source d'incertitude irréductible.

Les sections subséquentes contiennent un aperçu de l'emploi de modèles climatiques dans le but de formuler des projections climatiques mondiales et régionales. Un lien vers un document de préparation complémentaire rédigé pour un lectorat d'ingénieurs se trouve en annexe 2.1 (Arora et Cannon, 2018).

⁴ Si la majorité des modèles mondiaux incorporent maintenant la biogéochimie interactive et qu'ils sont donc classés en tant que MST, un MCM se trouve au cœur de ces modèles et sert d'hôte aux composantes additionnelles que l'on trouve dans un MST. Dans ce rapport, le terme MCM est donc employé pour décrire à la fois les MCM et MST.

2.1.2 Incertitude rattachée aux modèles

Les MCM reposent sur les principes généraux de la dynamique des fluides et de la thermodynamique; cependant, en raison de la complexité du système climatique mondial, ils sont habituellement établis en fonction d'une discrétisation spatiale relativement approximative (p. ex., dimension de maille de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres) pour qu'il soit possible d'évaluer la réponse climatique de la Terre aux changements de GES et d'autres facteurs de forçage radiatif. Si les MCM visent à modéliser une gamme de processus physiques, chimiques et biologiques à partir de principes fondamentaux, ils ne peuvent que représenter nos meilleures connaissances du fonctionnement de notre planète et de sa réponse à des facteurs externes de forçage climatique. Le véritable système climatique est hautement complexe; il demeure donc fondamentalement impossible d'en modéliser tous les processus. De nombreux processus physiques, chimiques et biologiques, habituellement ceux qui s'opèrent à de petites échelles spatio-temporelles, sont paramétrés; c'est-à-dire que leurs effets sont représentés par des estimations simplifiées, puisqu'ils ne peuvent être modélisés explicitement.

De nombreux groupes de modélisation climatique partout dans le monde effectuent des simulations avec des dizaines de MCM. Les résultats sont intégrés au Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP) du Programme mondial de recherche sur le climat (Taylor et coll., 2012; Eyring et coll., 2016). La cinquième phase du CMIP (CMIP5) sous-tendait le 5e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (GIEC, 2013) et une sixième phase (CMIP6) appuiera le 6° Rapport d'évaluation (dont la publication est prévue pour 2021-2022). Si les principes physiques sous-jacents sont les mêmes, les groupes peuvent paramétrer des processus physiques non résolus : par exemple, des représentations simplifiées des propriétés des nuages et la microphysique des nuages, de façon légèrement différente, pour que des choix puissent être faits par la suite quant à la structure du modèle (Alexander et Easterbrook, 2015) et à la résolution horizontale et verticale. Il s'ensuit que différents modèles climatiques répondent au même forçage externe de façon quelque peu différente. Par exemple, la figure 2.1b montre la résolution du modèle et la sensibilité du climat à l'équilibre, soit le changement de température moyenne mondiale à long terme associé à un doublement de la concentration de CO₂, pour 26 modèles climatiques du CMIP5. Les différences dans la rétroaction nuageuse issues de divergences qui existent entre les modèles en ce qui concerne le paramétrage des propriétés des nuages et de la microphysique expliquent la majeure partie de la variance actuelle de la sensibilité du climat (Zelinka et coll., 2017). Si la variance de la sensibilité du climat peut être réduite en principe, à mesure que notre connaissance des processus physiques et notre capacité de les représenter dans des MCM s'améliore, on considère que la diversité entre les modèles est un aspect sain de la collectivité de la modélisation climatique et que c'est une source d'incertitude dans les projections des changements climatiques à l'échelle mondiale et régionale.

2.1.3 Incertitude rattachée aux scénarios

Les MCM peuvent simuler la réponse du système climatique à des émissions de GES anthropiques, mais ils ne peuvent en revanche faire de prédictions sur les activités anthropiques à venir. Ainsi, différents scénarios de forçage, ou « voies » de concentrations futures de GES, d'aérosols et de modifications à l'aménagement du territoire doivent faire partie des intrants des MCM. Les projections décrites dans la 5° évaluation du GIEC reposent sur une gamme de scénarios de forçage, appelés « profils représentatifs d'évolution de concentration » (RCP) (Van Vuuren et coll., 2011). Les RCP ont été arrêtés au moyen d'une estimation du forçage radiatif à la fin du 21° siècle : le RCP2.6 représente une voie d'émissions faibles (c.-à-d. des émissions à peu près compatibles avec l'Accord de Paris) dont le forçage radiatif est d'environ 2,6 W/m², le RCP4.5 représente des voies de migration des émissions modestes, dont le forçage radiatif est d'environ 4,5 W/m², le RCP6.0 représente une augmentation de plus en plus importante des émissions et un forçage radiatif d'environ 6,0 W/m², et le RCP8.5 représente une voie caractérisée par une augmentation soutenue des émissions de GES qui mène à un forçage radiatif d'environ 8,5 W/m² à la fin du siècle. Pour chaque RCP, des séries temporelles complètes de gaz à effet de serre pris séparément (CO₂, CH₄, N₂O, CFC, etc.), ainsi que des émissions

de précurseurs d'aérosols et des modifications à l'aménagement du territoire, sont fournies et versées dans les MCM, qui par la suite simulent la réponse future du système climatique à ces scénarios de forçage externe, dont les rétroactions biogéochimiques⁵.

Il importe de noter qu'aucune probabilité n'est attribuable à ces scénarios de forçage futur; ils sont tous jugés plausibles, bien qu'à mesure que les émissions continuent d'augmenter, les voies de faibles émissions deviennent de plus en plus difficiles à concrétiser (p. ex., Millar et coll., 2017; Raftery et coll., 2017). Par exemple, dans le scénario de faibles émissions RCP2.6, qui cadre avec une restriction de la température mondiale à environ 2°C au-delà des conditions préindustrielles, il faudrait que les émissions mondiales de carbone atteignent leur pic presque immédiatement et qu'elles soient réduites à près de zéro bien avant la fin du siècle. La dispersion dans les RCP représente, dans une certaine mesure, notre incertitude quant à la façon dont les facteurs socioéconomiques pourraient évoluer à l'avenir, surtout la mesure dans laquelle les efforts d'atténuation des émissions sont déployés, et donc, le rythme auquel les humains continueront de moduler les changements climatiques. Afin d'échelonner l'étendue de l'incertitude dans des voies d'émissions futures, les modèles climatiques utilisent divers scénarios de forçage, afin d'obtenir un ensemble de projections climatiques.

2.1.4 Simulations historiques et variabilité interne

En plus des simulations de scénarios de forçage (p. ex., approximativement le scénario actuel jusqu'en 2100, selon différents RCP), les simulations historiques procurent de l'information sur les conditions climatiques passées et, ainsi, elles façonnent la référence par rapport à laquelle les changements futurs sont comparés. Les simulations historiques servent également à évaluer si le modèle correspond aux observations du système climatique. Habituellement, cinq à dix simulations historiques ou plus sont entreprises et exécutées selon les concentrations de GES historiques observées et d'autres forçages climatiques externes; les simulations de scénarios de forçage se poursuivent ensuite à partir de la fin des simulations historiques. Deux simulations avec un modèle climatique donné effectuées à partir de différentes conditions initiales simuleront différentes séquences de manifestations météorologiques; cependant, on s'attend à ce que les statistiques qui décrivent ces manifestations, soit la climatologie du modèle, soient essentiellement indiscernables d'une simulation à l'autre si les mêmes prescriptions de forçage sont employées. Ainsi, pendant la longue période historique, chacune des simulations dans un ensemble d'exécutions de modèles qui partaient de conditions initiales différentes devrait afficher une augmentation semblable de température assortie à une augmentation des concentrations de GES. Chaque simulation historique qui fait partie de cet ensemble peut donc être considérée comme une concrétisation plausible de la façon dont le climat historique aurait pu évoluer si l'état immédiat du système, dont tous ses détails, avait différé légèrement au moment où les observations ont commencé (ce qu'on appelle parfois « l'effet papillon »). Attention cependant; on ne peut s'attendre à ce qu'aucune des simulations historiques n'évolue conformément aux observations, même si le modèle climatique offrait une représentation parfaitement fidèle du véritable climat. En effet, le climat historique que nous avons observé est également une concrétisation individuelle du système climatique chaotique. Ce même comportement chaotique, soit une variabilité interne dans le système climatique naturel, sous-tend la limite de deux semaines environ applicable à l'horizon utile de prévisions météorologiques instantanées. La variabilité par rapport à un vaste ensemble de simulations tirées d'un seul MCM et d'un scénario de forçage laisse donc place à une incertitude, en raison de la variabilité interne à évaluer.

⁵ L'expérience du CMIP6 qui est réalisée par la communauté internationale de modélisation du climat en vue de son évaluation dans le 6° rapport d'évaluation du GIEC utilise des scénarios quelque peu révisés appelés « Shared Socioeconomic Pathways » (SSP) ou profils socioéconomiques partagés. La description des SSP reconnaît qu'il peut y avoir différentes voies par lesquelles la société mondiale arriverait à un niveau de forçage donné en l'an 2100. Ils sont donc indexés par type de voie et par niveau de forçage radiatif. Les niveaux de forçage radiatif atteints en 2100 par les SSP (1,9, 2,6, 4,5, 7,0 et 8,5 W/m²) sont comparables à ceux des RCP.

2.1.5 Réduction à l'échelle régionale

Lorsque des scénarios climatiques à plus haute résolution sont nécessaires, il est possible de prendre des projections de MCM et de les « réduire » à une plus haute résolution dans une région d'intérêt. La réduction d'échelle dynamique amène l'utilisation d'un modèle climatique régional (MCR) : essentiellement, un modèle climatique physique qui fonctionne à une résolution plus élevée qu'un MCM, mais dans une zone restreinte (par exemple, une zone contenant un continent comme l'Amérique du Nord ou parfois seulement une partie d'un continent). Les dimensions de maille types des MCM et des MCR se chiffrent respectivement à environ 100 à 250 km et 10 à 50 km. Les MCR intègrent un grand nombre de processus physiques et de paramétrages identiques à ceux des MCM, et partagent en effet souvent une grande partie du même code informatique. La distinction importante est que les MCR sont exécutés à leurs frontières latérales par les résultats d'un MCM⁶. Le modèle régional fournit une simulation physique du climat dans la région qu'il couvre qui est cohérente avec le modèle global qui fournit les conditions qui prévalent dans ses frontières. Il faut cependant noter que le modèle régional hérite également des erreurs et des biais que peuvent comporter les résultats du modèle mondial.

Un avantage de ce processus en deux étapes dans lequel un MCR est utilisé pour réduire dynamiquement un MCM est que, en raison de sa zone de couverture limitée, un modèle régional peut simuler le climat sur une grille à plus haute résolution en utilisant un effort de calcul similaire à celui d'un modèle mondial. Ce détail supplémentaire est souvent souhaitable, et les données dont on disposait au moment de la $5^{\rm e}$ évaluation du GIEC indiquent que les MCR peuvent apporter une valeur ajoutée aux projections des MCM (Rummukainen, 2016) dans certains endroits grâce à leur meilleure représentation de la topographie, des limites terre/eau et de certains processus physiques comme les rétroactions locales. Pour la réduction d'échelle dynamique à très haute résolution (à une résolution de modèle de \leq 4km), des processus physiques comme la convection atmosphérique commencent à avoir une résolution explicite et peuvent conduire à une simulation supérieure de variables climatiques comme les extrêmes de précipitations de courte durée. Ces modèles autorisant la convection restent toutefois largement expérimentaux en raison de leur coût de calcul très élevé⁷.

2.2 Formulation de projections sur les changements climatiques

En ce qui concerne les projections de changements climatiques, la meilleure façon de traiter l'incertitude attribuable à la dispersion dans les modèles et les scénarios de forçage est de ne pas se fier aux données sur les changements climatiques provenant d'un seul modèle climatique ou scénario de forçage, mais plutôt de combiner les résultats de nombreux modèles et scénarios. Pour un scénario de forçage donné, un tel ensemble multimodèles échantillonne à la fois la variabilité interne et l'incertitude du modèle; l'influence relative de la variabilité interne peut être évaluée en examinant de nombreuses simulations d'un modèle climatique donné avec les mêmes forçages. L'objectif est de couvrir l'ensemble des réponses que les modèles climatiques produisent pour un scénario donné.

L'influence relative de la variabilité interne, de l'incertitude du forçage et de l'incertitude du modèle sur les projections climatiques dépend de la variable, de l'échelle spatiale et de l'horizon temporel qui nous intéressent. Par exemple, l'incertitude qui entoure les projections régionales de température

⁶ Certains MCR sont également guidés à l'intérieur du domaine au *moyen* d'un processus appelé « forçage spectral », selon lequel le mouvement des grands systèmes de circulation dans le MCR est contraint de s'apparenter à celui du MCM principal.

⁷ En règle générale, le coût de calcul d'un MCM ou d'un MCR augmente d'un ordre de grandeur pour un domaine donné chaque fois que la dimension de maille du modèle est réduite de moitié. La simulation à grand ensemble CanRCM4 utilisée dans ce rapport a une résolution spatiale de grille d'environ 50 km. Un modèle fonctionnant sur le même domaine et avec une convection permettant une résolution d'environ 3,125 km nécessiterait donc des ressources de calcul de l'ordre de 10⁴ fois plus importantes.

pour le proche avenir sera dominée par la variabilité interne (à plus forte raison pour les projections régionales de précipitations), tandis que les projections de la température moyenne mondiale pour la fin du siècle seront dominées par l'incertitude du forçage futur.

À titre d'exemple, la figure 2.2a présente des séries chronologiques d'anomalies de température annuelle moyenne historique et projetée à l'échelle mondiale, par rapport à une période de référence de 1986 à 2016, pour 29 MCM du CMIP5 et trois scénarios de forçage (émissions faibles, RCP de 2,6, émissions moyennes, RCP de 4,5 et émissions élevées, RCP de 8,5) pour les années 1950 à 2100. La figure 2.2b montre la série correspondante d'anomalies de température annuelle moyenne pour une région qui englobe le Canada et les eaux limitrophes (de 40°N à 75°N et de 140°O à 55°O). Les lignes épaisses indiquent la moyenne multimodèles et les lignes plus minces indiquent les modèles individuels. Les résultats du scénario de forçage d'émissions élevées sont indiqués par les lignes rouges, ceux du scénario d'émissions moyennes par les lignes orange et ceux du scénario de faibles émissions par les lignes bleues; les lignes noires indiquent les résultats des simulations historiques. Les lignes violettes correspondent à un grand ensemble de nombreux membres d'un seul modèle dans le cadre du scénario d'émissions élevées.

Lorsque l'on examine les changements climatiques prévus par rapport au présent, l'écart entre les modèles est plus faible à court terme qu'il ne l'est vers la fin du 21e siècle, ce qui indique, en partie, que l'effet de l'incertitude des modèles (par exemple, en raison des différences de sensibilité du climat) devient plus important plus on projette dans l'avenir8. La différence entre les scénarios de forçage est faible jusqu'au milieu du siècle, en partie parce qu'il faut un certain temps au système terrestre pour réagir aux émissions de GES antérieures (par exemple, en raison de la grande capacité thermique de l'océan), et en partie en raison des effets compensatoires des émissions de GES et d'aérosols à court terme (Zwiers, 2002). La différence entre les scénarios devient importante vers la fin du 21e siècle (comme l'illustre la séparation croissante entre les résultats d'émissions faibles et élevées). En ce qui concerne les résultats régionaux pour le Canada, la tendance générale est similaire, mais le réchauffement global et l'écart entre les projections sont tous deux plus importants qu'à l'échelle mondiale. Le réchauffement plus important est principalement attribuable à l'amplification de l'Arctique qui, en partie, est causée par des rétroactions positives de l'albédo de la glace de mer et de l'albédo de la neige; la fonte de la glace de mer arctique et la réduction de la couverture neigeuse de l'hémisphère nord entraînent une plus grande absorption du rayonnement solaire entrant par les océans et la surface terrestre, ce qui renforce le réchauffement initial. La plus grande dispersion des projections à l'échelle régionale est principalement attribuable à la variabilité interne plus importante en comparaison, reflétée par la dispersion des lignes violettes, par rapport aux effets du forçage externe lorsque l'on passe à des échelles régionales plus petites (Deser et coll., 2012). La « moyenne » de la variabilité attribuable à la variabilité interne est calculée à l'échelle mondiale.

2.3 Communication de l'incertitude

Dans le contexte des projections pour les variables de conception climatique des bâtiments et infrastructures publiques de base (BIPB), une communication claire de chacune des trois sources d'incertitude est d'une importance capitale. Des données sur les projections climatiques provenant d'ensembles multimodèles, comme ceux qui ont contribué au CMIP5, sont souvent fournies pour des périodes futures fixes (par exemple, les années 2020, 2050 et 2080) dans le cadre de différents

è À court terme, les effets de l'incertitude des modèles sont plus évidents dans les graphiques des sorties brutes des modèles : ceux-ci montrent les différences systématiques qui existent entre les modèles. Cependant, tracer les anomalies par rapport à une période de base commune retire les biais des modèles; toutes les séries chronologiques d'anomalies sont alors tenues de passer par zéro pendant la période de base, alors qu'aucune contrainte ne s'applique aux courbes d'anomalies en dehors de la période de base. Est alors réduite efficacement l'incertitude apparente du modèle près des limites de la période de base.

scénarios de forçage. Cette pratique associe les projections des MCM avec différentes sensibilités climatiques (figure 2.1) pour chaque horizon de projection, ce qui complique la séparation de l'incertitude attribuable à la variabilité interne de celle attribuable à la propagation inter-modèle (figure 2.2).

Une méthode différente est adoptée dans ce projet. En effet, des projections propres aux sites et aux régions des variables de conception climatique de BIPB sont plutôt fournies pour des niveaux fixes de réchauffement climatique (par exemple, la période associée à un changement de +2 °C de la température moyenne mondiale). Seneviratne et coll. (2016) ont montré que les variations des températures et des précipitations extrêmes sur de grandes régions « s'échelonnent » de manière similaire à l'augmentation de la température mondiale dans les scénarios et les modèles de forçage; les changements proportionnels de ces extrêmes sont donc similaires dans les scénarios et les modèles lorsqu'on estime qu'ils sont fonction du changement de la température movenne mondiale. À titre d'illustration, la figure 2.3 présente les variations projetées de la température annuelle moyenne à l'échelle mondiale (données de la figure 2.2a) par rapport aux variations de la température annuelle moyenne près du Canada (données de la figure 2.2b). Dans ce cas, le réchauffement régional au Canada s'échelonne de manière à peu près linéaire relativement aux variations de la température moyenne mondiale, à un rythme légèrement inférieur au double du réchauffement de la planète, et est à peu près le même dans les différents scénarios de forçage. L'association des incidences régionales à des niveaux de réchauffement planétaire précis, plutôt qu'à des périodes fixes au cours desquelles les projections régionales de modèles ayant différentes sensibilités climatiques (figure 2.1) sont mélangées, constitue donc un moyen pratique de transmettre les données sur les changements climatiques. Elle ne réduit cependant pas l'incertitude : les mêmes données sont présentées. Elle offre plutôt un moyen simple de dissocier les données sur les projections régionales de celles qui portent sur les scénarios de forçage et la sensibilité des modèles. En outre, il existe un lien direct avec les objectifs de réchauffement climatique, par exemple, ceux qui sont énoncés dans le cadre de l'Accord de Paris, et les évaluations ultérieures de la probabilité d'atteindre ces objectifs (Millar et coll., 2017; Raftery et coll., 2017).

2.4 Recherche ciblée

Compte tenu des échelles temporelles et spatiales auxquelles les données de conception climatique de BIPB sont requises pour le Canada, il a été jugé nécessaire que les recommandations sur les projections climatiques soient étayées par des simulations à échelle réduite dynamiquement provenant d'un MCR. En outre, comme la variabilité interne est une composante relativement plus importante de l'incertitude globale qui entoure les projections climatiques à des échelles spatio-temporelles plus petites, un grand ensemble de simulations à une résolution aussi élevée que possible a également été recommandé, car l'utilisation d'un grand ensemble permet d'obtenir des échantillons plus importants à partir desquels des statistiques sur les valeurs extrêmes peuvent être estimées de manière fiable.

Pour répondre à ces besoins, les résultats d'un grand ensemble de 50 membres constitué de simulations nord-américaines (résolution de 0,44°) réalisées par le CCmaC d'ECCC, dont certaines ont été échantillonnées toutes les heures, ont été utilisés dans ce projet. Ce grand ensemble est constitué de simulations régionales à échelle réduite dynamiquement de l'Amérique du Nord par la version 4 du MCR du CCmaC, le CanRCM4, reposant sur des simulations globales du MST de 2° génération du CCmaC, le CanESM2. Les 50 simulations ont archivé des précipitations sur une heure; la température de surface et de l'air en altitude sur trois heures; une vitesse du vent à 10 mètres sur trois heures; une pression de surface sur trois heures; une vitesse moyenne quotidienne maximale du vent à 10 mètres sur 15 minutes; une température minimale, maximale et moyenne quotidienne; et une humidité relative moyenne quotidienne. En outre, 15 des simulations ont archivé les températures de surface sur une heure et les vitesses du vent à 10 mètres pendant une heure.

Le CanESM2 est un MCM muni de composantes interactives de l'atmosphère, de l'océan, de la glace de mer, de la terre et du cycle du carbone qui est configuré pour fonctionner à un espacement horizontal de ~2,8° (Arora et coll., 2011). Un grand ensemble de conditions initiales, appelé le grand ensemble (LE) du CanESM2 (Fyfe et coll., 2017), composé de 50 simulations, a été lancé de façon aléatoire à compter du 1er janvier 1950 à partir des cinq membres de l'ensemble historique du CanESM2, que le CCmaC a donnés au CMIP5. Des perturbations aléatoires de l'état atmosphérique initial au début de 1950 ont été introduites au moyen de l'un des paramétrages de la physique des nuages. Ce paramétrage s'appuie sur un générateur de nombres aléatoires avec une quantité prédéfinie; les dix simulations individuelles issues de la dissociation de chacun des cinq membres de l'ensemble du CMIP5 reposent sur des quantités différentes. Ainsi, différentes réalisations historiques et de changements climatiques ont été produites sans modification de la dynamique, de la physique ou de la structure du modèle. Les seules différences sont attribuables à la variabilité interne. Lors des simulations, on a utilisé des estimations observées des variations historiques des forçages du soleil, des volcans, des gaz à effet de serre, des aérosols, de l'ozone et de l'utilisation des terres. Les simulations historiques se terminent le 31 décembre 2005. Le scénario d'émissions RCP8.5 a été utilisé pour prolonger les simulations historiques de janvier 2006 à 2100.

Des simulations régionales qui réduisent dynamiquement l'échelle du CanESM2 LE à une dimension de maille de 0,44° dans l'Amérique du Nord ont été réalisées avec le CanRCM4 (Scinocca et coll., 2016; annexe 2.2). Il possède le même noyau dynamique que le modèle de l'échelle multiple environnementale globale (EMEG), un système intégré de prévision météorologique numérique et d'assimilation de données mis au point par ECCC (Côté et coll., 1998). Le CanRCM4 utilise le même ensemble de paramétrages physiques que le modèle climatique global atmosphérique canadien de quatrième génération (CanAM4) du CCmaC (von Salzen et coll. 2013), qui constitue la composante atmosphérique du CanESM2. En particulier, le CanRCM4 utilise le schéma de convection profonde de Zhang et McFarlane (1995), le schéma de convection peu profonde de von Salzen et coll. (2005) et le schéma canadien de surface terrestre (CLASS) version 2.7 (Verseghy, 1991, 2000). L'annexe 2.2 fournit un lien vers des détails supplémentaires sur les principales caractéristiques et les paramétrages physiques de ce MCR et sa relation avec son modèle global principal, le CanESM2. Un grand nombre d'ouvrages ont évalué la capacité du CanRCM4 à simuler les conditions climatiques historiques, notamment les températures et les précipitations extrêmes (Diaconescu et coll., 2016 ; Whan et Zwiers, 2016; Whan et coll, 2016; Whan et Zwiers, 2017; Ben Alaya et coll., 2019), la neige (Fyfe et coll., 2017), les épisodes pluie sur neige (Jeong et Sushama, 2018b), les cyclones extratropicaux (Seiler et coll., 2018) et les rivières atmosphériques (Whan et Zwiers, 2016; Tan et coll., 2020).

Les données issues de modèles climatiques utilisées dans le cadre de ce projet se trouvent dans le portail des données ouvertes du gouvernement du Canada :

Le grand ensemble du Modèle régional canadien du climat https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/83aa1b18-6616-405e-9bce-af7ef8c2031c

Grands ensembles de données du modèle du système terrestre canadien https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/aa7b6823-fd1e-49ff-a6fb-68076a4a477c

Ensembles multimodèles CMIP5 de projections de température https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/ce5b431c-9ea3-43d2-be84-5ab89d52c878

Ensembles multimodèles CMIP5 de projections de précipitations https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/6f08807c-3233-47bf-b6ca-4d0237932543

Ensembles multimodèles à échelle statistiquement réduite des températures moyennes https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/746f8073-4a4b-446b-80af-e20f99230d06

Ensembles multimodèles à échelle statistiquement réduite des températures maximales https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/cd609f02-1f99-490a-a762-b018f5fd45b8

Ensembles multimodèles à échelle statistiquement réduite des températures minimales https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/3c063872-c757-47ed-b5c2-babce6bffa02

Ensembles multimodèles à échelle statistiquement réduite des précipitations https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/b874d4fd-5432-4b80-ab7f-5ac9b6644bee

2.5 Lignes directrices et recommandations

2.5.1 Incertitude entourant les modèles

Les projections des changements dans les données de conception climatique sont calculées au moyen des extrants du CanRCM4 LE à des paliers de +0,5 °C de changement de la température moyenne globale de l'air près de la surface pris par rapport à une période de référence historique. Le choix de la période de référence historique nécessite de faire un compromis entre l'utilisation de registres sur une période suffisamment longue pour réduire l'incertitude de l'échantillonnage à un niveau acceptable, mais aussi une période suffisamment courte pour réduire au minimum l'influence des tendances climatiques sur les données de conception estimées. À titre de référence, Kharin et Zwiers (2005) présentent une analyse de l'influence du caractère non stationnaire sur les analyses des valeurs extrêmes et Li et coll. (2019a) évaluent la quantité de données climatiques qui serait nécessaire pour quantifier de manière fiable les effets du caractère non stationnaire sur l'intensité des épisodes de précipitations extrêmes.

Pour tenir compte en partie du réchauffement historique et du caractère non stationnaire des données d'observation, le CNBC (2015) a rapporté les valeurs observées des éléments de conception climatique liés à la température qui ont été mises à jour pour une période de 25 ans, y compris les données jusqu'en 2006. En utilisant une méthode similaire, toutes les projections aux présentes reposent sur une période de référence historique de 31 ans légèrement plus longue, s'étendant de 1986 à 2016, qui est représentative du climat le plus récent. La durée de la période la plus couramment utilisée pour les moyennes climatologiques est de 30 ans, soit la durée utilisée par l'Organisation météorologique mondiale pour calculer les normales climatiques. Un simple ajustement d'une année supplémentaire est adopté pour éviter toute ambiguïté dans la détermination de l'année centrale d'une période climatologique.

Les données régionales sont calculées en partant des simulations CanRCM4 LE associées à des niveaux de réchauffement climatique précis, projetés par CanESM2 LE dans le cadre du scénario de forçage historique et à fortes émissions RCP8.5. Les calculs de la température moyenne mondiale et de la période d'occurrence des changements de +0,5 °C à +3,5 °C reposent sur des périodes de 31 ans prises par rapport à cette référence de 1986 à 2016⁹. Les années associées à chaque augmentation reflètent donc l'année centrale de la première période de 31 ans pour laquelle la variation moyenne de la température moyenne mondiale est égale au niveau de réchauffement spécifié et pour laquelle la variation moyenne de chaque période de 31 ans suivante par rapport à la période de référence reste supérieure à ce niveau. Les années centrales des augmentations du réchauffement climatique, telles que projetées par le CanESM2 LE par rapport à la période de référence de 1986 à 2016, sont d'abord

⁹ Dans les publications sur le climat, les projections pour des niveaux de réchauffement climatique spécifiés sont généralement établies par rapport à une période de référence préindustrielle (par exemple, 1850-1900). Étant donné qu'il n'y a aucune simulation pour la période préindustrielle dans le modèle CanRCM4 réalisée par le modèle CanESM2, et aussi parce qu'une base historique récente est plus pertinente pour la conception des BIPB – les changements projetés associés à différents niveaux de réchauffement planétaire futur sont calculés par rapport à la période de référence 1986-2016. Pour le CanESM2, les niveaux de réchauffement de +0,5, +1, +2 et +3 °C par rapport à la période de référence de 1986-2016 sont approximativement les mêmes que les niveaux de +1,5, +2, +3 et +4 °C par rapport à la période préindustrielle. Les valeurs fournies dans ce rapport peuvent donc être rattachées de façon approximative à celles rapportées dans les publications sur le réchauffement depuis la période préindustrielle.

déterminées pour chaque membre à part entière. Les valeurs médianes des années centrales sont 2016 pour un réchauffement de +0,5 °C (2001-2031), 2028 pour un réchauffement de +1 °C (2013-2043), 2039 pour un réchauffement de +1,5 °C (2024-2054), 2049 pour un réchauffement de +2 °C (2034-2064), 2059 pour un réchauffement de +2,5 °C (2044-2074), 2068 pour un réchauffement de +3 °C (2053-2083) et 2077 pour un réchauffement de +3,5 °C (2062-2092). Les projections des variations régionales dans les données de conception climatique du CanRCM4 LE s'appuient ensuite sur des différences absolues ou relatives, selon la variable, entre ces périodes futures de 31 ans associées à chaque augmentation du réchauffement climatique et la période de référence historique. Les 25° et 75° centiles des membres existants du CanRCM4 LE sont également calculés pour caractériser l'incertitude attribuable à la variabilité interne.

Enfin, pour fournir des données sur l'étendue complète de l'incertitude associée au modèle CMIP5 et au forçage à l'échelle mondiale, la durée des niveaux précis de réchauffement climatique est calculée à partir de l'ensemble des MCM du CMIP5 pour les scénarios d'émissions RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5. Ces calculs ont été effectués par le Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) dans le cadre d'un contrat parallèle avec le Conseil national de recherches afin de soutenir les efforts déployés par ECCC pour fournir des données de conception climatique pour les futurs états climatiques. La description suivante a été modifiée par rapport à celle fournie par le PCIC.

Il est nécessaire de décider quelles séries de MCM doivent être utilisées pour déterminer si un réchauffement au-delà d'un certain niveau s'est produit. La création d'un ensemble de mesures largement acceptées de la qualité des modèles est un objectif permanent de la recherche sur le climat où le consensus sur la meilleure façon de séparer les MCM les moins performants des MCM les plus performants n'a pas encore été atteint. Il est donc préférable d'utiliser le plus grand nombre possible de MCM et d'exécutions afin de réduire l'influence de l'incertitude des modèles et de la variabilité naturelle sur les résultats. Toutefois, certains MCM ne sont exécutés qu'une seule fois, tandis que d'autres sont exécutés plusieurs fois. Nous choisissons pour notre part une seule exécution (choisie au hasard) par MCM. Les avantages de cette option sont que tous les MCM ont une pondération égale et que la variabilité de chaque MCM est représentée de manière égale. L'inconvénient de cette approche est qu'elle n'utilise pas techniquement toutes les données existantes. Pour déterminer si cet inconvénient est un problème, nous avons comparé les résultats obtenus avec cette option à la pondération égale de toutes les exécutions existantes et n'avons décelé pratiquement aucune différence. Pour sélectionner des exploitations individuelles à partir de l'ensemble complet, nous utilisons les mêmes exécutions que celles qui ont été retenues pour être versées dans l'Atlas du 5e rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2013).

Les moyennes multimodèles de tous les RCP atteignent un niveau de réchauffement climatique mondial de +0,5 °C par rapport à la période de 1986 à 2016 à peu près au même moment, soit dans quelques années seulement (tableau 2.1). À des niveaux de réchauffement plus élevés, les RCP divergent et les moyennes multimodèles des simulations des RCP 2.6, 4.5 et 6.0 finissent par atteindre des niveaux de réchauffement climatique maximal de +0,5 °C, +1,5 °C et +2 °C par rapport à la période 1986-2016, respectivement. Dans le tableau 2.1 qui résume les résultats, la moyenne des périodes est calculée pour les RCP s'ils atteignent le même niveau à peu près au même moment (dans une période de six ans l'un par rapport à l'autre). Un tableau qui contient des résultats plus détaillés est fourni à l'annexe 1.1.

Cette approche, qui fournit des projections régionales inspirées du modèle CanRCM4 LE et le rythme du réchauffement planétaire à partir d'un ensemble de MCM multimodèles et multi-scénarios, suppose que l'incertitude des projections climatiques peut être ventilée sur trois sources, l'une fonctionnant principalement à l'échelle régionale : variabilité interne estimée à partir de CanRCM4 LE, et deux à l'échelle mondiale : incertitude du modèle et incertitude du forçage du réchauffement climatique, estimées, respectivement, à partir de la dispersion entre les modèles du CMIP5 et des quatre scénarios d'émissions.

Les données sur les changements régionaux dans les données de conception climatique sont donc découplées des données sur le rythme du réchauffement climatique, qui dépend du scénario de forçage et de la sensibilité des MCM. Les principales hypothèses de cette approche sont les suivantes : (1) le système de modélisation du CanESM2-CanRCM4 LE fournit une estimation précise de la variabilité interne du système climatique et de ses caractéristiques régionales; (2) l'incertitude du forçage et l'incertitude du modèle sont principalement exprimées en termes de rythme de la variation de la température moyenne mondiale et non en termes d'incidences régionales du réchauffement de cette ampleur au Canada; et (3) l'expression de la variation régionale pour un niveau donné de variation de la température moyenne mondiale ne dépend pas du scénario de forçage, c'est-à-dire de la manière dont un niveau donné de variation de la température moyenne mondiale est atteint.

À l'échelle mondiale, la variabilité du modèle CMIP5 se compare bien à la variabilité observée à diverses échelles temporelles (Jones et coll., 2013). En outre, la cohérence du CanESM2 LE avec la variabilité interne observée a été vérifiée pour l'étendue de la glace de mer arctique (Kirchmeier-Young et coll., 2017), le stock neigeux dans l'ouest de l'Amérique du Nord (Fyfe et coll., 2017) et les rivières atmosphériques touchant la côte ouest du Canada (Tan et coll., 2019), entre autres.

Il convient toutefois de noter que, si le fait de lier les changements régionaux aux niveaux de réchauffement climatique réduit l'influence de l'incertitude des modèles en raison des différences de sensibilité des MCM à l'échelle mondiale, la réponse régionale peut encore être quelque peu dépendante du modèle. La dispersion de l'évolution annuelle de la température au Canada pour un niveau donné de réchauffement climatique dans le cadre du scénario des émissions élevées, présentée aux figures 2.2 et 2.3, est entièrement attribuable à la variabilité interne pour le modèle CanESM2 LE, mais elle est attribuable à la fois à l'incertitude du modèle et à la variabilité interne pour le MCM du CMIP5. Si les amplitudes de la variabilité interne échantillonnée par les ensembles RCP8.5 du CMIP5 et RCP8.5 du CanESM2 LE étaient les mêmes, l'indépendance du modèle de la réponse régionale donne à penser que l'écart moyen devrait être le même pour les deux ensembles. Pour cette variable particulière, la dispersion du CanESM2 LE est d'environ 80 % de celle de l'ensemble complet du CMIP5, ce qui indique que l'influence de l'incertitude du modèle n'est pas entièrement enrayée lorsqu'il associe le changement régional aux niveaux de réchauffement climatique. La dépendance de la force de l'influence de l'incertitude du modèle dans les différentes variables et régions d'intérêt reste pour l'essentiel non testée.

L'indépendance de la réponse climatique régionale aux niveaux de réchauffement climatique mondial (par exemple, comme l'indique l'égalité des échelles de température mondiales et régionales dans la figure 2.3 pour différents scénarios de forçage) a été évaluée pour les extrêmes de température et de précipitations par Pendergrass et coll. (2015) et Wang et coll. (2017). En ce qui concerne l'Amérique du Nord, qui ne présente pas de charges d'aérosols anormalement élevées par rapport à d'autres régions (par exemple, contrairement à l'Asie du Sud), il n'y a guère de preuves que la relation entre le réchauffement climatique et les changements régionaux diffère selon les scénarios de forçage.

Le découplage des changements régionaux du rythme du réchauffement climatique signifie que les estimations du rythme du changement de la température moyenne mondiale peuvent être mises à jour à mesure que de nouvelles données scientifiques sont connues, par exemple, lorsque de nouvelles projections de MCM sont publiées dans le cadre du CMIP6 (Eyring et coll., 2016). En outre, les estimations des effets régionaux d'un niveau de réchauffement donné au Canada peuvent être réalisées séparément.

2.5.2 Sélection d'horizons temporels et lien avec les niveaux de réchauffement climatique mondial

Pour la conception des BIPB, des recommandations sont nécessaires à la sélection des données de conception climatique appropriées dans un horizon temporel donné, par exemple 50 ans pour les bâtiments (tableau C-2 du CNBC) et 75 ans pour les ponts (annexe A3.1 du Code canadien sur le calcul des ponts routiers). Selon l'approche retenue aux présentes pour diffuser les changements

prévus dans les données de conception climatique, il faut donc définir le niveau de réchauffement climatique approprié et correspondant à l'horizon temporel formulé (tableau 2.1). Une fois que le niveau de réchauffement climatique a été défini, on peut consulter les chapitres 3 à 6 pour évaluer les changements projetés dans les données de conception climatique pertinentes. Les projections des changements aux valeurs de conception en fonction de l'emplacement sont présentées à l'annexe 1.2, avec la mise en garde suivante : elles ne doivent être consultées qu'après un examen approfondi des évaluations des chapitres qui suivent.

Comme il ne s'agit pas d'une simple question de science climatique, il convient de poursuivre les travaux et de laisser le soin aux organismes de normalisation et aux codes appropriés de formuler des recommandations. Toutefois, en s'appuyant sur les données présentées dans ce chapitre sur les projections du réchauffement climatique par l'ensemble du CMIP5, les recommandations provisoires suivantes sont formulées :

- 1. Pour l'horizon de 50 ans, il est recommandé d'utiliser un niveau de réchauffement associé au scénario RCP8.5 (+2,5 °C), car le changement progressif des données de conception par rapport à celles du RCP4.5 ou du RCP6.0 n'est pas important pour cette période.
- 2. Pour l'horizon de 75 ans, la sélection d'un scénario approprié est plus compliquée, car la différence entre les différents scénarios vers la fin du siècle peut être assez importante. Dans ce cas, il convient de déterminer le scénario à cibler. Pour ce faire, il peut être nécessaire de consulter des experts pour évaluer la probabilité de différents scénarios de forçage afin d'arriver à une décision finale.

Quel que soit l'horizon temporel, il peut être utile d'examiner la direction prévue du changement des différents types de charges. Certaines charges, comme les charges de neige, sont censées diminuer dans tous les scénarios de réchauffement, et une approche prudente consisterait donc à s'assurer que les concepts reposent sur des données de conception climatique actuelles pour ces éléments. En revanche, d'autres charges, telles que les charges thermiques estivales, devraient augmenter, et dans ces cas, une approche prudente consisterait à utiliser les données de conception futures projetées.

Un choix prudent pour un long horizon temporel qui tente d'éviter le risque associé à la sousestimation des charges serait d'opter pour le scénario RCP8.5 (+3,5 °C) pour les charges qui devraient augmenter et d'utiliser les données de conception climatique actuelles pour les charges qui devraient diminuer, en reconnaissant que les concepts pourraient ainsi coûter plus cher.

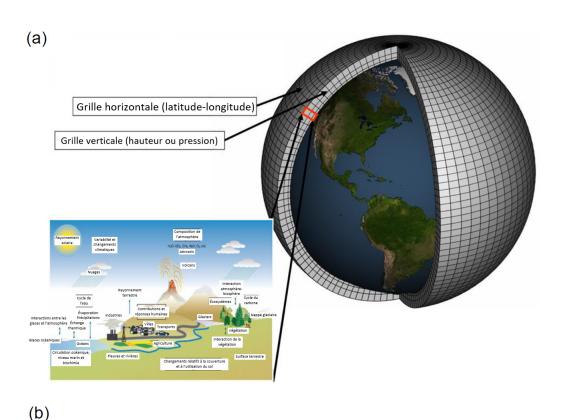
À titre de compromis pour l'augmentation des charges, il serait possible d'utiliser des données de conception non inférieures à celles appropriées pour un horizon de 50 ans dans le cadre du scénario RCP8.5, ce qui sous-entendrait l'utilisation de données de conception pour un réchauffement de +2,5 °C, le niveau qui se produit dans le cadre du RCP8.5 en 2069. On peut s'attendre à ce qu'un tel concept continue à donner de bons résultats au moins jusqu'à la fin de ce siècle dans le cadre de scénarios d'émissions plus faibles, tels que le RCP6.0, pour lequel les niveaux de réchauffement climatique ne devraient pas dépasser systématiquement 2,5 °C au cours de ce siècle. L'examen de la possibilité d'adapter de manière rentable une structure en fonction des variations futures de la charge contribuerait à atténuer le risque que les charges soient finalement plus élevées que prévu dans le cadre du RCP6.0.

La prise en compte des risques et des charges futurs est encore compliquée par le fait que la confiance dans les projections de la direction et de l'ampleur des changements aux valeurs de calcul climatiques varie considérablement entre les différents éléments de calcul, la confiance étant particulièrement faible pour les éléments qui sont importants pour la détermination des charges structurelles (charges de neige, de glace et de vent). En revanche, la confiance est relativement élevée dans le cas des éléments liés à la température qui sont importants pour la détermination des charges thermiques futures, et elle est intermédiaire pour les éléments qui sont importants pour la gestion de l'eau et de l'humidité dans des structures et à proximité. Ainsi, différentes méthodes pour évaluer les charges et les risques potentiels pouvant découler des conditions climatiques futures peuvent être nécessaires pour éclairer la conception des différents systèmes de composants qui forment une structure.

Tableau 2.1 : L'année à laquelle le réchauffement climatique *moyen* désigné ΔT par rapport à la période de référence 1986-2016 est irrévocablement dépassé par la moyenne multimodèles du CMIP5 (un seul membre d'ensemble par modèle) pour les scénarios d'émissions RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 et RCP2.6. Les résultats des modèles sont obtenus à partir de l'explorateur climatique KNMI. Les années sont arrondies à l'année près. Un tiret (« – ») indique qu'un réchauffement soutenu au niveau spécifié par le ΔT correspondant ne se produit pas avant 2100 pour le scénario d'émissions indiqué. La moyenne des résultats des différents scénarios d'émissions est calculée si la différence entre les années où un niveau de réchauffement donné est atteint est de tout au plus six ans pour les différents scénarios d'émissions. Il convient de noter que lorsqu'on se rapproche des points d'extrémité, la fenêtre de la moyenne mobile sur 31 ans se réduit à une fenêtre symétrique sur n ans, où n s'approche de 1 au point d'extrémité.

ΔΤ	RCP8.5	RCP6.0	RCP4.5	RCP2.6
+0,5°C	2023			
+1,0°C	2035	2046		-
+1,5°C	2047	20	70	-
+2,0°C	2059	2087	-	-
+2,5°C	2069	-	-	-
+3,0°C	2080	-	-	-
+3,5°C	2090	-	-	-

Figure 2.1 : a) Illustration schématique des processus d'un MCM et de la manière dont l'espace peut être discrétisé pour permettre de résoudre les équations mathématiques décrivant les processus physiques sur une grille tridimensionnelle. Le temps est également discrétisé dans un MCM et les périodes types varient de 15 à 20 minutes pour un modèle à résolution spatiale modeste. Les sous-composantes d'un MCM comprennent des modèles qui décrivent l'atmosphère, l'océan, la glace de mer, la surface terrestre et les cycles biogéochimiques, ainsi qu'un coupleur qui relie les composantes entre elles. Source : Wikimedia Commons. b) Dimension de maille horizontale et sensibilité du climat à l'équilibre (Caldwell et coll., 2016) de 26 MCM contribuant au CMIP5. Les acronymes des modèles se trouvent à l'adresse https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/availability.html. La sensibilité du climat à l'équilibre fait référence au réchauffement éventuel qui se produirait si la concentration atmosphérique de CO² devait rester constante au double de sa concentration préindustrielle d'environ 280 ppmv.



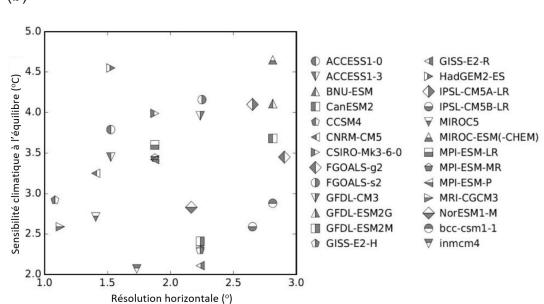


Figure 2.2 : Série chronologique a) des anomalies de température annuelle moyenne mondiale (année de référence 1986-2016) et b) des anomalies de température annuelle moyenne pour une région qui englobe le Canada et les eaux limitrophes (40°N à 75°N et 140°O à 55°O) pour 29 MCM du CMIP5 et les scénarios de forçage RCP2.6, 4.5 et 8.5, ainsi qu'un grand ensemble d'un seul MCM, le CanESM2 LE. Les contributions de chaque source d'incertitude qui entoure les projections, soit le forçage, le modèle et la variabilité interne, à la fin du 21° siècle sont schématisées à l'extrême droite de b).

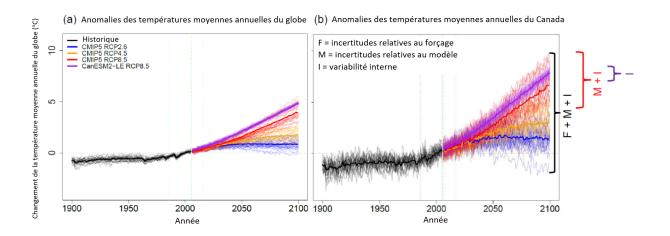
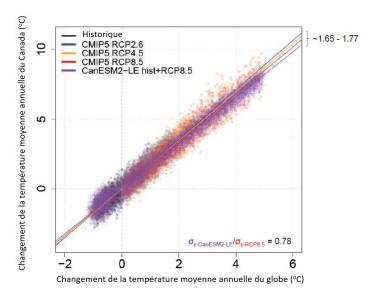


Figure 2.3 : Mise à l'échelle de la variation de la température annuelle moyenne au Canada avec la variation de la température annuelle moyenne mondiale en partant d'années individuelles tirées de 29 modèles du CMIP5 et du CanESM2 LE (voir figure 2.2). L'intervalle d'amplitude des pentes des droites de meilleur ajustement pour les différents scénarios de forçage est indiqué en haut à droite. Le rapport entre les écarts-types résiduels des droites de meilleur ajustement pour CanESM2 LE (reflétant la variabilité interne) et les simulations du RCP8.5 du CMIP5 (reflétant à la fois l'incertitude du modèle et la variabilité interne) est indiqué en bas à droite



2.6 Exemple – Température annuelle moyenne

2.6.1 Contexte

Bien que la portée de ce rapport soit limitée à des indications sur les projections des données de conception climatique dont il est question dans le CNBC et le CHBDC, la température annuelle moyenne est un indicateur clé de la réponse climatique aux émissions anthropiques de GES, car des concentrations plus élevées de GES entraînent un réchauffement de la troposphère (Bindoff et coll., 2013). La variation de la température est l'un des indicateurs clés d'un climat en évolution. Les variations de nombreuses autres variables climatiques sont liées directement ou indirectement à la variation de la température.

Pour ces raisons, une évaluation de l'évolution de la température annuelle moyenne au Canada est importante et offre un exemple pratique pour montrer l'approche utilisée pour élaborer les recommandations relatives aux variables de conception climatique du CNBC et du CHBDC dans les chapitres 3 à 6.

Pour chaque variable, les données sont présentées sous la forme (1) d'une **évaluation** des publications scientifiques existantes sur le climat; (2) de **recherches ciblées** entreprises dans le cadre du projet pour combler les lacunes des publications, en particulier en ce qui concerne les changements climatiques régionaux au Canada; et enfin (3) d'une **interprétation** des incidences des changements prévus pour les données de conception climatique.

Dans cet exemple, chacun de ces trois éléments est présenté pour les variations de la température annuelle moyenne au Canada, avec une description supplémentaire des méthodes, cartes et tableaux utilisés pour élaborer et transmettre des renseignements sur les changements projetés et l'incertitude des variables de conception qui pourraient être prises en compte dans les futures orientations du CNBC et du CHBDC.

2.6.2 Exemple - Évaluation

La section Évaluation présente un résumé des évaluations des publications nationales et internationales existantes et, si nécessaire, un aperçu critique d'autres publications scientifiques sur le climat. Comme le mentionne le chapitre 1, ce rapport emploie des termes calibrés pour décrire les degrés de confiance à l'égard des résultats et leur probabilité; ces termes calibrés sont en italiques dans le texte.

Selon le Rapport sur le climat changeant du Canada (RCCC) (Bush et Lemmen, 2019), il est quasiment certain que le climat du Canada s'est réchauffé et qu'il se réchauffera davantage dans l'avenir. Les augmentations observées de la température moyenne au Canada sont environ deux fois plus importantes que les augmentations correspondantes de la température moyenne mondiale. Entre 1948 et 2016, la meilleure estimation de l'augmentation de la température moyenne annuelle est de 1,7 °C pour l'ensemble du Canada et de 2,3 °C pour le nord du pays. Bien que les activités humaines et les variations naturelles du climat aient contribué au réchauffement observé au Canada, le facteur anthropique est dominant. Il est *probable* que plus de la moitié du réchauffement observé au Canada est causé par l'influence des activités humaines.

La 5º évaluation du GIEC a conclu que « Si l'augmentation des gaz à effet de serre se poursuit, les températures moyennes mondiales continueront d'augmenter au cours du 21º siècle » [traduction libre] (GIEC, 2013, p. 1031). Les éléments du système climatique mondial étant interreliés, l'évolution de la température dans une région particulière du monde, comme le Canada, est étroitement liée à l'évolution de la moyenne mondiale. Ainsi, il est *très probable* que la température continuera également d'augmenter au Canada tant que les augmentations de GES se poursuivront. C'est ce qu'illustre la figure 2.3, qui montre l'évolution de la température moyenne au Canada par rapport à l'évolution de la température moyenne mondiale. Conformément aux changements observés, la température moyenne au Canada devrait continuer à augmenter à peu près deux fois plus vite que la

moyenne mondiale, quel que soit le scénario de forçage. Autrement dit, la corrélation entre l'évolution de la température au Canada et celle de la température mondiale reste constante, comme le montre le fait que les résultats des différents scénarios sont tous harmonisés. Cette corrélation entre la moyenne mondiale et l'évolution de la température moyenne au Canada permet d'estimer les implications du changement mondial pour le Canada selon différents scénarios de forçage et niveaux de réchauffement climatique. En d'autres termes, la variation d'une variable climatique pertinente pour les BIPB, estimée dans le cadre d'un scénario de forçage, peut être mise à l'échelle pour se rapprocher de la variation dans le cadre d'un autre scénario de forçage, puisque le rapport entre la variation de la température au Canada et la variation de la température mondiale est à peu près constant. Bien entendu, il faut supposer que la variation de la variable climatique pertinente pour les BIPB s'adapte directement à la température, ce qui n'est pas toujours le cas. Par exemple, le niveau de la mer continuera à monter pendant des siècles après que la température moyenne mondiale, et donc aussi la température moyenne canadienne, se soit stabilisée.

Les températures futures dans le monde et au Canada refléteront l'effet combiné de la réponse aux émissions de GES et d'aérosols provenant des émissions humaines et de la variabilité interne naturelle. La variabilité interne naturelle du climat est simulée de manière réaliste par les modèles climatiques utilisés pour faire des projections du changement climatique futur (Jones et coll., 2013). La variabilité d'année en année des séries chronologiques des températures moyennes mondiales et canadiennes l'établit clairement. En revanche, la réponse forcée sous-jacente, telle qu'elle est estimée par la moyenne multi-modèle, est une valeur à croissance monotone qui suit de près les émissions cumulées de GES depuis l'ère préindustrielle (Allen et coll., 2009; Matthews et coll., 2009). La combinaison de la variabilité naturelle et de la lente réaction forcée est illustrée dans la figure 2.2. Dans l'évaluation des effets d'un réchauffement climatique au Canada, il est important de garder à l'esprit cette combinaison de changement forcé lent et de variabilité interne naturelle : l'avenir comportera toujours ses périodes chaudes et froides extrêmes superposées à un réchauffement lent forcé par les activités humaines.

La température annuelle moyenne devrait augmenter partout au Canada, avec des changements beaucoup plus importants dans le nord du pays. Selon le RCCC (Bush et Lemmen, 2019), un scénario de faibles émissions (RCP2.6), généralement compatible avec la limite de réchauffement climatique de l'Accord de Paris, augmentera la température moyenne annuelle au Canada de 1,8 °C supplémentaire d'ici le milieu du siècle (par rapport à la période de référence de 1986-2005 utilisée par Bush et Lemmen, 2019), les températures restant à peu près constantes par la suite. Un scénario d'émissions élevées (RCP8.5), dans leguel seules des réductions d'émissions limitées sont réalisées, ferait augmenter la température moyenne annuelle du Canada de plus de 6 °C d'ici la fin du 21e siècle. Dans tous les cas, le nord du Canada devrait se réchauffer davantage que le sud du pays. À court terme (2031-2050), les différences dans le schéma et l'ampleur du réchauffement entre le scénario à faibles émissions (RCP2.6) et le scénario d'émissions élevées (RCP8.5) sont modestes (de l'ordre de 0,5 °C à 1 °C). Cependant, pour la fin du siècle (2081-2100), les différences deviennent très importantes. Dans le scénario d'émissions élevées, les augmentations de température prévues sont supérieures d'environ 4 °C, en moyenne pour l'ensemble du Canada, par rapport au scénario de faibles émissions. Les différences sont encore plus notables dans le nord du Canada. Le réchauffement accru aux latitudes plus élevées est manifeste dans la moyenne annuelle. Il s'agit d'une caractéristique robuste des projections climatiques, tant pour le Canada que pour la Terre, et elle est attribuable à une combinaison de facteurs, notamment la réduction de la neige et de la glace (qui réduit l'albédo et augmente donc l'absorption d'énergie solaire à la surface) et l'augmentation du transport de chaleur à partir des latitudes méridionales.

2.6.3 Exemple – Recherche ciblée

La section consacrée à la **recherche ciblée** décrit les recherches et les analyses connexes de modèles effectuées dans le cadre du projet pour combler les lacunes des publications évaluées pour une variable de conception climatique donnée.

Le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) fournit des cartes de l'évolution de la température annuelle moyenne projetée à court terme et à la fin du siècle pour le Canada, en partant d'un ensemble de 29 MCM dans des scénarios d'émissions faibles et élevées. Comme le décrit le chapitre 1, l'approche recommandée pour les BIPB consiste plutôt à fournir des changements propres aux sites et aux régions liés à des niveaux fixes de réchauffement climatique, plutôt que pour des périodes fixes dans le cadre de différents scénarios. En outre, les variables de conception qui pourraient être prises en compte dans les futures orientations du CNBC et du CHBDC sont communiquées à des endroits précis (comme dans le tableau C-2 du CNBC) et leur calcul peut nécessiter des données à haute résolution temporelle (par exemple, horaire). De plus, les sources d'incertitude, y compris la variabilité interne, doivent être évaluées pour attribuer des degrés de confiance aux futures projections. Pour ces raisons, cette évaluation initiale s'appuie sur les résultats de l'ensemble de modèles CanRCM4 LE, qui compte 50 membres.

À titre de référence, les projections propres aux sites et aux régions figurant dans ce rapport sont obtenues de CanRCM4 LE ainsi :

- 1. Pour chaque cellule de la grille et chaque niveau de réchauffement planétaire, les données de conception climatique sont estimées pour a) chaque membre de l'ensemble du CanRCM4; et b) l'ensemble intégral; cette « valeur d'ensemble » peut reposer sur la mise en commun de l'ensemble (par exemple, pour les analyses des valeurs extrêmes) ou en prenant la moyenne de l'ensemble par rapport aux membres de l'ensemble (par exemple, pour les températures de conception).
- 2. Pour chaque cellule de la grille et chaque niveau de réchauffement climatique, a) les changements prévus pour chaque membre de l'ensemble sont calculés par rapport à la moyenne de l'ensemble de référence; et b) le changement prévu dans la moyenne d'ensemble est calculé par rapport à la moyenne de l'ensemble de référence.
- **3.** Pour chaque cellule de la grille et chaque niveau de réchauffement planétaire, les 25e et 75e centiles sont calculés à partir des changements projetés pour les membres de l'ensemble à partir de l'étape 2a.
- **4.** Pour chaque site d'intérêt et chaque niveau de réchauffement planétaire, a) la moyenne d'ensemble de l'étape 2b; et b) les valeurs des 25° et 75° centiles de l'étape 3 sont extraites pour la cellule de grille terrestre la plus proche.
- **5.** Des projections régionales représentatives de la moyenne d'ensemble et des 25° et 75° centiles sont obtenues en prenant la médiane spatiale par rapport aux valeurs de l'étape 4 pour les grandes zones à l'échelle provinciale au Canada.

La figure 2.4 présente les projections moyennes d'ensemble de l'évolution de la température annuelle moyenne du CanRCM4 LE pour les niveaux de +1 °C, +2 °C et +3 °C de réchauffement planétaire; la section 2.5.1 indique le moment où ces niveaux de réchauffement planétaire se sont produits. Pour compléter les cartes des changements projetés, des résumés des changements avec des niveaux de réchauffement planétaire croissants de +0.5 °C à +3.5 °C sont également calculés dans de grandes régions du Canada. Afin de mieux représenter l'environnement bâti et les centres de population qui sont pertinents pour les BIPB, les résumés régionaux reposent sur les changements projetés interpolés aux endroits indiqués dans la figure 2.5. Ces emplacements, qui sont similaires à ceux du tableau C-2 du CNBC, sont concentrés dans les parties méridionales de chaque région.

Les résumés régionaux montrent les valeurs médianes des statistiques d'ensemble pour les lieux de chaque région (Colombie-Britannique, Prairies, Ontario, Québec, Atlantique et Nord), la variabilité interne étant communiquée au moyen du quartile inférieur (25° centile) et du quartile supérieur (75° centile) des membres de l'ensemble CanRCM4 LE. Les variations régionales de la température annuelle moyenne sont indiquées dans la figure 2.6 et les résumés numériques des niveaux de réchauffement climatique de +1 °C, +2 °C et +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016 sont donnés dans le tableau 2.2.

Les résultats du CanRCM4 LE sont conformes à ceux présentés dans le RCCC pour un ensemble de MCM du CMIP5. Les températures canadiennes dans chaque région augmentent proportionnellement à la variation de la température moyenne mondiale, augmentation d'environ 1,5 à 2 fois supérieure à la moyenne mondiale; une sensibilité plus élevée est manifeste dans le Nord. L'ampleur relative du changement forcé de la variabilité interne de ces moyennes régionales – le rapport « signal/bruit » (S/B) – est élevée, ce qui signifie que le réchauffement régional est un signal robuste qui émerge du bruit de la variabilité climatique historique à des niveaux très faibles de variation de la température moyenne mondiale.

2.6.4 Exemple – Interprétation

La **section Interprétation** combine les résultats de l'évaluation scientifique avec ceux de la recherche ciblée afin de fournir des directives et des recommandations sur les changements prévus qui pourraient être pris en compte dans les futures orientations du CNBC et du CHBDC relatives aux données de conception climatique.

La variation de la température moyenne annuelle est une variable de niveau 1. Les données tirées du RCCC (Bush et Lemmen, 2019) et les simulations du CanRCM4 LE du CanESM2 donnent à penser qu'il est *quasiment certain* que le climat du Canada se réchauffera davantage à l'avenir. Les augmentations projetées de la température annuelle moyenne dans les régions du Canada aux endroits pertinents pour les BIPB sont environ 1,5 à 2 fois les augmentations correspondantes de la température moyenne mondiale, et les augmentations sont plus importantes dans le Nord. Pour le Canada, les résultats sont cohérents entre les MCM du CMIP5 et le CanRCM4 LE du CanESM2 (figure 2.6), et sont indépendants du scénario de forçage (par exemple, figure 2.3).

Les variations prévues de la température annuelle moyenne dans des endroits similaires à ceux du tableau C-2 du CNBC sont fournies à l'annexe 1.2. En raison de la cohérence des différentes sources de données mentionnées ci-dessus, les données sont tirées directement des projections du CanRCM4 LE pour chaque niveau de réchauffement planétaire. La correspondance entre les membres de l'ensemble – une estimation de l'incertitude liée à la variabilité interne¹0 – est communiquée en termes de rapport signal/bruit, le rapport entre la répartition de l'ensemble et l'ampleur du changement forcé :

$$SB = \sigma / |\Delta x|$$

où Δx est la variation projetée, σ_r est une estimation robuste de l'écart-type de l'ensemble $(\sigma_r = IQR/1,349)$, et l'IQR est l'écart interquartile. Les valeurs du rapport S/B sont exprimées sur une échelle comprise entre 0 et 1 (les valeurs >1 sont fixées à 1).

Une valeur du rapport S/B proche de 0 signifie que le rapport entre la variabilité interne simulée et le changement forcé est faible ou, à l'inverse, que le rapport signal/bruit est important. Une valeur S/B égale à 1 signifie que l'écart type de l'ensemble est de la même ampleur que le changement prévu; en d'autres termes, le rapport signal/bruit est faible. Les fourchettes du rapport S/B sont utilisées ici en combinaison avec une évaluation d'expert qui prend en compte des sources d'incertitude non quantifiées supplémentaires pour communiquer le degré de confiance final évalué dans les projections.

Il convient de souligner que les valeurs du rapport S/B ne peuvent être utilisées significativement de manière isolée. Pour certaines variables, la valeur du rapport S/B sera proche de 1 simplement parce que l'ampleur de la variation prévue est très faible. Si le niveau global de compréhension

La variabilité interne fait référence au bruit météorologique et aux variations naturelles du climat qui sont inhérents aux systèmes dynamiques chaotiquement variables, comme le système terrestre. Ce type de variabilité, qui est un exemple d'incertitude aléatoire, est quantifiable mais n'est pas réductible. Il convient de noter que le rapport S/B ne reflète pas d'autres sources importantes d'incertitude, comme celle liée au choix du modèle climatique et du scénario d'émissions futures. Ces derniers sont des exemples d'incertitudes épistémiques qui sont potentiellement réductibles, mais très difficiles à quantifier.

des causes de la variation prévue est élevé, l'évaluation finale de la confiance sera probablement également élevée. Pour d'autres variables, la confiance dans les simulations du modèle peut être faible (par exemple, en raison de l'incapacité du MCR à résoudre des processus physiques importants), indépendamment du rapport entre la variabilité interne simulée et le changement forcé.

Pour le changement de la température moyenne annuelle, les valeurs du rapport S/B pour le modèle CanRCM4 LE sont universellement proches de 0 (valeurs moyennes < 0,2 pour tous les niveaux de réchauffement climatique). En combinaison avec les preuves solides globales rapportées dans les évaluations nationales et internationales, il existe une confiance *très élevée* dans les futures projections de la variation de la température annuelle moyenne.

Tableau 2.2 : Projection de l'évolution de la température annuelle moyenne pour les localités du tableau C-2 dans six régions canadiennes (voir figure 2.5) et pour l'ensemble du Canada pour les niveaux de réchauffement climatique de +1 °C, +2 °C et +3 °C par rapport à la période de référence de 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du modèle CanRCM4 LE. Figure 2.4 : Projection de l'évolution (en °C) de la température annuelle moyenne, selon le modèle CanRCM4 LE, pour les niveaux de réchauffement climatique de +1 °C (image du haut), +2 °C (image du centre) et +3 °C (image du bas) par rapport à la période de référence de 1986-2016.

Variation de la température moyenne en surface [°C]	Niveau de réchauffement planétaire		
Région	+1°C	+2°C	+3°C
Colombie-Britannique	1.4 (1.3, 1.4)	2.7 (2.6, 2.8)	4.1 (4.0, 4.2)
Prairies	1.4 (1.3, 1.6)	2.9 (2.8, 3.1)	4.5 (4.3, 4.5)
Ontario	1.6 (1.5, 1.6)	2.9 (2.9, 3.0)	4.3 (4.2, 4.4)
Québec	1.6 (1.5, 1.7)	3.1 (3.0, 3.2)	4.6 (4.5, 4.6)
Atlantique	1.5 (1.4, 1.6)	2.8 (2.8, 2.9)	4.2 (4.1, 4.3)
Nord	1.9 (1.8, 2.0)	3.7 (3.6, 3.8)	5.5 (5.4, 5.7)
Canada	1.6 (1.5, 1.6)	3.0 (2.9, 3.0)	4.3 (4.3, 4.4)

Figure 2.4 : Projection de l'évolution (en °C) de la température annuelle moyenne, selon le modèle CanRCM4 LE, pour les niveaux de réchauffement climatique de +1 °C (image du haut), +2 °C (image du centre) et +3 °C (image du bas) par rapport à la période de référence de 1986-2016.

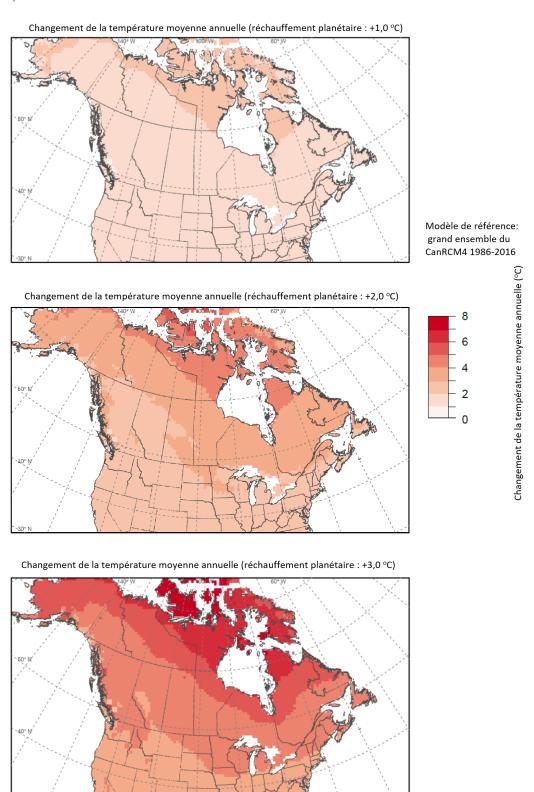


Figure 2.5 : Localités (similaires à celles mentionnées dans le tableau C-2 du CNBC) qui sont utilisées pour résumer les projections régionales pour chaque variable de conception climatique. Malheureusement, les localités situées au nord du 75° parallèle nord doivent actuellement être exclus, car ils ne font pas partie du champ du CanRCM4.

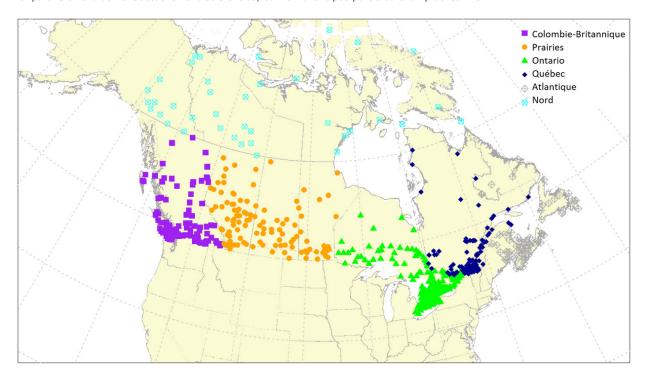
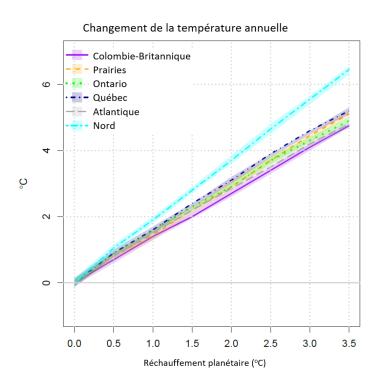


Figure 2.6 : Projection de l'évolution de la température annuelle moyenne pour les localités du tableau C-2 dans six régions canadiennes (voir figure 2.5) en fonction de l'évolution de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence de 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimales et maximales des zones ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir du modèle CanRCM4 LE.



3. TEMPÉRATURE

3.1 Degrés-jours de chauffage, températures de conception et températures moyennes quotidiennes minimales et maximales

3.1.1 Évaluation

Les données de conception en fonction du climat relatives à la température en surface sont rapportées dans le CNBC (degrés-jours de chauffage et températures de conception horaires pour janvier et juillet) et le CHBDC (températures moyennes quotidiennes maximales et minimales de l'air). Comme l'évolution de ces variables est étroitement liée à celle de la température moyenne annuelle indiquée au chapitre 2, l'évaluation qui y est présentée est également pertinente dans le présent chapitre. En outre, étant donné leur nature saisonnière - les extrêmes horaires de juillet et les températures moyennes quotidiennes maximales sont liés aux températures estivales, et les degrés-jours de chauffage, les extrêmes horaires de janvier et les températures moyennes quotidiennes minimales sont liés aux températures hivernales - les évaluations des températures saisonnières et des extrêmes de température sont également pertinentes.

Selon le RCCC (Bush et Lemmen, 2019), les températures moyennes saisonnières ont augmenté partout au Canada, et le réchauffement le plus important s'est produit en hiver. Cela correspond aux projections sur les changements climatiques, qui indiquent que la température moyenne saisonnière augmentera encore partout, avec des changements beaucoup plus importants dans le nord du Canada en hiver. Le réchauffement futur sera accompagné d'une saison de croissance plus longue, de moins de degrés-jours de chauffage et de plus de degrés-jours de climatisation. Les changements dans les températures extrêmes, tant dans les observations que dans les projections, concordent avec le réchauffement. Les températures extrêmement élevées sont devenues plus élevées, tandis que les températures extrêmement basses sont devenues moins basses. De tels changements devraient se poursuivre, l'ampleur des changements étant généralement proportionnelle à l'ampleur de la variation de la température moyenne.

Dans tous les cas, le nord du Canada devrait se réchauffer davantage que le Sud du pays, et les températures hivernales devraient augmenter davantage que les températures estivales. Cette amplification dans les latitudes élevées n'est pas apparente en été, car les températures à la surface de l'océan Arctique n'augmentent que lentement, étant limitées par l'absorption de la chaleur latente de fusion alors que la glace continue de fondre et par l'absorption du rayonnement solaire par les surfaces libres de l'océan, dont la chaleur est ensuite transférée vers les eaux plus profondes. Dans le Sud du Canada, la variation des températures hivernales devrait être plus importante dans l'Est que dans l'Ouest, la Colombie-Britannique devant se réchauffer légèrement moins que le reste du Canada. La variation des températures estivales devrait être plus uniforme dans l'ensemble du pays.

3.1.2 Recherche ciblée

Le RCCC comprend des cartes des variations de température saisonnière prévues à court terme et à la fin du siècle pour le Canada, sur la base d'un ensemble de 29 MCG dans des scénarios d'émissions faibles et élevées. Des projections régionales de l'évolution des degrés-jours de chauffage sont également fournies pour les mêmes périodes, modèles et scénarios d'émissions. Comme décrit au chapitre 1, l'approche recommandée pour les BIPB consiste plutôt à communiquer les changements à l'échelle régionale qui sont liés à des niveaux fixes de réchauffement climatique, plutôt qu'à des périodes fixes dans différents scénarios. Cette approche est évaluée, de manière limitée, dans une analyse des indices climatiques pour le Canada par Li et coll. (2018). Les résultats concernant les degrés-jours de chauffage ont servi de base au RCCC et au présent rapport. Un lien vers l'analyse complète est fourni à l'annexe 2.3.

Les simulations modélisées du climat historique diffèrent souvent quelque peu du climat observé, ce qui reflète les biais des modèles (Flato et coll., 2013). Ces biais découlent d'un certain nombre de facteurs, notamment les difficultés à simuler avec précision les nuages et la circulation atmosphérique, une compréhension incomplète des processus à des échelles non résolues et une incapacité à résoudre la variabilité topographique à petite échelle. Les indices de température comme les degrés-jours de chauffage inférieurs à 18 °C dépendent de seuils absolus, ce qui signifie que les biais dans l'état climatique moyen qui est simulé par le modèle peuvent avoir une incidence sur les projections. Par conséquent, lorsque les valeurs absolues sont importantes, une certaine forme de correction des biais peut être nécessaire. C'est pourquoi les recherches supplémentaires qui ont été entreprises pour évaluer les changements prévus sur le plan des degrés-jours de chauffage (voir Li et coll., 2018; annexe 2.3) sont basées sur des simulations MCG CMIP5 statistiquement réduites à l'échelle et dont les biais ont été corrigés.

Afin d'approfondir ce travail pour le présent rapport, les projections basées sur l'ensemble CanESM2-CanRCM4 LE ont été calculées pour différents niveaux de réchauffement climatique. Toutes les variables de température horaire et quotidienne nécessaires au calcul des variables de température du CNBC et du CHBDC sont incluses dans les archives du CanRCM4 LE, mais comme d'autres modèles, le CanRCM4 LE est également touché par des biais. Ainsi, les simulations du CanRCM4 LE utilisées ici pour calculer les degrés-jours de chauffage ont d'abord fait l'objet d'une correction des biais, puis elles ont été réduites à l'échelle suivant Sobie et Murdock (2017). D'autre part, les changements d'indices définis dans un sens relatif, tels que les changements projetés dans le 2,5° centile des températures horaires de janvier, sont généralement moins touchés par les biais, car le seuil de centile concerné est calculé séparément pour les observations et à partir des extrants du modèle. Les résultats présentés pour les extrêmes de chaleur et de froid - températures de conception de janvier et de juillet et températures moyennes quotidiennes minimales et maximales - sont donc basés sur les extrants du modèle CanRCM4 LE pour lesquels les biais n'ont pas été corrigés, car ils ne dépendent pas du franchissement de seuils fixes, comme les 18 °C utilisés pour les degrés-jours de chauffage.

Les températures de conception au thermomètre sec du 2,5° centile de janvier, du 1er centile de janvier et du 2,5° centile de juillet ont été estimées sur la base des températures horaires moyennes de l'air près de la surface à partir des 15 simulations CanRCM4 LE avec les températures horaires archivées. De même, les valeurs de la température au thermomètre humide ont été calculées à partir des extrants d'humidité relative et de température de l'air moyenne horaire, selon Stull (2011). Les degrés-jours de chauffage inférieurs à 18 °C ont été estimées à partir de versions à biais corrigés et à échelle réduite des températures de l'air moyennes quotidiennes simulées près de la surface des 50 membres du CanRCM4 LE. Pour les températures de conception horaires, les données de conception particulières ont été estimées (1) en regroupant toutes les températures horaires de janvier (ou de juillet) pour un membre donné de l'ensemble, (2) en calculant le ou les centiles particuliers, et enfin (3) en utilisant la moyenne de l'ensemble pour toutes les simulations.

Les projections du CanRCM4 LE indiquent une diminution progressive des degrés-jours de chauffage (figure 3.1), des augmentations des températures de conception de janvier et de juillet (figure 3.2), et des augmentations des températures moyennes quotidiennes minimales et maximales (figure 3.3) en phase avec le changement de la température moyenne mondiale. Dans l'ensemble, les températures extrêmement chaudes deviendront plus chaudes, tandis que les températures extrêmement froides deviendront moins froides, l'ampleur du changement étant généralement proportionnelle à l'ampleur de la variation de la température moyenne mondiale.

L'incertitude de ces projections provient à la fois de la variabilité non forcée du climat qui est intrinsèque au système climatique (appelée variabilité interne) et des incertitudes liées aux scénarios de forçage et aux modèles. Comme indiqué au chapitre 2, la variabilité interne peut être bien quantifiée avec le grand ensemble CanRCM4, tandis que les autres facteurs contribuant à l'incertitude des projections ne sont pas facilement quantifiables. Néanmoins, les évaluations et la littérature disponibles suggèrent que, pour les quantités liées à la température, l'incertitude du scénario de forçage prévaut sur ces deux dernières sources, en particulier pour les niveaux de réchauffement plus importants. En outre, les recherches indiquent que l'approche utilisée dans ce rapport, qui met en rapport les changements des données de

conception avec les changements précisés des niveaux de température moyenne mondiale, contribue à réduire la sensibilité à l'incertitude des modèles et des scénarios.

L'ampleur du signal de changements climatiques par rapport à la variabilité interne peut être estimée à partir de la répartition de l'ensemble des simulations CanRCM4 LE (voir les zones ombrées des figures 3.1 à 3.3). Le rapport signal/bruit interne qui en résulte pour les projections de degrésjours de chauffage, qui intègrent les dépassements de température au fil du temps, est très élevé, comparable à celui de la température moyenne annuelle. Le signal émerge du bruit de la variabilité interne historique du climat au niveau de +0,5 °C de réchauffement planétaire. Les changements forcés des autres indices de température apparaissent à des niveaux de réchauffement planétaire similaires, malgré une variabilité interne plus importante, en particulier pour les températures de conception horaires. Les températures de conception du 1er et du 2,5e centiles correspondent à des conditions extrêmes qui se produisent sur une très petite partie de chaque année (respectivement 8 et 19 heures) et sont donc soumises à une variabilité interannuelle beaucoup plus importante. On a également un degré de confiance plus faible en la capacité du modèle à bien simuler les valeurs des extrémités supérieures et inférieures, car les processus de rétroaction qui permettent à de telles valeurs de se produire pourraient ne pas être bien représentés. De même, les températures moyennes quotidiennes minimales et maximales annuelles dépendent des jours les plus froids et les plus chauds de l'année. À titre de référence, les tableaux 3.1 à 3.4 fournissent des résumés régionaux des changements prévus et de l'étendue de l'ensemble.

Sur le plan spatial, les tendances régionales de réchauffement des variables de température du CNBC et du CHBDC (figures 3.4 à 3.7) reflètent généralement celles prévues pour les températures moyennes saisonnières : les variables hivernales (froid extrême) connaissent un réchauffement plus important dans le Nord, tandis que les variables estivales (chaleur extrême) se réchauffent plus rapidement dans le Sud-Ouest du Canada. Par rapport aux projections saisonnières rapportées dans le RCCC (Bush et Lemmen, 2019), les températures de conception de juillet sont censées suivre les changements prévus de la température moyenne estivale, mais à un rythme plus élevé. De même, les températures de conception de janvier devraient se réchauffer plus rapidement que la température moyenne hivernale. On observe une tendance similaire pour les températures moyennes quotidiennes maximales et minimales. À l'échelle régionale, il existe des preuves d'un réchauffement accru dans les régions montagneuses en raison des rétroactions locales de l'albédo de la neige (Walton et coll., 2017).

Les résultats sont généralement conformes à ceux prévus par les MCG CMIP5. Pour les degrés-jours de chauffage et les indices liés aux températures extrêmes, les projections de différents modèles climatiques (annexe 2.3) pour le court terme (2031-2050) dans un scénario d'émissions élevées (RCP8.5) concordent sur la direction (augmentation ou diminution) des changements pour presque toutes les régions. Les projections des modèles pour la fin du siècle (2081-2100) s'accordent également sur la direction des changements pour toutes les variables de température pour chaque région dans un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Cela indique la fiabilité des changements prévus des variables de température pour l'avenir.

3.1.3 Interprétation

Les données de conception climatique du CNBC et du CHBDC relatives à la température de surface sont des variables de niveau 1. Conformément aux projections de la température moyenne annuelle (chapitre 2), les données disponibles du RCCC (Bush et Lemmen, 2019), les simulations des MCG CMIP5 et les simulations de CanESM2-CanRCM4 LE concordent et indiquent que le réchauffement du climat canadien (quasiment certain) donnera lieu à une augmentation des températures de conception de janvier et de juillet et des températures quotidiennes moyennes minimales et maximales, ainsi qu'à une diminution des degrés-jours de chauffage dans toutes les régions du Canada. Sur le plan spatial, les données de conception climatique qui décrivent la partie froide de l'année ont tendance à changer davantage lorsqu'on se déplace du sud vers le nord, tandis que les changements des extrêmes de chaleur sont plus uniformes sur le plan spatial. En général, les changements prévus des températures extrêmes s'échelonnent de façon à peu près linéaire avec le réchauffement climatique à un rythme qui dépasse celui de la température moyenne annuelle.

Les changements prévus des indices de température de surface à des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 sont fournis à l'annexe 1.2. Il n'est pas possible d'attribuer un degré de confiance à ces projections propres à chaque lieu, mais la confiance est nécessairement plus faible que pour les évaluations régionales des changements prévus dans les données de conception liées à la température. En effet, on peut s'attendre à ce que les limites de la représentation des processus locaux dans le modèle CanRCM4 et son modèle de surface terrestre constitutif aggravent et exacerbent les biais et les erreurs qui sont apparents à plus grande échelle.

Comme pour la température moyenne annuelle, les valeurs sont calculées à partir des projections du CanRCM4 LE pour chaque niveau de réchauffement climatique. En général, le degré de concordance entre les membres de l'ensemble, qui sont différents parce que chacun est touché par sa propre réalisation indépendante de la variabilité interne, est modéré à élevé à l'échelle régionale. Le niveau de réchauffement (donc le moment; voir le tableau 2.1) auguel les changements émergent du bruit de la variabilité interne peut être évalué en considérant les valeurs du rapport bruit/signal. Pour les variables de conception liées à la température, les valeurs du rapport bruit/signal < 0,2 sont atteintes à la majorité des emplacements à des niveaux de réchauffement planétaire de +0,5 °C (degrés-jours de chauffage), +1,0 °C (température de conception au thermomètre humide du 2,5e centile de juillet), +1,5 °C (températures moyennes quotidiennes minimales et maximales, température de conception du 2,5° centile de janvier et température de conception au thermomètre sec du 2,5° centile de juillet) et +2,0 °C (température de conception du 1er centile de janvier). Étant donné la convergence des données tirées des évaluations internationales et nationales et des différents modèles climatiques, il existe un degré de confiance élevé dans les futures projections des données de conception en fonction du climat relatives à la température de surface à l'échelle régionale. Quant aux projections de la température moyenne annuelle, pour lesquelles le degré de confiance est très élevé, l'incertitude est un peu plus grande pour les projections des données de conception liées à la température en raison d'une variabilité interne plus élevée, de l'influence des biais du modèle sur les dépassements des seuils absolus, comme dans le cas des degrés-jours de chauffage et des incertitudes associées à la réduction d'échelle et aux ajustements des biais qui en découlent, ainsi que d'une incertitude plus grande quant au rendement du modèle climatique pour les extrêmes. Comme l'indique le paragraphe précédent, le degré de confiance dans les projections à des emplacements individuels est nécessairement plus faible, même si les valeurs du rapport bruit/signal sont faibles, car il y a un degrée de confiance plus faible que les détails locaux de la simulation de la température sont bien représentés dans le modèle CanRCM4 (et, par ailleurs, dans tous les autres modèles fonctionnant à des résolutions spatiales comparables ou inférieures).

Tableau 3.1: Changements prévus des degrés-jours de chauffage inférieurs à 18 °C à des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir des simulations CanRCM4 LE dont les biais ont été corrigés.

Changements des degrés-jours inférieurs à 18°C [°C-jours]	Niveau de réchauffement planétaire			
Région	+1°C +2°C +3°C			
Colombie-Britannique	-403 (-447, -363)	-757 (-808, -722)	-1088 (-1128, -1057)	
Prairies	-461 (-515, -428)	-891 (-938, -845)	-1274 (-1332, -1235)	
Ontario	-424 (-461, -393)	-781 (-820, -746)	-1127 (-1178, -1068)	
Québec	-466 (-494, -430)	-874 (-917, -825)	-1252 (-1321, -1183)	
Atlantique	-456 (-489, -420)	-834 (-861, -795)	-1194 (-1258, -1127)	
Nord	-692 (-740, -629)	-1328 (-1328, -1274)	-1917 (-1947, -1835)	
Canada	-449 (-487, -411)	-836 (-887, -794)	-1196 (-1257, -1139)	

Tableau 3.2: Changements prévus de la température de conception du 2.5° centile de janvier (en haut) et du 1° centile de janvier (en bas) pour des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Changement de la temp. de conception du 2,5° centile de janvier [°C]	Niveau de réchauffement planétaire			
Région	+1°C +2°C +3°C			
Colombie-Britannique	2.3 (1.4, 3.3)	4.9 (3.5, 6.6)	6.7 (5.0, 8.8)	
Prairies	2.9 (1.8, 4.1)	5.2 (3.3, 6.7)	8.1 (6.3, 10.1)	
Ontario	4.1 (3.4, 4.7)	6.9 (6.0, 7.6)	10.1 (9.3, 11.3)	
Québec	4.3 (3.4, 5.2)	7.6 (6.9, 8.3)	11.3 (10.3, 12.1)	
Atlantique	4.1 (3.5, 4.6)	7.1 (6.5, 7.5)	10.1 (9.4, 10.9)	
Nord	3.3 (2.7, 4.0)	6.2 (5.3, 7.0)	9.5 (8.4, 10.4)	
Canada	3.6 (3.0, 4.4)	6.2 (5.5, 7.3)	9.4 (8.6, 10.8)	

Changement de la temp. de conception du 1 ^{er} centile de janvier [°C]	Niveau de réchauffement planétaire			
Région	+1°C +2°C +3°C			
Colombie-Britannique	2.3 (1.3, 3.4)	5.0 (3.4, 6.8)	6.9 (5.0, 8.9)	
Prairies	2.7 (1.5, 4.1)	5.0 (3.1, 6.6)	8.1 (6.3, 9.8)	
Ontario	4.2 (3.3, 5.0)	7.1 (6.3, 8.1)	10.8 (9.6, 12.2)	
Québec	4.3 (3.1, 5.2)	7.7 (6.7, 8.2)	11.7 (10.5, 12.5)	
Atlantique	4.0 (3.3, 4.8)	7.5 (6.8, 8.1)	10.9 (10.1, 11.4)	
Nord	3.2 (2.4, 4.0)	6.3 (5.0, 7.0)	9.1 (7.9, 10.4)	
Canada	3.8 (3.0, 4.6)	6.5 (5.7, 7.6)	9.8 (8.5, 11.1)	

Tableau 3.3 : Changements prévus de la température de conception du 2,5° centile de juillet au thermomètre sec (en haut) et de la température de conception du 2,5° centile de juillet au thermomètre humide (en bas) pour des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Changement de la temp. de conception du 2,5° centile de juillet [°C] au thermomètre sec	Niveau de réchauffement planétaire			
Région	+1°C +2°C +3°C			
Colombie-Britannique	2.2 (1.8, 2.6)	4.2 (3.7, 4.8)	6.8 (6.2, 7.4)	
Prairies	2.3 (1.6, 2.7)	4.0 (3.4, 4.7)	6.0 (5.4, 6.5)	
Ontario	1.6 (1.3, 1.9)	3.0 (2.5, 3.4)	4.1 (3.8, 4.5)	
Québec	1.4 (1.1, 1.7)	3.0 (2.7, 3.3)	4.1 (3.9, 4.5)	
Atlantique	1.3 (1.1, 1.6)	2.8 (2.6, 3.0)	4.1 (3.9, 4.4)	
Nord	1.7 (1.3, 2.2)	3.2 (2.7, 3.8)	4.7 (4.3, 5.3)	
Canada	1.6 (1.3, 1.9)	3.0 (2.7, 3.5)	4.3 (4.0, 4.6)	

Changement de la temp. de conception du 2,5° centile de juillet [°C] au thermomètre humide	Niveau de réchauffement planétaire			
Région	+1°C +2°C +3°C			
Colombie-Britannique	1.8 (1.5, 2.1)	3.5 (3.2, 3.8)	5.3 (5.0, 5.8)	
Prairies	1.8 (1.3, 2.0)	3.1 (2.8, 3.4)	4.6 (4.3, 4.9)	
Ontario	1.2 (1.0, 1.4)	2.3 (2.1, 2.6)	3.2 (3.1, 3.4)	
Québec	1.1 (0.9, 1.4)	2.4 (2.2, 2.5)	3.3 (3.1, 3.5)	
Atlantique	1.3 (1.2, 1.4)	2.6 (2.4, 2.7)	3.8 (3.6, 3.9)	
Nord	1.6 (1.3, 1.9)	2.8 (2.5, 3.3)	4.3 (4.0, 4.8)	
Canada	1.3 (1.1, 1.5)	2.5 (2.2, 2.7)	3.6 (3.3, 3.8)	

Tableau 3.4 : Changements prévus de la température moyenne quotidienne maximale annuelle (en haut) et de la température moyenne quotidienne minimale annuelle (en bas) pour des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Changement de la temp. moy. max. [°C]	Niveau de réchauffement planétaire		
Région	+1°C	+2°C	+3°C
Colombie-Britannique	1.7 (1.4, 2.1)	3.6 (3.2, 4.0)	5.6 (5.2, 6.0)
Prairies	1.8 (1.4, 2.2)	3.5 (3.1, 3.9)	5.2 (4.8, 5.6)
Ontario	1.5 (1.2, 1.7)	2.7 (2.4, 2.9)	3.9 (3.5, 4.2)
Québec	1.4 (1.1, 1.7)	2.6 (2.3, 2.9)	3.8 (3.6, 4.2)
Atlantique	1.4 (1.2, 1.6)	2.6 (2.4, 2.8)	3.9 (3.7, 4.2)
Nord	1.5 (1.2, 1.9)	2.9 (2.6, 3.3)	4.4 (4.1, 4.8)
Canada	1.5 (1.2, 1.8)	2.7 (2.4, 3.0)	4.0 (3.7, 4.3)

Changement de la temp. moy. min. [°C]	Niveau de réchauffement planétaire		
Région	+1°C	+2°C	+3°C
Colombie-Britannique	2.2 (1.6, 2.8)	4.3 (3.6, 5.1)	6.5 (5.6, 7.2)
Prairies	2.6 (1.9, 3.3)	5.3 (4.4, 6.0)	8.0 (7.2, 8.8)
Ontario	3.2 (2.6, 3.8)	6.5 (6.0, 7.0)	9.4 (9.0, 9.9)
Québec	3.8 (3.2, 4.4)	7.6 (6.9, 8.2)	11.1 (10.4, 11.7)
Atlantique	3.6 (3.0, 4.0)	7.1 (6.6, 7.5)	9.8 (9.2, 10.3)
Nord	2.9 (2.2, 3.5)	5.8 (5.2, 6.5)	9.1 (8.4, 9.9)
Canada	3.0 (2.5, 3.5)	5.9 (5.4, 6.5)	9.0 (8.4, 9.6)

Figure 3.1 : Changements prévus des degrés-jours de chauffage inférieurs à 18 °C pour les localités du tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction du changement de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des zones ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir des simulations du CanRCM4 LE dont les biais ont été corrigés.

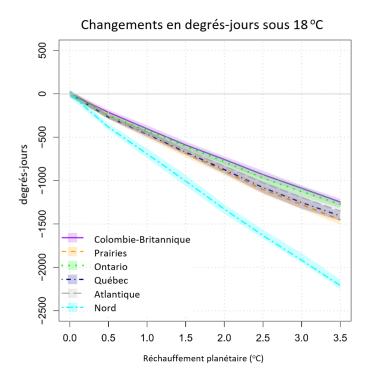


Figure 3.2 : Changements prévus des températures de conception de janvier et de juillet pour des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction du changement de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des zones ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir du CanRCM4 LE.

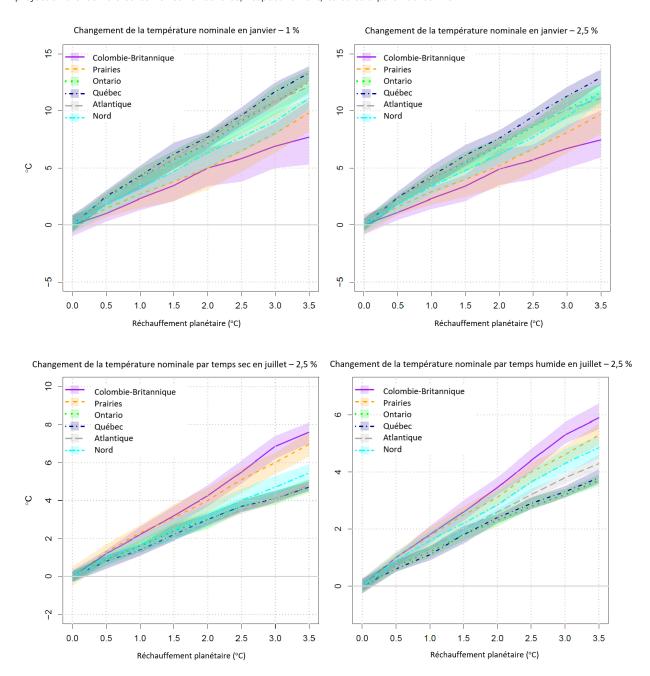


Figure 3.3 : Changements prévus de la température quotidienne moyenne annuelle minimale (à gauche) et annuelle maximale (à droite) pour des localités qui se rapprochent de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes, en fonction du changement de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des zones ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir du CanRCM4 LE.

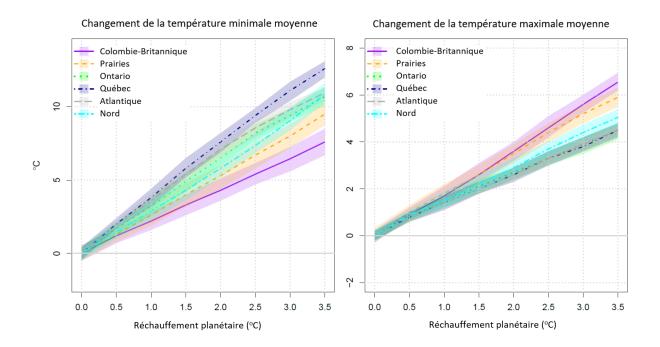


Figure 3.4 : Changements prévus (en degrés °C-jours) des degrés-jours de chauffage inférieurs à 18 °C, selon le CanRCM4, pour les niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C (image du haut), de +2 °C (image du centre) et de +3 °C (image du bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.

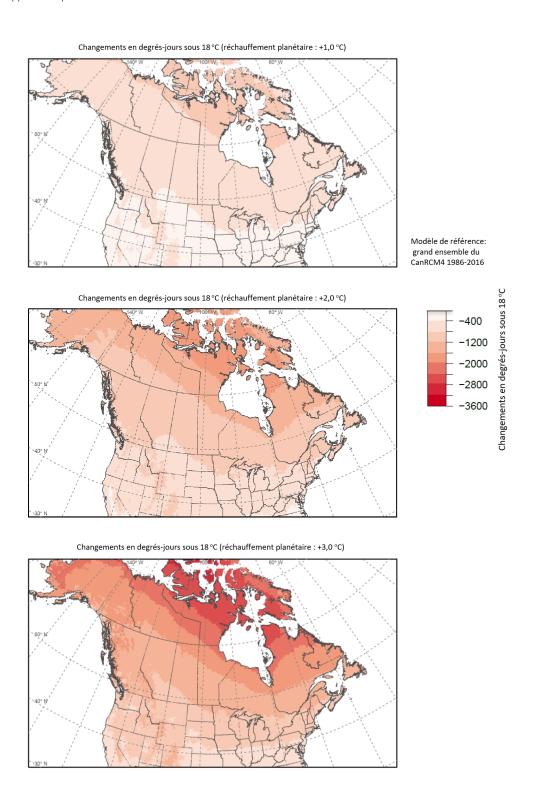


Figure 3.5 : Changements prévus (en °C) des températures de conception du $2,5^{\circ}$ centile (images de gauche) et du 1° centile (images de droite) de janvier, selon le CanRCM4 LE, pour les niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C (images du haut), de +2 °C (images du centre) et de +3 °C (images du bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.

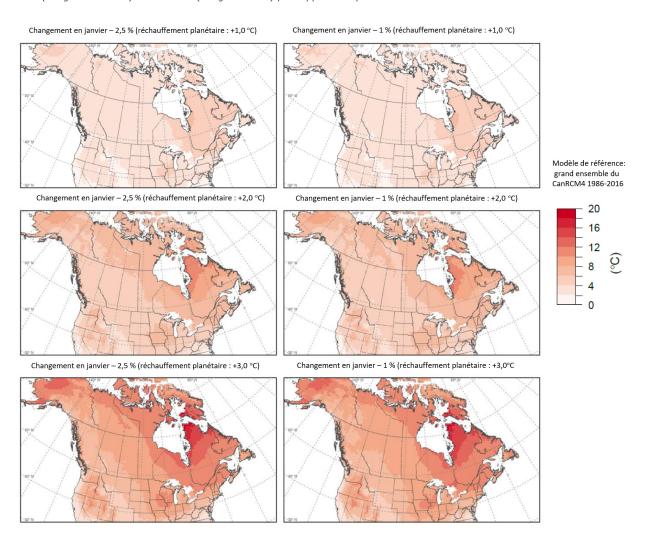


Figure 3.6 : Changements prévus (en °C) des températures de conception du $2,5^{\circ}$ centile de juillet au thermomètre sec (images de gauche) et du $2,5^{\circ}$ centile de juillet au thermomètre humide (images de droite), selon le CanRCM4 LE, pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C (images du haut), de +2°C (images du centre) et de +3 °C (images du bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.

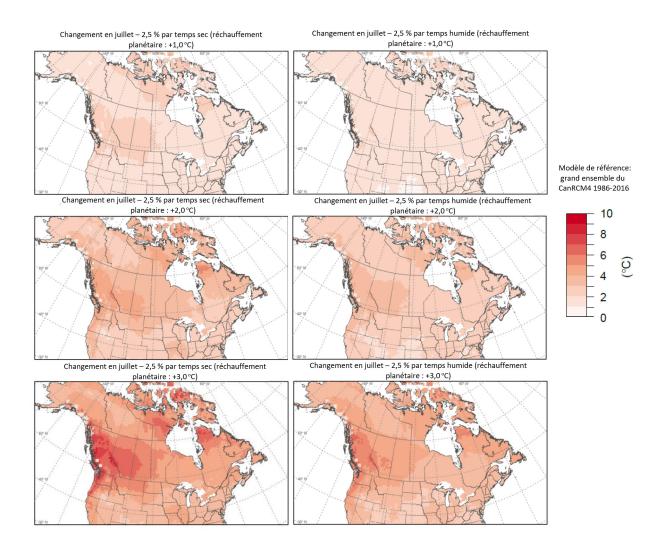
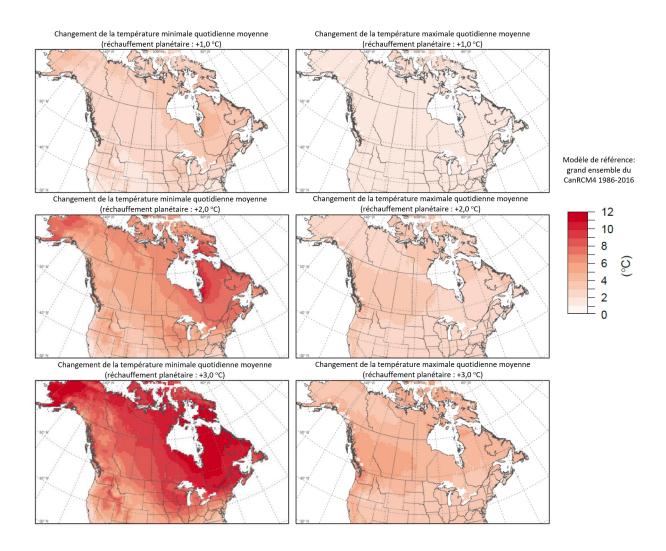


Figure 3.7 : Changements prévus (en °C) des températures moyennes quotidiennes annuelle minimales (images de gauche) et annuelle maximales (images de droite), selon le CanRCM4, pour les niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C (images du haut), de +2 °C (images du centre) et de +3 °C (images du bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.



4. PRÉCIPITATIONS ET HUMIDITÉ

4.1 Précipitations et pluies totales annuelles

4.1.1 Évaluation

L'évaluation des tendances historiques et des projections des précipitations, dans le RCCC (Bush et Lemmen, 2019), concluait avec un degré de confiance *moyen* que les précipitations moyennes annuelles avaient augmenté, en moyenne, au Canada, en notant que les augmentations étaient d'un pourcentage plus élevé dans le Nord du Canada. Ces augmentations cadrent avec les simulations modélisées des changements climatiques anthropogènes. Les précipitations totales annuelles devraient augmenter partout au Canada au cours du 21e siècle, avec des variations d'un pourcentage plus élevé dans le nord du Canada et les régions montagneuses de l'ouest du Canada. Comme la quantité des précipitations est faible dans l'Arctique, même de modestes variations dans la quantité absolue se traduisent par de fortes variations en pourcentage dans le Nord. À mesure que les températures augmenteront avec le réchauffement planétaire, on verra une évolution continue de la neige à la pluie. En conséquence, il est également projeté que la proportion des précipitations totales annuelles sous forme de pluie augmentera à travers le Canada.

En termes relatifs, l'effet du réchauffement climatique de la planète sur les précipitations est plus faible relativement à sa variabilité naturelle non forcée (ce qu'on appelle la variabilité interne) que pour la température. Ainsi, l'estimation des variations des précipitations est substantiellement plus incertaine. Ces variations sont également influencées par l'orographie, la proximité de sources d'humidité telles que des cours d'eau ou des plans d'eau, les changements de la circulation atmosphérique, et les interactions avec la surface terrestre qui influencent les changements de l'équilibre aquatique local, et on constate donc plus de variations régionales que de variations de la température.

Les résultats des projections pour les précipitations régionales sont touchés de manière semblable et entraînent donc un degré de confiance moindre que les résultats des projections pour la température. On pense également que les résultats des projections pour les précipitations sont bien plus fortement influencés par les incertitudes de la modélisation que dans le cas de la température. Les sources d'incertitude sont entre autres une compréhension incomplète des processus produisant des précipitations, et les effets des biais dans d'autres aspects de la représentation du climat. Les limites associées aux résolutions spatiales de la plupart des modèles climatiques mondiaux et régionaux sont également grandement préoccupantes, car elles dictent la nécessité d'utiliser des approximations pour représenter les effets des processus d'une échelle inférieure à la maille, comme la convection, et la nécessité d'utiliser des représentations lissées de l'orographie de surface, ce qui retire de l'échelle plus petite un grand nombre de détails qui sont importants pour la production des précipitations locales. La dispersion multimodèle des projections est donc beaucoup plus élevée dans les projections des précipitations, ce qui correspond à la fois à des rapports signal sur bruit interne plus faibles et à de grandes incertitudes, difficiles à quantifier, dans la représentation modélisée des processus physiques qui produisent les précipitations.

Les résultats pour les variations projetées des précipitations totales de CanESM2-CanRCM4 LE sont conformes au 5° rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2013), sur le fait qu'ils projettent que les latitudes élevées feront l'objet d'une grande augmentation relative des précipitations totales annuelles d'ici la fin du 21° siècle, pour le scénario à émissions élevées (RCP8.5). Cette augmentation à des latitudes élevées est une caractéristique commune à de multiples générations de modèles climatiques et peut s'expliquer par la forte augmentation prévue, due au réchauffement, du transport vers les pôles de la vapeur d'eau atmosphérique par la circulation atmosphérique. Ces variations simulées par modélisation correspondent aux variations observées en cela qu'on a détecté une

augmentation des précipitations totales annuelles observées aux latitudes élevées au cours de la période historique, et qu'elle peut être attribuée à l'influence humaine (Min et coll., 2008; Wan et coll., 2015). Selon ces constatations, on a un degré de confiance élevé que les précipitations et pluies annuelles augmenteront au Canada en raison du réchauffement climatique. En raison d'une variabilité interne plus élevée que celle pour la température et des preuves plus grandes que l'incertitude de la modélisation contribue à l'incertitude globale des projections, le degré de confiance pour les projections régionales, plus détaillées, est de faible à moyen.

4.1.2 Recherche ciblée

Le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) fournit des cartes de la variation des précipitations annuelles projetées à court terme par rapport à celles du siècle dernier pour le Canada, en se fondant sur un ensemble de 29 MCG dans des scénarios à faibles émissions et des scénarios à émissions élevées. Les projections régionales des variations des précipitations annuelles totales sont également résumées pour les mêmes périodes de temps, modèles et scénarios d'émissions. Comme on le décrit au chapitre 1, l'approche recommandée pour les BIPB est de communiquer les variations régionales qui sont liées à des niveaux fixés du réchauffement climatique planétaire, plutôt qu'à des périodes de temps fixées selon différents scénarios. Cette approche est évaluée dans une analyse des indices climatiques pour le Canada par Li et coll. (2018), qui ont trouvé que les projections des précipitations des modèles du CMIP5 ne s'accordent pas entièrement au sujet du signe des variations dans la plupart des régions canadiennes à un niveau de réchauffement planétaire d'approximativement +2 °C en ce qui concerne la période préindustrielle, mais s'accordent entièrement à un niveau de réchauffement de +4,5 °C, ce qui correspond à un renforcement du signal dans la variation des précipitations projetées à mesure que le réchauffement progresse. Ces résultats, qui sont assujettis à toutes les incertitudes discutées à la section 4.1.1, ont éclairé tant le RCCC que ce rapport; un lien vers l'analyse complète se trouve à l'annexe 2.3.

Pour prolonger ces travaux, les projections des précipitations annuelles et des pluies annuelles sur la base de l'ensemble CanESM2-CanRCM4 LE ont été calculées pour différents niveaux de réchauffement planétaire. Les chutes de pluie annuelles sont inférées de la différence entre les précipitations totales diagnostiquées et les variables des flux de neige. Aucune correction de biais n'a été apportée pour cette analyse car on se concentre ici sur les variations relatives des précipitations et des pluies, plutôt que sur les variations absolues. De manière constante avec les résultats des simulations du CMIP5, le CanRCM4 LE projette que les précipitations annuelles augmenteront partout au Canada au cours du 21° siècle, avec un plus grand pourcentage de variation dans le nord du Canada (figure 4.1). Selon les projections, les chutes de pluie augmenteront aussi, en particulier dans l'Arctique et audessus des régions montagneuses de l'ouest du Canada, bien que nous ayons un degré de confiance considérablement plus faible dans ces variations régionales étant donné que les variations projetées pour les pluies n'ont pas été évaluées dans GIEC (2013). Au niveau régional, les variations relatives tant des précipitations annuelles que des pluies annuelles se rapportent à peu près linéairement au réchauffement planétaire. Les augmentations de pluie impliquent deux composantes : l'une est l'augmentation de l'humidité atmosphérique causée par le réchauffement, l'autre est la transformation de neige en pluie en raison du réchauffement. Dans la plupart des régions, on projette que les chutes de pluie annuelles augmenteront près de deux fois plus vite que les précipitations annuelles; on constate une intensification plus prononcée des pluies dans le Nord et en Colombie-Britannique (figure 4.2).

À titre de référence, les sommaires numériques des projections réalisées avec le CanRCM4 pour les niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C, +2 °C, et +3 °C sont présentés au tableau 4.1. Bien que le rapport signal sur bruit interne des variations forcées en ce qui a trait aux précipitations et aux pluies soit plus petit que pour la température annuelle (chapitre 2), la moitié centrale des membres de l'ensemble s'accorde sur le signe des variations projetées tant pour les précipitations annuelles que pour les pluies annuelles dans toutes les régions à tous les niveaux de réchauffement planétaire. Si l'on considère la dispersion entière du CanRCM4 LE (soit, extension au-delà de seulement l'intervalle interquartile) à +1 °C de réchauffement planétaire selon la base de référence de 1986-2016, ce qui

est plus ou moins équivalent à +2 °C par rapport à l'époque préindustrielle, dans 5 des 6 régions, tous les membres projettent des augmentations régionales tant pour les précipitations annuelles que les pluies annuelles. De plus, seuls 2 membres en Ontario projettent une diminution des précipitations annuelles. Ainsi, à ces échelles, les signaux forcés dans les précipitations et les pluies annuelles sont suffisamment forts à ce niveau de réchauffement relativement à la variabilité interne pour projeter avec confiance des augmentations plus grandes que cela ne serait possible en raison de la variabilité interne seulement. Ce genre d'évaluation ne pourrait toutefois pas tenir compte de l'incertitude du modèle, qui est, comme nous en avons discuté, substantielle pour les variables liées aux précipitations. Li et coll. (2018), par exemple, ont trouvé que les projections de l'intensité des précipitations des jours humides de 24 modèles CMIP5 pour le scénario RCP8.5 ne s'accordent pas entièrement sur la direction de la variation dans la plupart des régions canadiennes à un niveau de réchauffement planétaire d'environ +2 °C par rapport à la période préindustrielle. L'incertitude de l'ensemble du CMIP5 est due à la fois à l'incertitude du modèle et à la variabilité interne, ce qui implique que l'incertitude du modèle joue un rôle important dans l'expression régionale du réchauffement planétaire sur les précipitations annuelles. On peut le voir à la figure 4.3, qui montre la relation entre la variation de la température annuelle planétaire moyenne et la variation des précipitations annuelles pour une région, y compris le Canada et les eaux adjacentes (40°N à 75°N et 140°O à 55°O). L'ensemble entier multimodèle du CMIP5 pour le scénario RCP8.5 montre une dispersion quelque peu plus grande que le CanESM2 LE, qui est seulement influencé par la variabilité interne.

4.1.3 Interprétation

Les précipitations et les pluies annuelles sont des variables de niveau 2. Les variations projetées aux endroits correspondant approximativement à ceux du tableau C-2 sont présentées à l'annexe 1.2. Les valeurs sont basées sur les projections du CanRCM4 LE pour chaque niveau de réchauffement planétaire. Pour les variations des précipitations annuelles, les valeurs du rapport signal sur bruit (voir la section 2.6.4) pour le CanRCM4 LE sont plus élevées que celles de la variation des températures annuelles, ce qui est indicateur d'un signal de changement climatique plus petit relativement à la variabilité interne (les valeurs moyennes tombent en dessous de 0,5 pour les niveaux de réchauffement planétaire > +2 °C). Comme les variations des pluies annuelles sont affectées plus fortement par le réchauffement, les rapports signal sur bruit interne sont plus élevés (les valeurs moyennes du rapport signal sur bruit tombent en dessous de 0,3 pour les niveaux de réchauffement planétaire > +2 °C).

Les données probantes évaluées dans le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) et les simulations du CanESM2-CanRCM4 LE suggèrent qu'il y a un degré de confiance *élevé* quant au fait que les précipitations et les pluies annuelles augmenteront au Canada avec le réchauffement planétaire. Les augmentations projetées s'alignent plus ou moins linéairement sur le réchauffement planétaire, avec des taux d'intensification plus grands dans le nord, et, pour les pluies, dans les régions montagneuses de l'ouest du Canada. Dans toutes les régions, le passage de la neige à la pluie en raison du réchauffement dans la phase des précipitations entraîne une augmentation relative des chutes de pluie plus accentuée que pour les précipitations totales.

En raison de la variabilité interne plus élevée par rapport à la température, ainsi que de preuves considérables que l'incertitude du modèle contribue à l'incertitude globale des projections, il y a un degré de confiance faible à moyen dans les variations proportionnelles projetées des précipitations et des pluies régionales. Tout comme pour les données de conception liées à la température, il n'est pas possible de lier un degré de confiance donné aux projections propres à un emplacement qui sont fournies à l'annexe 1.2., mais le degré de confiance est nécessairement plus faible que pour les évaluations régionales des variations projetées.

4.2 Pluies d'une journée et pluies de 15 minutes

4.2.1 Évaluation

Pour l'ensemble du Canada, le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) trouve que les preuves basées sur des observations des variations dans les précipitations extrêmes de courte durée d'une journée et de moins d'une journée sont insuffisantes et que le degré de confiance dans les projections des précipitations extrêmes est généralement plus faible que pour la température. Bien que les variations de la température soient une conséquence directe des variations du forçage radiatif, les variations dans les précipitations de courte durée sont affectées par un certain nombre d'interactions complexes, dont les variations dans la capacité à retenir l'eau de l'atmosphère qui se réchauffe, la circulation atmosphérique à grande échelle, l'évaporation, et d'autres facteurs (Trenberth, 1999, 2011). En conséquence, le rapport entre le signal du changement climatique forcé et le bruit de la variabilité interne est faible. De plus, un peu comme on le discute à la section 4.1, l'incertitude de la modélisation liée à la représentation des processus pertinents à la production des précipitations en général, et des précipitations extrêmes en particulier, est grande. Néanmoins, certaines preuves suggèrent que des effets thermodynamiques – la variation de l'humidité atmosphérique en fonction du réchauffement - dominent les influences dynamiques et donc fournissent une contrainte utile sur les variations futures des pluies extrêmes d'une journée ou de moins d'une journée. Par exemple, la décomposition de la réponse forcée des pluies extrêmes à l'échelle d'une journée dans les modèles du CMIP5 en des composantes thermodynamiques et dynamiques suggère que la contribution dynamique au-dessus du Canada et des États-Unis est probablement petite (Pfahl et coll., 2017; Li et coll., 2019b) aux échelles représentées par les modèles climatiques mondiaux et régionaux. Ceci représente une restriction importante étant donné que les MCM et la plupart des MCR ne permettent pas d'obtenir une représentation explicite des processus convectifs associés aux pluies estivales extrêmes. Au contraire, ces modèles utilisent plutôt des procédés de « paramétrisation » qui tentent de caractériser l'effet qu'a l'activité convective ayant lieu dans les cellules de maille des modèles sur l'évolution de l'état atmosphérique.

On s'attend à des augmentations de l'humidité atmosphérique en raison du réchauffement planétaire alors que la pression de vapeur de saturation (en d'autres mots, la capacité à retenir l'humidité de l'atmosphère) s'aligne plus ou moins linéairement sur la température, suivant la relation théorique Clausius-Clapeyron (CC) (~7 % par °C). Certains avancent que l'augmentation des précipitations moyennes dans un climat qui se réchauffe à cause de la montée des GES est contrainte, énergétiquement à ~2 % par °C (Allen and Ingram, 2002), alors que, en l'absence d'autres influences telles que les variations de la circulation à grande échelle, la dynamique locale des orages et la disponibilité de l'humidité du sol, les précipitations sont libres de s'intensifier à un taux plus proche du taux CC (Trenberth, 1999, 2011). Pour exprimer la variation relative des extrêmes dans les précipitations en tant que fonction du réchauffement, on emploie couramment l'expression « mise à l'échelle en fonction de la température ». Étant donné que les projections des variations de température semblent être plus fiables que celles des précipitations extrêmes, on s'appuie sur une mise à l'échelle en fonction de la température pour établir l'orientation destinée aux ingénieurs sur les prochaines variations des pluies extrêmes d'une journée et de moins d'une journée en Australie (Ball et coll., 2016; Tome 1, ch. 6).

En dépit des multiples incertitudes, lorsqu'on envisage des variations relatives dans les précipitations extrêmes, les données probantes provenant des observations sur de grandes régions et des simulations de modèles climatiques concordent en grande partie avec l'intensification largement dispersée causée par le réchauffement des pluies extrêmes de courte durée (Westra et coll., 2013; Zhang et coll., 2013; Pfahl et coll., 2017; Sun et coll., 2020a). De multiples lignes de preuve appuient un degré de confiance élevé quant au fait de projeter une augmentation des précipitations extrêmes dans la plupart des régions de la planète. Parmi ces lignes de preuve, on trouve l'attribution de l'augmentation observée des précipitations extrêmes d'une journée dans l'hémisphère nord à une influence humaine (Min et coll., 2011; Zhang et coll., 2013; le fait que de multiples modèles

climatiques projettent de manière constante une augmentation future des précipitations extrêmes (Kharin et coll., 2013; Li et coll., 2020); et la compréhension physique que le réchauffement résultera en une augmentation de l'humidité atmosphérique (Trenberth, 1999, 2011). Il est donc *probable* que les précipitations extrêmes augmenteront au Canada dans l'avenir, bien que l'ampleur de l'augmentation à des échelles régionales soit bien plus incertaine.

4.2.2 Recherche ciblée

Étant donné le haut degré d'incertitude dans les projections régionales des précipitations de courte durée au Canada, la quantification de l'incertitude dans les variables de conception climatique du CNBC pour les pluies d'une journée (période de récurrence de 50 ans) et les pluies de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans) était au centre de la recherche ciblée dans ce projet. La recherche a été réalisée sous trois différents aspects : (1) une analyse de la quantité d'information requise pour estimer de manière robuste les relations de mise à l'échelle en fonction de la température (Li et coll., 2019a; annexe 2.4), et une évaluation de l'adhésion au taux CC de la mise à l'échelle du CanRCM4 LE au-dessus de l'Amérique du Nord; (2) un effort pour clarifier les différentes définitions de mise à l'échelle en fonction de la température utilisées dans la littérature scientifique sur le climat (Zhang et coll., 2017; Sun et coll., 2020b; annexe 2.5); et (3) une analyse des relations de mise à l'échelle en fonction de la température dans des simulations à haute résolution représentant la convection en Amérique du Nord (Cannon et Innocenti, 2019; annexe 2.6), y compris une comparaison par rapport aux taux de mise à l'échelle estimés à partir des simulations provenant du CanRCM4 LE. Tous les détails se trouvent dans des articles publiés figurant aux annexes 2.4 à 2.6. Une synthèse des résultats se trouve ci-dessous.

L'incertitude des variations projetées des pluies extrêmes régionales provient de plusieurs sources. Tout d'abord, il est difficile d'interpréter les projections de modèles climatiques régionaux et mondiaux sur le plan local étant donné la résolution spatiale des MCM et des MCR typiques (environ 100-250 km et 10-50 km, respectivement). Les extrêmes de précipitations dans un modèle climatique conventionnel représentent donc des moyennes sur des aires de centaines à des milliers de kilomètres carrés et fournissent ainsi de l'information qui peut différer de celle requise pour des applications pratiques. En particulier, les valeurs projetées fournies par ces modèles mondiaux ou régionaux ne devraient pas être interprétées littéralement en tant que quantité de précipitations mesurée à un point fixe. En outre, comme discuté, les modèles climatiques n'incluent pas tous les processus physiques qui produisent des orages locaux intenses. Les MCR conventionnels, comme le CanRCM4, qui sont utilisés pour réaliser la plupart des réductions d'échelles dynamiques des modèles climatiques mondiaux ne règlent pas les processus importants comme la convection (Prein et coll., 2015; Kendon et coll., 2017). Les orages de très courte durée tombent en dessous de la longueur d'un seul pas de temps d'un modèle (20 min pour le CanRCM4), et l'échelle temporelle « agile » d'un modèle climatique nécessite probablement une agrégation couvrant plusieurs pas de temps (Takayabu and Hibino, 2016; Zhang et coll., 2017). De plus, les limitations et les différences dans les représentations de processus physiques affectent aussi le degré de confiance que nous pouvons avoir dans les produits de réduction d'échelle statistique qui transforment les précipitations des modèles des MCG et des MCR pour des aires plus petites. Ces limitations ne peuvent que limiter le degré de confiance lorsqu'on utilise des projections modélisées pour l'adaptation régionale et locale.

Deuxièmement, les variations observées dans les précipitations extrêmes sont encore trop petites pour que des relations statistiques robustes puissent être établies entre les variations historiques à l'échelle locale et d'autres variables climatiques (Westra et coll., 2013; Sun et coll., 2020a; Li et coll., 2019a). La raison en est le manque d'enregistrements à partir d'observations de longueur suffisante, l'ampleur relativement modeste de l'augmentation attendue des précipitations extrêmes en fonction du réchauffement observé (suivant le réchauffement, approximativement, échelle CC), et la grande variabilité interne des précipitations extrêmes. Par exemple, Westra et coll., (2013) ont analysé plus de 8400 stations hydrométriques mesurant les chutes de pluie à travers le monde et ont trouvé qu'il y a moins d'une chance sur 10 pour qu'une station présente une forte tendance dans

les précipitations maximales annuelles d'une journée. Cela est en dépit du fait que le taux de mise à l'échelle en fonction de la température agrégée mondialement est conforme à la relation CC, et du fait que l'influence du forçage externe peut être détectée et attribuée dans les variations observées des précipitations extrêmes lorsque les données sont agrégées sur de très grands domaines mondiaux ou sous-mondiaux. Le fait que la détection locale des tendances continue d'être peu fiable parce que le rapport signal sur bruit tout au long de la période historique reste faible signifie que les tendances passées à l'échelle locale ne peuvent tout simplement pas servir à extrapoler pour l'avenir. De plus, établir un modèle statistique – par exemple, un modèle de régression ou un modèle de valeurs extrêmes dépendant de covariables – entre les précipitations observées à un point donné et une variable apparentée comme la température qui est censée être utile pour expliquer les tendances des précipitations extrêmes, ne produira pas de résultats robustes (Li et coll., 2019a). Il est nécessaire de disposer de longueurs d'enregistrement ou de simulations climatiques historiques beaucoup plus longues que celles disponibles à partir des observations historiques pour obtenir des contraintes fiables pour les projections.

Étant donné ces sources d'incertitudes et le fait qu'on peut avoir un plus haut degré de confiance dans les projections régionales de la température, certains ont suggéré que la mise à l'échelle en fonction de la température des variations dans les précipitations de courte durée qui suivent la relation théorique CC (~7 % par °C de réchauffement) devrait rester l'hypothèse « nulle par défaut » (Pendergrass, 2018, p. 1073; Zhang et coll., 2017) pour les projections. Cette approche, qui utilise un taux de mise à l'échelle légèrement plus petit de 5 % par °C, a été adoptée en Australie (Ball et coll., 2016; livre 1, ch. 6) pour les mises à jour des courbes intensité-durée-fréquence (IDF) australiennes pour des périodes de récurrence de 2 à 100 ans en vertu des changements climatiques. L'ampleur de la mise à l'échelle en fonction de la température et de sa dépendance quant à la durée de l'orage et la rareté de l'épisode est incertaine, comme les documents d'orientation australiens l'indiquent, en raison de l'influence d'autres facteurs. Aussi, comme nous l'avons déjà mentionné, son ampleur ne peut être estimée solidement à l'échelle régionale en se fondant sur des observations historiques. De plus, les modèles climatiques traditionnels ne peuvent résoudre certains des processus physiques que l'on juge être d'importants facteurs contributifs des orages les plus violents, et leurs pas de temps sont trop longs pour fournir de l'information crédible pour des durées inférieures à une heure.

Il est possible que les projections de pluies extrêmes localisées inférieures à une journée, et donc les estimations de l'ampleur de la mise à l'échelle en fonction de la température, puissent être mieux estimées au moyen de modèles climatiques à très haute résolution (espacement de grille ≤ 4 km) dans lesquels le thème de paramétrisation des activités convectives est désactivé et le modèle est capable de simuler explicitement la convection (Prein et coll., 2015; Kendon et coll., 2017; Zhang et coll., 2017). Toutefois, les modèles à très haute résolution exigent des ressources informatiques très coûteuses (voir la section 2.1.5) et les simulations sont généralement courtes, au mieux sur une ou deux décennies, ce qui, comme le suggèrent Li et coll. (2019a), signifie qu'une estimation robuste des épisodes extrêmes rares peut être difficile si on ne s'efforce pas d'utiliser l'information disponible aussi efficacement que possible. Bien qu'on commence à disposer de simulations à l'échelle des continents, les dépenses élevées en ressources informatiques ont eu tendance à limiter l'application à de petits domaines des modèles présentant la convection. Cela ajoute une source d'incertitude associée à la détermination d'un réglage de domaine optimal (stratégies d'emboîtement, etc.) pour effectuer des projections crédibles des précipitations extrêmes. On continue donc d'avoir un faible degré de confiance dans l'information obtenue de ces simulations.

En gardant à l'esprit ces restrictions, on a analysé les précipitations extrêmes horaires dans le nombre limité de simulations présentant la convection sur une décennie disponibles à l'échelle continentale du climat présent et futur de l'Amérique du Nord (Rasmussen and Liu, 2017). Par exemple, Prein et coll. (2017b) suggèrent que les quantités de précipitations extrêmes horaires (99,95e centile) simulées par le modèle WRF sur le domaine dit « CONUS » (WRF HRCONUS; limite nord à ~56°N), d'après les projections, s'intensifieront en accord avec le réchauffement local à un taux plus ou moins conforme à la relation CC, en supposant une variation limitée de la circulation atmosphérique. En se basant sur le CanRCM4 LE et les températures moyennes latitudinales, Li et coll. (2019a) ont trouvé que les

variations dans les épisodes de précipitations d'une heure et de 24 h et d'une période de récurrence de deux ans sont conformes à l'échelle CC à 50 % et 40 % des cellules de la grille, respectivement, et à 65 % et 70 % de cellules pour des épisodes de période de récurrence de 100 ans, et de manière générale, s'intensifiaient à un taux inférieur au taux CC ailleurs, principalement à l'intérieur du continent nord-américain. On constate donc une certaine cohérence des résultats des modèles à convection paramétrée et des modèles présentant la convection, mais il est impossible de les comparer directement en raison des différentes méthodologies et températures – moyennes locales et latitudinales – utilisées dans les deux études.

Cannon et Innocenti (2019) ont estimé les variations projetées des extrêmes des chutes de pluie dans les simulations du WRF HRCONUS, qui possèdent un grand signal de pseudo réchauffement climatique, et donc un rapport signal sur bruit interne relativement élevé. La conception expérimentale du pseudo réchauffement est grandement limitée dans le sens que les données météorologiques utilisées pour piloter la simulation du modèle WRF sur la période historique sont les mêmes que celles utilisées pour piloter la simulation du modèle WRF sur la période future, une fois ajustées pour reproduire les effets thermiques du changement climatique. C'est-à-dire qu'un signal de réchauffement est appliqué aux données d'entrée, mais les détails de la météorologie d'entrée, comme la séquence et la position des systèmes à basse pression affectant la limite du domaine de simulation, restent telles qu'elles étaient dans la simulation historique. Ainsi, des aspects potentiellement importants de la réponse de circulation face au réchauffement ne sont pas représentés. Pour augmenter la taille de l'échantillonnage efficace et pouvoir extrapoler pour des orages d'une durée inférieure au pas de temps archivé d'une heure, Cannon et Innocenti (2019) ont eu recours à une robuste stratégie de mise en commun temporelle et un modèle de valeurs extrêmes. Cette méthodologie permet de réaliser des estimations quantitatives des taux de mise à l'échelle en fonction de la température pour les variables de conception du CNBC à la fois des pluies d'une journée (période de récurrence de 50 ans) et des pluies de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans). Pour pouvoir comparer entre les deux MCR, on a appliqué la même méthode d'analyse des valeurs extrêmes aux extrants du CanRCM4 LE. Alors que le CanRCM4 paramètre la convection, et peut donc ne pas simuler certains processus physiques importants, le grand ensemble a un nombre suffisant d'échantillons annuels dans chaque période pour estimer solidement la mise à l'échelle en fonction de la température (Li et coll., 2019a). D'un autre côté, le modèle WRF HRCONUS permet la convection, mais est une expérience de pseudo réchauffement climatique assortie d'une circulation d'entrée fixe - ce qui fait que certains aspects de la variabilité interne à basse fréquence et les changements potentiels de la circulation ne sont pas échantillonnés. En dépit des efforts déployés pour augmenter la taille efficace des échantillons au moven d'une mise en commun temporelle et d'une agrégation spatiale, la quantité d'information disponible à partir du WRF HRCONUS est encore quelque peu limitée.

Les cartes des taux estimés de mise à l'échelle en fonction de la température pour les pluies d'une journée (période de récurrence de 50 ans) et les pluies de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans) – calculées sur la base d'une variation de la température annuelle moyenne locale (soit, telle qu'elle est évaluée au chapitre 2) – sont présentées à la figure 4.4 pour le CanRCM4 LE et le WRF HRCONUS. Des résumés régionaux pour les endroits correspondant approximativement à ceux du tableau C-2 sont présentés à la figure 4.5. Il convient de noter que les taux d'échelle estimés pour les pluies de 15 minutes sont assujettis à une incertitude additionnelle, car les valeurs sont extrapolées à partir de durées d'une heure ou moins sur la base d'une simple hypothèse d'échelle temporelle et de loi de puissance (Innocenti et coll., 2017).

En dépit des très grandes incertitudes liées aux taux de mise à l'échelle du WRF HRCONUS en raison des courtes longueurs des simulations et du recours à un calcul expérimental de pseudo réchauffement, la comparaison avec le CanRCM4 semble raisonnable, bien que le WRF HRCONUS ait tendance à produire des taux de mise à l'échelle plus élevés que le CanRCM4 LE pour les pluies de 15 minutes sur la plupart de son domaine. L'échelle de température est légèrement plus faible que le taux CC pour des pluies d'une journée dans les endroits s'approchant de ceux du tableau C-2 à la fois pour le CanRCM4 LE et le WRF HRCONUS, et légèrement plus élevée que le taux CC pour les pluies de 15 minutes pour les deux modèles. Pour le Canada dans son ensemble, on constate une plus grande

homogénéité spatiale pour les pluies d'une journée, et quelques preuves d'un taux de mise à l'échelle plus élevé dans les régions côtières et plus faible dans les terres intérieures, ce qui correspond aux constatations de Li et coll. (2019a). Ces différences régionales sont amplifiées pour les pluies de 15 minutes; de plus, la région intérieure dont le taux d'échelle est plus faible est décalée vers l'ouest dans les simulations du WRF HRCONUS. Une intensification plus élevée des extrêmes de précipitations de courte durée et à période de récurrence plus longue est commune aux deux modèles, le CanRCM4 LE (Li et coll., 2019a) et le WRF HRCONUS (Cannon et Innocenti, 2019).

La cohérence générale des résultats à l'échelle régionale suggère qu'il pourrait être possible d'appliquer très prudemment les résultats du CanRCM4 en dépit du fait qu'il ne représente pas explicitement la convection. Cela est appuyé par des comparaisons entre les données de calcul observées du tableau C-2 du CNBC de 2015 pour les pluies de 15 minutes et celles extrapolées du RCM4 LE pour cette durée de 15 minutes sur la base d'une simple échelle temporelle (figure 4.6). Il y a un degré de correspondance acceptable dans la période historique (1986-2016) tant en ce qui a trait à la tendance (variance expliquée $r^2 = 0,7$) qu'à l'ampleur (fourchette interquartile d'erreurs relatives de -6 % à +19 %).

4.2.3 Interprétation

Les pluies d'une journée (période de récurrence de 50 ans) et de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans) sont des variables de niveau 2. Le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) indique qu'il est *probable* que les précipitations extrêmes augmenteront au Canada dans l'avenir, bien que l'ampleur de l'augmentation à des échelles régionales soit bien plus incertaine.

Étant donné qu'on peut avoir plus confiance dans les projections des températures régionales, on recommande d'utiliser des facteurs d'échelle de température – qui expriment le changement relatif des extrêmes de précipitations en tant que fonction du réchauffement. Ce procédé suit d'autres recommandations nationales (par ex., Ball et coll., 2016; tome 1, ch. 6) et est également motivé par le fait que l'humidité atmosphérique devrait s'aligner approximativement de façon exponentielle sur le réchauffement à un taux de \sim 7 %/°C conformément à la relation CC. On pourrait raisonnablement s'attendre à ce que l'intensité des extrêmes de précipitations rares suive au premier ordre si des influences thermodynamiques dominent par rapport aux changements dynamiques.

D'après la recherche ciblée impliquant des simulations à partir du CanRCM4 LE et des simulations permettant la convection à partir du WRF HRCONUS, on trouve que les précipitations extrêmes suivent plus ou moins la température annuelle moyenne locale à des taux semblables à ceux prédits par la relation CC. Néanmoins, il est difficile d'estimer les valeurs exactes pour plusieurs raisons : (1) il est nécessaire d'avoir des longueurs d'enregistrement longues pour contraindre l'estimation (Li et coll., 2019a); (2) les facteurs d'échelle semblent être plus grands dans certaines régions (en particulier le long des côtes) que dans d'autres (en particulier dans les régions intérieures du Canada jusqu'à l'est des Rocheuses) (Li et coll., 2019a; Cannon et Innocenti, 2019); et (3) les taux d'échelle ont tendance à être plus grands pour les courtes durées et pour les épisodes extrêmes et plus rares (Li et coll., 2019a; Cannon and Innocenti, 2019). Les résultats du CanRCM4 LE et du WRF HRCONUS sont généralement cohérents (figures 4.4 et 4.5).

La recherche suggère qu'il est peut-être nécessaire d'avoir des taux de mise à l'échelle détaillés propres à différentes régions, différents types ou niveaux d'extrêmes, y compris les épisodes d'une journée, de moins d'une journée, et de moins d'une heure, et différentes raretés pour ces épisodes. Certains problèmes se posent, toutefois, pour en arriver là, les estimations étant moins robustes à ce niveau de détail, en raison (1) des hypothèses utilisées dans les analyses statistiques; (2) de la résolution modeste des MCR traditionnels; (3) du nombre limité de MCR produisant des simulations d'une longueur suffisante; (4) du nombre très limité de simulations permettant le calcul de la convection sur une échelle continentale; et (5) le faible rapport signal sur bruit des variations forcées des précipitations extrêmes relativement à la variabilité interne (les valeurs du rapport B/S pour les estimations directes des pluies d'une journée à période de récurrence de 50 ans sont >0, à tous les

niveaux de réchauffement climatique planétaire). Ainsi, le degré de confiance dans les estimations de tout taux d'échelle spécifique correspondant à différents épisodes dans différentes régions est de *très faible* à *faible*. Au bout du compte, il est donc impossible d'obtenir des projections détaillées reposant sur les simulations modélisées existantes.

Pour ces raisons, il est recommandé, pour le moment, que la mise à l'échelle des données de conception pour les pluies extrêmes d'une journée (période de récurrence de 50 ans) et de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans) suivent la relation CC 7 %/°C de réchauffement local en se fondant sur la variation de la température moyenne annuelle locale (voir le chapitre 2) et, en conséquence, les projections propres à un lieu fournies à l'annexe 1.2 sont basées sur les projections de la température du CanRCM4 LE. Le degré de confiance dans ces projections propres à un lieu est limité, non seulement parce que le degré de confiance est nécessairement plus faible à des échelles spatiales et temporelles plus fines, mais aussi en raison de leur nature indirecte. Plusieurs preuves suggèrent qu'il y a une relation entre les précipitations extrêmes et la température dans la plupart des régions du Canada qui approche la formule théorique Clausius-Clapeyron. Il y a toutefois des différences par rapport à la relation théorique au niveau régional (les taux sont plus faibles que le taux CC dans les régions de climat continental à l'est des Rocheuses), pour des durées d'accumulation différentes (taux plus élevé pour les durées plus courtes) et pour différentes raretés des épisodes (taux plus élevé pour les épisodes plus rares), bien qu'on ait un degré de confiance de *très faible* à *faible* quant à ces détails.

4.3 Humidité relative annuelle

4.3.1 Évaluation

L'indice d'humidité dans le CNBC repose, en partie, sur l'humidité relative, et le CHBDC comprend une carte de l'humidité relative annuelle historique. La distribution de l'humidité troposphérique est fortement contrainte par le fait que l'humidité se condense dans l'air hypersaturé. Comme presque toutes les particules d'air atteignent la saturation durant leur cycle de vie, il est donc plausible que la distribution de l'humidité relative demeurera inchangée dans un contexte de changements climatiques. Pour les latitudes élevées, où l'air est généralement plus proche de la saturation, cette contrainte est forte et est reflétée par le fait que l'humidité relative est plus ou moins constante à travers les variations de température substantielles du cycle des saisons. Selon GIEC (2007), « une réponse quasiment inchangée [d'humidité relative] [aux changements climatiques] à grande échelle ne porte pas à la controverse ».

Les analyses les plus récentes des projections des MCM du CMIP3 et du CMIP5 révèlent des détails supplémentaires, y compris un petit signal d'assèchement près de la surface sur la plupart des aires terrestres, mais lié à une grande incertitude. Pour les MCM du CMIP3, O'Gorman et Muller (2010) ont trouvé une modeste sensibilité de l'humidité relative de surface au réchauffement climatique planétaire, pour laquelle les valeurs moyennes de l'ensemble changent à un taux approximatif variant entre -0,7 % et +0,7 % par °C sur les régions terrestres canadiennes. Les MCM du CMIP5 (GIEC, 2013) projettent une diminution de 0 % à environ 2 % de l'humidité relative moyenne annuelle pour le Canada (scénario RCP8.5 pour 2081-2100 par rapport à 1986-2005). Cette variation n'est toutefois pas jugée une caractéristique robuste des projections du CMIP5 (Collins et coll., 2013, figure 12.21).

4.3.2 Recherche ciblée

Comme on le décrit dans le chapitre 1, l'approche recommandée pour le projet BIPB est de communiquer les variations régionales de l'humidité relative annuelle qui sont liées à des niveaux fixes de réchauffement climatique planétaire. Les projections de l'humidité relative annuelle moyenne par le CanRCM4 LE indiquent peu ou pas de variations pour le Canada (figure 4.7). La mise à l'échelle des variations régionales de l'humidité relative par rapport au réchauffement climatique est résumée à la figure 4.8 et au tableau 4.2. Bien qu'on projette une augmentation de l'humidité relative sur toutes

les régions, l'ampleur de la variation est faible (+0,65%/°C de réchauffement au plus). Le degré de confiance dans cette variation, qui dévie des résultats du CMIP5 évalués dans GIEC (2013), est *très faible*.

4.3.3 Interprétation

L'humidité relative annuelle moyenne est une variable de niveau 3. Sur de très grandes échelles spatiales, selon GIEC (2007), « une réponse quasiment inchangée [d'humidité relative] [aux changements climatiques] à grande échelle ne porte pas à la controverse ». Il y a généralement un degré de confiance élevé dans le fait que les variations futures de l'humidité relative seront faibles. Selon GIEC (2013), « bien que les variations projetées par le CMIP5 soient faibles [il y a] un degré de confiance *moyen* dans le fait que les réductions de [l'humidité relative] près de la surface au-dessus de nombreuses zones terrestres sont *probables* ». D'un autre côté, le CanESM2-CanRCM4 LE suggère une petite augmentation de l'humidité relative, pour laquelle les augmentations seraient inférieures à environ +0,65 %/°C de réchauffement climatique dans toutes les régions.

Les variations projetées de l'humidité relative annuelle aux endroits correspondant approximativement à ceux du tableau C-2 sont fournies à l'annexe 1.2. Comme c'était le cas pour la température annuelle moyenne, les valeurs sont dérivées directement des projections du CanRCM4 LE pour chaque niveau de réchauffement climatique planétaire. Comme le signal des changements climatiques est si petit aux faibles niveaux de réchauffement planétaire, les valeurs du rapport signal sur bruit sont typiquement plutôt élevées – l'ampleur des variations régionales et la variabilité interne sont du même ordre de grandeur, jusqu'à environ +1,5°C de réchauffement planétaire. Ces estimations de ce qui est un très petit signal pourraient peut-être servir dans les cas où l'objectif est de garantir des conceptions prudentes qui minimisent le risque d'un dépassement futur de la charge, par exemple, lorsqu'on détermine la capacité requise d'une centrale de refroidissement pour un grand bâtiment.

Tableau 4.1 : Variations projetées des précipitations annuelles (en haut) et des pluies annuelles (en bas) pour les localités correspondant approximativement à celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour les niveaux de réchauffement climatique planétaire de +1 °C, +2 °C et +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation des préc. ann tot [%]	Niveau de réchauffement climatique		
Région	+1°C	+2°C	+3°C
Colombie-Britannique	3.5 (1.5, 5.6)	6.4 (4.2, 8.6)	8.8 (6.6, 11.1)
Prairies	5.7 (2.5, 9.6)	10.9 (7.2, 15.3)	15.1 (11.3, 19.4)
Ontario	3.3 (1.0, 6.0)	7.2 (4.0, 9.9)	11.5 (8.6, 14.4)
Québec	5.1 (2.7, 7.4)	9.8 (7.7, 12.5)	14.8 (12.0, 17.3)
Atlantique	5.5 (3.5, 7.2)	9.6 (7.4, 12.1)	13.0 (10.3, 15.1)
Nord	9.6 (7.1, 12.1)	18.6 (15.6, 21.4)	28.3 (24.8, 31.1)
Canada	4.6 (2.3, 6.8)	9.1 (6.5, 11.9)	13.3 (10.2, 16.1)

Variation des pluies ann. tot [%]	Niveau de réchauffement climatique		
Région	+1°C	+2°C	+3°C
Colombie-Britannique	12.7 (7.5, 17.2)	24.5 (19.0, 28.3)	34.2 (30.0, 37.0)
Prairies	8.1 (3.7, 12.6)	15.8 (10.9, 20.8)	22.4 (18.0, 27.7)
Ontario	5.9 (3.6, 8.8)	12.6 (9.2, 15.8)	19.2 (15.6, 22.7)
Québec	7.7 (5.5, 10.3)	15.4 (13.1, 18.5)	23.3 (20.0, 26.8)
Atlantique	8.0 (6.0, 10.3)	14.5 (12.0, 17.9)	19.9 (16.8, 21.9)
Nord	15.4 (12.1, 19.2)	31.0 (27.6, 35.8)	47.9 (43.8, 52.0)
Canada	7.5 (4.6, 10.2)	15.1 (11.6, 18.5)	22.1 (18.3, 26.4)

Tableau 4.2 : Variations projetées de l'humidité relative annuelle pour les localités correspondant approximativement à celles du C-2 dans six régions canadiennes et au Canada dans l'ensemble pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C, +2 °C et +3 °C pour la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent les projections d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculées à partir du CanRCM4 LE.

Variation de l'hum. rel. ann. tot [%]	Niveau de réchauffement climatique			
Région	+1°C +2°C +3°C			
Colombie-Britannique	0.4 (0.2, 0.7)	0.6 (0.4, 0.9)	0.7 (0.5, 1.0)	
Prairies	0.5 (0.0, 1.0)	1.0 (0.4, 1.5)	1.3 (0.8, 1.9)	
Ontario	0.1 (-0.1, 0.3)	0.3 (0.0, 0.6)	0.7 (0.5, 0.9)	
Québec	0.5 (0.3, 0.7)	1.1 (0.8, 1.3)	1.9 (1.6, 2.1)	
Atlantique	0.5 (0.4, 0.7)	1.1 (1.0, 1.2)	1.7 (1.6, 1.9)	
Nord	0.3 (0.1, 0.4)	0.5 (0.3, 0.6)	0.8 (0.6, 0.9)	
Canada	0.3 (0.1, 0.6)	0.8 (0.5, 1.1)	1.3 (0.9, 1.6)	

Figure 4.1: Variations projetées (en pourcentage) selon le CanRCM4 LE des précipitations annuelles totales (dessins de gauche) et des pluies annuelles totales (dessins de droite) pour des niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C (dessins du haut), de +2 °C (dessins du milieu) et +3 °C (dessins du bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.

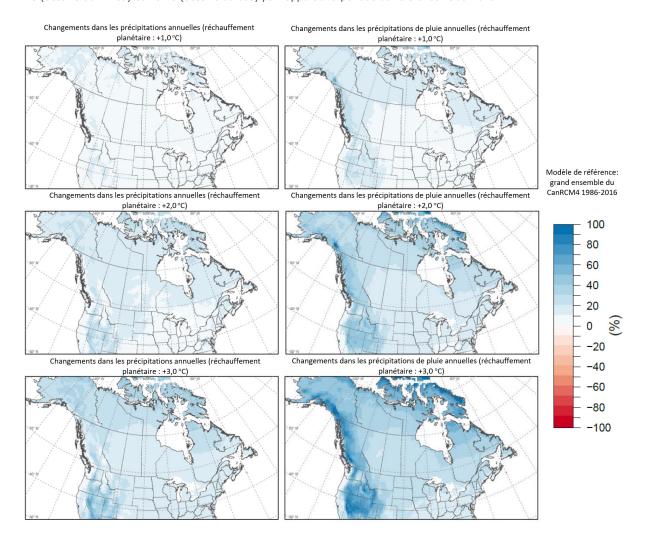


Figure 4.2 : Variations projetées des précipitations annuelles (à gauche) et des pluies annuelles (à droite) pour les localités correspondant approximativement à celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes en tant que fonction de la variation de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016 (en pourcentage). Les lignes et les valeurs minimales et maximales des parties ombragées représentent les projections d'ensemble et les 25° et 75° centiles des variations en pourcentage, respectivement, calculées à partir du CanRCM4 LE.

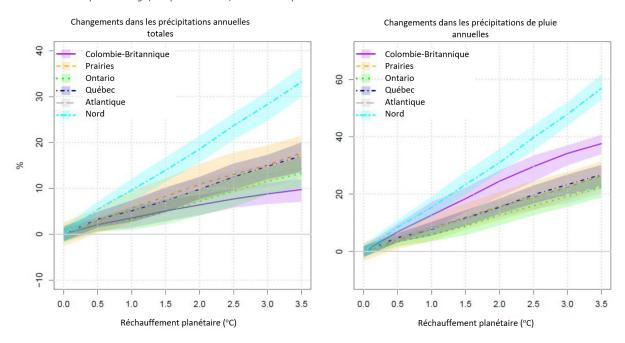


Figure 4.3 : Mise à l'échelle de la variation des précipitations annuelles moyennes du Canada (de 40°N à 75°N et de 140°O à 55°O) sur la variation de la température annuelle moyenne mondiale basée sur les années individuelles de 29 modèles du CMIP5 et du CanESM2 LE.

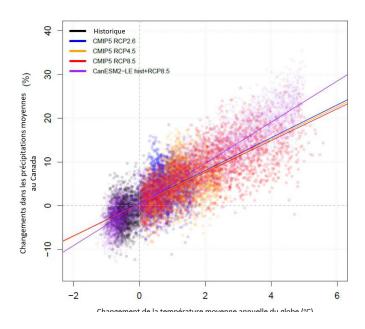


Figure 4.4 : Taux de mise à l'échelle en fonction de la température montrant à quel point les variations en pourcentage des pluies extrêmes sont dépendantes des variations locales des températures moyennes annuelles pour des épisodes d'une journée (période de récurrence de 50 ans) dans le CanRCM4 LE (a) et dans le WRF HRCONUS (b), et pour des épisodes de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans) dans le CanRCM4 LE (c) et dans le WRF HRCONUS (d). Les estimations sont basées sur le réglage du modèle de mise à l'échelle simple de la valeur extrême généralisée sur la série de précipitations annuelles maximales dans la période de référence historique pour chaque MCR et une période correspondant à un niveau de réchauffement climatique planétaire d'environ +3,5 °C. Pour le CanRCM4 LE, cela correspond aux périodes 1986-2016 et 2062-2092. Dans le WRF HRCONUS, le signal de changement climatique utilisé pour perturber les conditions frontière observées est basé sur les périodes 1976-2005 et 2071-2100 dans l'ensemble multimodèle du CMIP5 pour le RCP8.5. Pour le WRF HRCONUS, on fait la moyenne des taux de mise à l'échelle sur des blocs spatiaux de 100 km (cellules de 25 x 25) pour augmenter le rapport signal sur bruit interne.

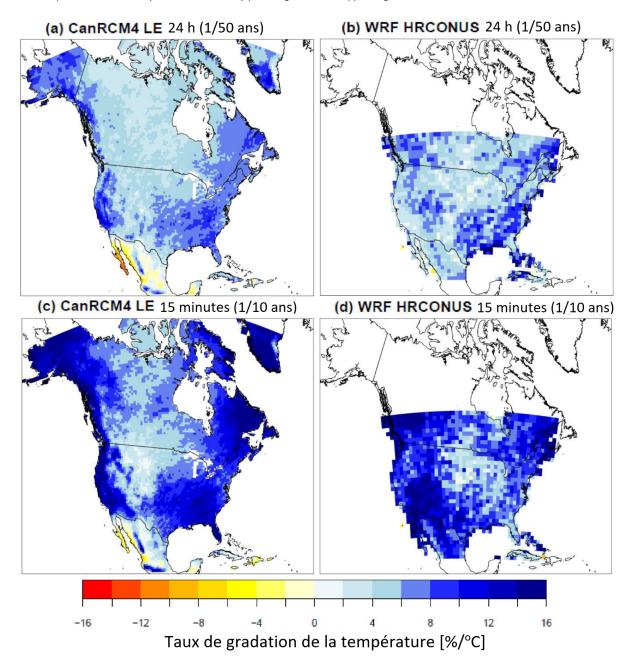


Figure 4.5 : Taux de mise à l'échelle de la température régionale pour les localités s'approchant de celles du tableau C-2 montrant la dépendance des variations en pourcentage des extrêmes de pluies sur les variations locales (contrairement aux variations planétaires) de la température annuelle moyenne pour (a) des épisodes d'une journée (période de récurrence de 50 ans) et (b) des épisodes de 15 minutes (période de récurrence de 10 ans) dans le CanRCM4 LE et le WRF HRCONUS. Les barres d'erreur montrent des estimations régionales dans la fourchette des interquartiles pour les divers membres de l'ensemble du CanRCM4 LE. Le domaine du WRF HRCONUS n'inclut aucune des localités du tableau C-2 dans le Nord, et, en conséquence, les estimations du WRF sont omises dans cette région.

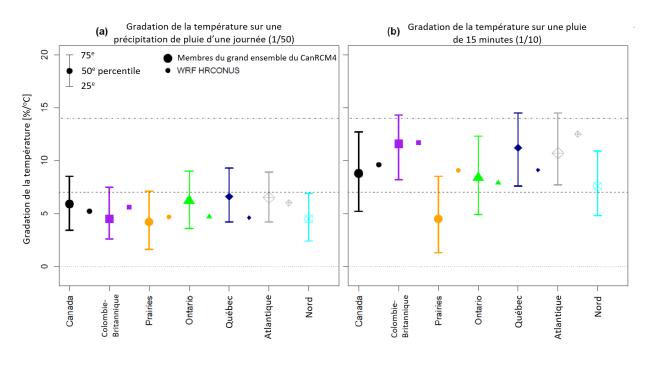


Figure 4.6 : Comparaison entre les données de calcul observées du CNBC pour des pluies de 15 minutes pour les localités s'approchant de celles du tableau C-2 et les estimations historiques (1986-2016) extrapolées du CanRCM4 LE pour la durée de 15 minutes en se fondant sur une échelle temporelle simple au niveau de la cellule la plus proche. Toutes les valeurs sont exprimées au même niveau de précision numérique que celui exprimé dans le CNBC (2015); les points qui sont au-dessus d'autres points sont identifiables par leur nuance plus foncée.

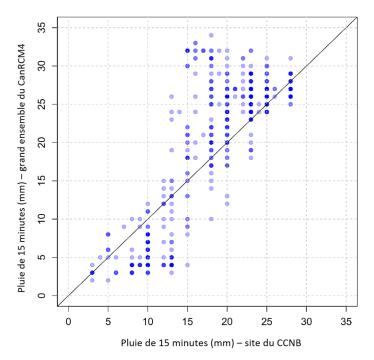


Figure 4.7 : Variations projetées (en pourcentage) selon le CanRCM4 LE de l'humidité relative annuelle moyenne pour les niveaux de réchauffement planétaire de +1 °C (dessin du haut), +2 °C (dessin du milieu) et +3 °C (dessin du bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.

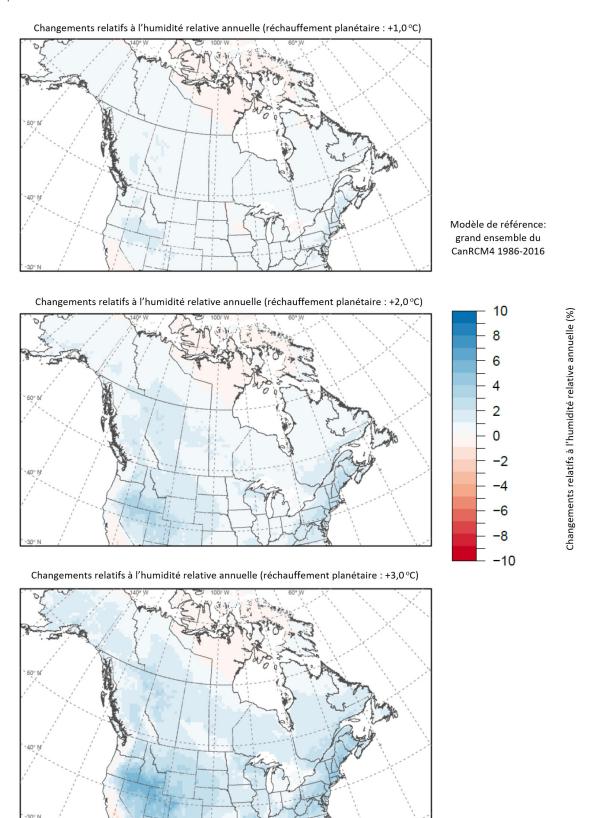
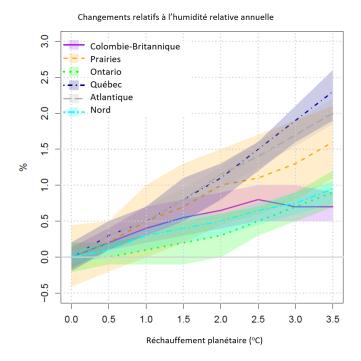


Figure 4.8 : Variations projetées de l'humidité relative annuelle moyenne, en pourcentage, pour les localités s'approchant de celles du tableau C-2 dans six régions canadiennes en tant que fonction de la variation de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimales et maximales des aires ombragées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir du CanRCM4 LE.



5. PRESSIONS DU VENT

5.1 Pressions horaires du vent

5.1.1 Évaluation

Les charges dues au vent sont spécifiées pour tenir compte des pressions ou succions externes causées par les vents forts sur les principaux systèmes structuraux et sur tous les composants secondaires de bâtiments ou de structures. Elles sont aussi utilisées dans la conception de structures souples, p. ex., des bâtiments hauts et des ponts, pour lesquelles on doit tenir compte d'oscillations et de vibrations induites par le vent. Dans le CNBC, les pressions de calcul du vent pour des périodes de récurrence de 10 et de 50 ans sont déterminées en fonction des vitesses de calcul du vent pour les mêmes périodes de récurrence, estimées d'après la distribution de Gumbel, ajustées aux valeurs maximales annuelles observées de la vitesse horaire du vent, enregistrées à une hauteur normalisée de l'anémomètre de 10 m au-dessus du sol. Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CHBDC) tient aussi compte de périodes de récurrence de 25 et de 100 ans. La pression du vent est directement proportionnelle au carré de la vitesse du vent.

Les variations historiques et projetées de la vitesse du vent au Canada n'ont pas été évaluées dans le cadre du RCCC (Bush et Lemmen, 2019). Si on compare au nombre de publications sur les variables comme la température et les précipitations, on a accordé bien moins d'attention aux extrêmes de vent

et, par conséquent, l'incertitude globale concernant les tendances historiques et les variations futures est aussi plus élevée. Certaines études (p. ex., Vautard et coll., 2010; McVicar et coll., 2012) ont porté sur l'évaluation des tendances historiques des vitesses moyennes et extrêmes des vents de surface (10 m), et elles font état de tendances générales à la baisse dans les observations à l'échelle planétaire. En particulier, des réductions de la vitesse moyenne des vents de surface de 5 à 15 % ont été constatées par Vautard et coll. (2010) dans les observations provenant de stations météorologiques situées dans toutes les zones continentales des latitudes septentrionales moyennes pour la période 1979-2008. On ne sait pas, toutefois, dans quelle mesure les tendances à la baisse découlent de facteurs climatiques ou de facteurs non climatiques qui influent sur les observations (p. ex., des variations de la rugosité de surface à proximité de l'anémomètre, la hauteur de l'anémomètre, et d'autres pratiques de mesure). Aussi, on ne comprend toujours pas bien les liens entre les tendances de la vitesse moyenne des vents et celles de la vitesse des vents extrêmes (GIEC, 2012).

Au-dessus du Canada, la vitesse des vents de surface présente à la fois des tendances à la baisse et à la hausse, selon les régions ou les saisons. Wan et coll. (2010) rapportent des réductions de la vitesse horaire des vents de surface dans l'ouest du Canada et la plupart des régions du sud du Canada pour toutes les saisons, mais des augmentations dans le centre de l'Arctique canadien pour toutes les saisons et pour les Maritimes, au printemps et à l'automne. Li et coll. (2017) ont analysé les tendances de la vitesse maximale annuelle observée du vent aux stations situées dans les grandes villes du Canada. Ils ont constaté que, dans 6 stations sur 20, la vitesse maximale du vent présentait des tendances significatives à la baisse, ce qui appuierait la théorie d'une tendance générale à la baisse.

Plusieurs études se sont penchées sur les variations projetées des vitesses moyennes et extrêmes du vent au-dessus de l'Amérique du Nord au moyen d'ensembles multimodèles de MCM. Par exemple, McInnes et coll. (2011) montrent qu'il y aura des augmentations des vitesses moyennes du vent pour les parties sud-est et nord de l'Amérique du Nord à la fin du siècle, l'ensemble multimodèle CMIP3, selon le scénario d'émissions A1B du GIEC SRES (2000). Kumar et coll. (2015) se sont penchés sur les variations des vents extrêmes à la fin du siècle, d'après l'ensemble multimodèle CMIP5, selon le scénario RCP8.5, et ont constaté des variations modestes positives et négatives au-dessus du Canada, représentant des variations d'une ampleur d'au plus quelques points de pourcentage. Le GIEC (2012), toutefois, souligne que le degré de confiance à l'égard des variations projetées relativement aux vents extrêmes d'après les MCM est faible, car un nombre relativement limité d'études ont évalué les vents extrêmes et parce que les MCM ne peuvent pas résoudre tous les mécanismes produisant des épisodes de vents extrêmes, comme les tempêtes de petite échelle. Dans la mesure où les MCM du CMIP5 projettent des variations dans les vents de surface, on ne sait pas si ces variations sont attribuables à un changement de la circulation ou à d'autres causes, p. ex., des variations de la rugosité de surface en raison de changements dans la végétation de surface, simulés par les composantes des écosystèmes terrestres de ces modèles.

Des évaluations récentes des variations observées et projetées dans l'activité des cyclones tropicaux (Knutson et coll., 2019, 2020) semblent indiquer que l'intensité moyenne des cyclones tropicaux à l'échelle mondiale et la proportion de cyclones tropicaux qui atteignent des niveaux d'intensité très élevés augmenteront avec le réchauffement climatique (degré de confiance *moyen* à *élevé*), ce qui comprendra des augmentations correspondantes de la vitesse du vent, mais que ces augmentations pourraient être accompagnées d'une fréquence inchangée, voire réduite, des cyclones tropicaux de toutes les catégories (degré de confiance *moyen*). L'effet net sur la fréquence des cyclones tropicaux intenses demeure donc incertain. Le degré de confiance à l'égard d'une remontée vers le nord de l'emplacement de l'intensité maximale des cyclones tropicaux dans l'ouest du Pacifique Nord et d'un ralentissement de la vitesse de translation des cyclones tropicaux est *moyen*.

La capacité de représenter les cyclones extratropicaux dans les MCM s'améliore sans cesse, en partie grâce à des augmentations de la résolution horizontale, même si la plupart des modèles sous-estiment toujours la fréquence et l'intensité des cyclones extratropicaux (Colle et coll., 2013; Zappa et coll., 2013). La réduction d'échelle dynamique avec un MCR peut aider à réduire les biais dans la fréquence et l'intensité des cyclones extratropicaux, mais ne les élimine pas, comme le démontrent Seiler et coll.

(2018) dans une étude au *moyen* du CanESM2 et du CanRCM4. De manière plus générale, on croit que la réponse dynamique au réchauffement climatique planétaire est incertaine et modeste (Deser et coll., 2012; Shepherd, 2014; Trenberth, 2015). Cette conclusion est appuyée indirectement par l'absence de résultats de détection et d'attribution concernant la fréquence, l'intensité ou l'emplacement des tempêtes et le manque de publications significatives sur la détection et l'attribution de changements dans la distribution de la pression en surface à l'échelle mondiale.

Des MCR ont aussi été utilisés dans des études à l'échelle régionale pour analyser les effets des changements climatiques sur les vitesses moyennes et extrêmes du vent. Pryor et coll. (2012) ont évalué les climats éoliens futurs au-dessus des États-Unis au moyen d'un ensemble obtenu auprès du programme NARCCAP (North American Regional Climate Change Assessment Program), selon le scénario d'émissions SRES A2, pour le milieu du siècle actuel (2041-2062). Ils ont constaté des réductions dans les vitesses movennes du vent au-dessus de l'ouest des États-Unis, mais aucune différence significative dans les vitesses extrêmes du vent à l'avenir. Une étude sur les projections à l'échelle régionale des vitesses extrêmes du vent au-dessus du Canada et des variations connexes des pressions de calcul du vent pour les bâtiments et les structures a été effectuée par Jeong et Sushama (2018a), au moyen du modèle climatique régional CRCM5 avec un écartement de grille de 0,44°. Ils ont tenu compte de simulations du CRCM5 pilotées par des simulations de deux MCM, selon les scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. Bien que l'on ait constaté guelques augmentations éparses de l'ampleur des vitesses et des pressions du vent ayant une période de récurrence de 50 ans à l'avenir, ces variations n'ont pas été jugées statistiquement robustes, les simulations individuelles montrant des profils divergents pour les variations projetées, ce qui indique que les différences sont probablement dues à une variabilité interne plutôt qu'à un forçage externe.

Une évaluation plus rigoureuse des signaux de changements climatiques dans les charges de calcul dues au vent pourrait ultimement être obtenue par une étude plus vaste des MCR avec une résolution beaucoup plus élevée que celle utilisée dans la plupart des travaux de recherche actuels. Dans une étude préliminaire, Pryor et coll. (2012) ont montré qu'une augmentation de la résolution du MCR de 50 km à 6 km augmentait les vitesses extrêmes du vent plus que les vitesses moyennes du vent. Plus récemment, Prein et coll. (2017a) font état de changements dans les caractéristiques des systèmes convectifs de mésoéchelle, qui produisent souvent des vents forts, dans les simulations WRF HRCONUS représentant la convection au-dessus de l'Amérique du Nord (voir aussi la section 4.2.2). Les résultats de tels modèles dépendent de la stratégie de modélisation et restent limités en termes d'étendue géographique et de durée de simulation en raison de leurs coûts de calcul très élevés.

Les études sur les projections de la vitesse extrême des vents en Amérique du Nord coïncident, en partie, sur le fait que les variations futures seront limitées. Cependant, le degré de confiance dans les variations projetées pour les vents extrêmes est généralement faible, car les MCM ne peuvent pas résoudre un grand nombre des mécanismes qui produisent les épisodes de vents extrêmes, et les MCR présentent également des biais dans la fréquence et l'intensité des systèmes de basse pression. Compte tenu du nombre limité de publications scientifiques, du faible rapport signal/bruit des variations projetées des vents extrêmes et de l'incapacité générale des MCR classiques à simuler les vents extrêmes associés aux phénomènes à petite échelle tels que les systèmes convectifs de mésoéchelle, le degré de confiance dans les projections des futures pressions de calcul du vent au Canada est *très faible*.

5.1.2 Recherche ciblée

Étant donné la rareté de la recherche et des simulations de modèles climatiques liés aux extrêmes de vitesse du vent subquotidiens au Canada, l'évaluation des publications dans le cadre de ce projet est complétée par une analyse des variations projetées pour les pressions de calcul du vent, et de leur variabilité interne, à partir du CanESM2 et du CanRCM4 LE. Les observations de référence de la vitesse horaire du vent à partir desquelles les charges de calcul dues au vent du CNBC ont été dérivées comprennent les données sur le vent provenant d'environ 135 stations mesurant les vitesses horaires moyennes du vent et de 465 stations mesurant les vitesses du vent pour l'aviation (moyenne

sur une ou deux minutes) ou les vitesses du vent pour le temps en surface (moyenne sur dix minutes) observées une fois par heure au début de l'heure (CNRC, 2015). Les simulations CanRCM4 sont effectuées avec un pas de temps de 20 minutes, et, par conséquent, la vitesse du vent qui est simulée dans un pas de temps donné pour une cellule de grille particulière devrait être considérée comme la vitesse du vent moyen dans la cellule de grille pendant la période de 20 minutes. Il convient toutefois de noter que les variations d'un pas de temps à l'autre ont peu de chances d'être réalistes, car elles se produisent à des échelles de temps plus courtes que celles que le modèle est capable de bien reproduire (voir la section 4.2.2). Néanmoins, une analyse des valeurs extrêmes est effectuée sur les valeurs maximales annuelles de la variable de vitesse maximale quotidienne du vent à 10 m du CanRCM4 - la vitesse maximale du vent pour tous les pas de temps de 0 h 00 UTC à 0 h 00 UTC le jour suivant - à chaque cellule de grille en utilisant l'approche d'analyse des valeurs extrêmes adoptée dans le CNBC. En particulier, la distribution de Gumbel est ajustée au moyen de la méthode des moments aux valeurs maximales annuelles de la vitesse du vent de 20 minutes en utilisant la période de 31 ans associée à chaque niveau de réchauffement climatique. Les vitesses du vent pour les périodes de récurrence utilisées pour la conception sont d'abord estimées, puis les pressions du vent sont calculées (CNRC, 2015). Cela est fait pour chacun des 50 membres de l'ensemble séparément afin d'estimer la dispersion de l'ensemble due à la variabilité interne. Les vitesses du vent sont converties en pressions du vent, et les variations projetées de l'ampleur des pressions de calcul pour les périodes de récurrence de 10, 25, 50 et 100 ans sont estimées à des niveaux spécifiques de variation de la température moyenne mondiale future (par exemple, +1, +2 et +3 °C) au-dessus du niveau de référence 1986-2016.

Un modèle de végétation dynamique a été utilisé pour les calculs impliquant le cycle du carbone terrestre dans les simulations CanESM2 mondiales qui pilotent le CanRCM4. Dans le CanESM2, la superficie cultivée augmente au cours de la période historique, puis change en fonction du climat à l'avenir. La végétation croît et meurt également en réponse aux changements climatiques, de sorte que la hauteur de la végétation et, par conséquent, la longueur de rugosité de surface ne sont pas stationnaires. Cela produit des variations perceptibles des vents à 10 m dans le CanESM2, mais il semble peu probable que la longueur de rugosité de surface non stationnaire dans le CanESM2 ait un effet perceptible sur le CanRCM4, puisque les vents de surface du CanESM2 ne sont pas utilisés pour piloter le CanRCM4. Seuls les vents aux niveaux du modèle atmosphérique CanESM2 sont utilisés à cette fin. Les variations de la rugosité de surface n'auraient que très faiblement influé sur les vents du CanESM2 aux niveaux du modèle atmosphérique dans la couche limite planétaire et n'auraient probablement eu aucun effet au-dessus de la couche limite planétaire¹¹. Aussi, le schéma de végétation dynamique a été désactivé et la longueur de rugosité de surface ne change donc pas avec le temps dans le CanRCM4. Pour ces deux raisons, on peut conclure sans risque que les variations de la vitesse du vent de surface dans le CanRCM4 ne sont pas causées par des variations de la rugosité de surface.

Le CanRCM4 LE projette des augmentations (généralement inférieures à 10 % pour le niveau de réchauffement climatique planétaire de +3 °C) des pressions de calcul du vent ayant une période de récurrence de 50 ans au-dessus du Canada (figure 5.1). Une variabilité interannuelle plus élevée, comme le montrent les augmentations du coefficient de variation (CV) et le rapport entre l'écart-type de la vitesse maximale annuelle du vent et la moyenne de la vitesse maximale annuelle du vent, est l'un des principaux facteurs qui contribuent aux augmentations projetées de la pression de calcul du vent à différents niveaux de réchauffement climatique (tableaux 5.1 et S5.1). La Colombie-Britannique, l'Ontario et les régions de l'Atlantique présentent des augmentations plus importantes des pressions de calcul du vent par rapport aux autres régions, et l'ampleur relative des augmentations est proportionnelle de façon à peu près linéaire au niveau du réchauffement climatique (figure 5.2). À titre de référence, les figures 5.3 et 5.4 et le tableau 5.2 présentent les variations projetées de la

L'effet des variations de la rugosité de surface se fait sentir plus fortement dans les vents à 10 m du CanESM2, parce que ces derniers sont dérivés des vents au niveau le plus bas du modèle en utilisant un schéma qui tient compte de la longueur de rugosité de surface.

pression de calcul du vent pour une période de récurrence de 10 ans; ces variations présentent un comportement similaire à celui des variations projetées pour une période de récurrence de 50 ans. Les profils spatiaux des variations projetées dans les vitesses et les pressions des vents extrêmes provenant du CanRCM4 LE sont généralement conformes aux résultats des MCM (McInnes et coll., 2011; Kumar et coll., 2015) et d'autres MCR (Jeong et Sushama, 2018a). Les variations projetées de la moyenne et le CV de la vitesse maximale annuelle du vent sont fournis en complément dans le tableau S5.1.

Le degré de confiance dans ces projections est *très faible*. Les variations projetées sont soumises à une grande variabilité interne; la dispersion de l'ensemble dans les projections du CanRCM4 LE est importante par rapport à l'ampleur de la variation forcée pour toutes les régions du Canada (tableaux 5.1 et 5.2; figures 5.2 et 5.4), ce qui indique une grande incertitude due uniquement à la variabilité naturelle du système climatique et suggère que « aucune variation » est un résultat plausible pour toutes les régions. Il existe également une grande incertitude liée aux modèles eux-mêmes, qui est beaucoup plus difficile à quantifier. Les variations de circulation dans les MCM sont faibles et incohérentes; il y a des biais dans la simulation des systèmes de basse pression à grande échelle qui subsistent après la réduction d'échelle dynamique (p. ex., Seiler et coll., 2018), et les MCM et les MCR ont une résolution insuffisante pour représenter les phénomènes à petite échelle comme les tornades et les tempêtes de vent convectives.

5.1.3 Interprétation

La pression de calcul du vent est une variable de niveau 3 pour laquelle le degré de confiance dans la projection est très faible. Les variations projetées à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 sont fournies à l'annexe 1.2; les résultats du CanRCM4 LE sont fournis avec prudence pour chaque niveau de réchauffement climatique à des fins d'illustration, avec la forte restriction que l'on ne peut accorder qu'une confiance limitée aux projections pour le moment. Elles ne devraient être utilisées que pour explorer d'éventuels scénarios futurs de charges dues au vent, en gardant à l'esprit que les variations pourraient très bien être sous-estimées, compte tenu des limites des systèmes de modélisation sur lesquels elles sont basées. En général, le CanRCM4 LE projette de petites variations dans les pressions de calcul du vent futures (généralement inférieures à +/-10 % à un niveau de réchauffement climatique de +3 °C par rapport au niveau de référence) avec une variabilité interne et une incertitude élevées. Les valeurs du rapport signal/bruit pour les charges dues au vent sont généralement proches de 1 à tous les niveaux de réchauffement climatique. Bien qu'il y ait une certaine concordance entre les projections de différents modèles, selon lesquelles les variations des pressions de calcul du vent futures au-dessus du Canada seront faibles (p. ex., Kumar et coll., 2015; Jeong et Sushama, 2018a), cette situation est sujette à une très grande incertitude en raison de l'absence d'un consensus entre les modèles sur les profils mondiaux de la réponse dynamique au forçage externe, du faible rapport signal/bruit et de l'incapacité générale des MCR classiques à représenter de manière adéquate un grand nombre des processus physiques qui sont à l'origine des vents extrêmes.

5.2 Pression de la pluie chassée par le vent

5.2.1 Évaluation

La pression de la pluie chassée par le vent (PPCV) est prise en compte dans la conception et la construction des bâtiments, parce qu'une pression élevée du vent en présence d'eau de pluie peut endommager l'enveloppe des bâtiments en favorisant l'infiltration d'eau par les joints, les fissures ou les surfaces extérieures poreuses. Dans le CNBC, la PPCV est définie comme la pression horaire du vent avec des chutes de pluie dépassant un certain seuil (c'est-à-dire 1,8 mm/h). La PPCV de calcul pour une période de récurrence de 5 ans est estimée à partir de la distribution de Gumbel ajustée à la série des valeurs maximales annuelles des PPCV horaires.

La plupart des études se sont penchées principalement sur l'estimation des valeurs historiques de la PPCV en utilisant les observations météorologiques effectuées dans différentes parties du monde, y compris au Japon (Murakami et coll., 1987), en Australie (Choi, 1992), au Chili (Pérez-Bella et coll., 2013), en Espagne (Pérez-Bella et coll., 2014) et au Canada (Welsh et coll., 1989; Cornick et Lacasse, 2005). Au Canada, Welsh et coll. (1989) ont élaboré une carte et un tableau pour la PPCV ayant une période de récurrence de 5 ans, qui ont été utilisés dans la conception de bâtiments résidentiels et commerciaux ainsi que de leurs systèmes de portes et de fenêtres (CSA, 2018).

Tel que mentionné à la section 5.1 ci-dessus, dans le cadre des études d'observation dont le nombre est limité, on a généralement constaté un affaiblissement des vents de surface à l'échelle mondiale, et on a obtenu une série de constatations ambiguës au Canada, les variations régionales suivant la direction de la tendance. Plusieurs études de modélisation se sont penchées sur les variations projetées dans les vitesses moyennes ou extrêmes du vent d'ici la fin du siècle, compte tenu des projections des ensembles multimodèles CMIP3 et CMIP5. Ces projections n'indiquent que des variations modestes au-dessus du Canada, avec peu de concordance en ce qui concerne la direction des variations. L'ampleur des variations pourrait être sous-estimée, compte tenu des limites des modèles. De façon générale, le degré de confiance à l'égard des projections est *très faible* en raison des faibles rapports signal/bruit internes et des niveaux élevés d'incertitude liée aux modèles.

Tel que mentionné au chapitre 4, le RCCC fait état de données d'observation indiquant des augmentations dans les précipitations annuelles totales au-dessus du Canada, avec des augmentations proportionnellement plus grandes en hiver et dans le nord du Canada (Bush et Lemmen, 2019). Le degré de confiance à l'égard des projections directes des variations dans la fréquence et l'intensité des précipitations est limité par l'incertitude liée à la modélisation et par des rapports signal/bruit internes relativement faibles. Il est important, toutefois, de tenir compte de la température, lorsqu'on examine la PPCV, étant donné que la température influe sur la fréquence relative des épisodes de pluie. Selon les projections, le réchauffement au Canada devrait être supérieur à la moyenne mondiale, les augmentations étant encore plus marquées en hiver et dans le nord du Canada. Les augmentations de la température de l'air en surface entraîneront un changement du type des précipitations, de neige en pluie, de sorte que la fréquence des précipitations sous forme de pluie augmentera entre l'automne et le printemps au Canada (Harder et coll., 2015; Jeong et Sushama, 2018b).

Par conséquent, il est probable que les variations dans l'occurrence et la quantité de la pluie sous un climat futur plus chaud pourraient avoir des conséquences sur les PPCV de calcul, même si, de façon globale, les vitesses du vent changent peu. Il convient de noter que ces variations pourraient se produire d'au moins trois façons : soit parce que les vents s'intensifient, un aspect à l'égard duquel le degré de confiance est *très faible*, ou parce que le nombre d'épisodes de pluie battante augmente, ce qui accroît la taille de l'échantillon annuel de vitesses horaires du vent à partir duquel on obtient le maximum annuel, ou parce que la période annuelle pendant laquelle des épisodes de pluie battante peuvent survenir s'étend à des périodes plus venteuses de l'année sur le plan climatologique, un aspect à l'égard duquel le degré de confiance pourrait être plus élevé. Malheureusement, un nombre limité d'études ont quantifié les variations futures dans l'occurrence combinée du vent et de la pluie et leurs conséquences sur les bâtiments. Nik et coll. (2015) constituent une exception; ils ont étudié la charge d'humidité future sur les façades de bâtiments, causée par la pluie chassée par le vent, en Suède, au moyen de simulations MCR suédoises, et ont constaté que des quantités d'humidité plus élevées s'accumuleront dans les parois de bâtiments à l'avenir. Néanmoins, des études évaluant les variations projetées de la PPCV ne sont pas encore disponibles pour de nombreux pays, y compris le Canada.

Même si peu d'études se sont penchées sur les variations projetées de la PPCV et que le degré de confiance à l'égard des projections des pressions futures de calcul du vent au Canada est *très faible*, une meilleure compréhension des augmentations projetées dans la température et les précipitations, et, par conséquent, dans les chutes de pluie, permet de croire, avec un degré de confiance *moyen*, que la PPCV de calcul augmentera au Canada à l'avenir.

5.2.2 Recherche ciblée

Étant donné que très peu d'études ont porté sur les variations projetées des extrêmes de vent et de pluie combinés, l'évaluation des publications dans le cadre de ce projet est complétée par une analyse des variations projetées de la PPCV sur la base des sorties horaires du CanESM2 et du CanRCM4 LE. Dans le cas des observations mesurées au moyen d'instruments, la PPCV est calculée à partir de séries chronologiques des vitesses maximales annuelles du vent sur 1 heure, qui coïncident avec des chutes de pluie supérieures à 1,8 mm/h. Le même seuil de 1,8 mm/h est appliqué dans les calculs basés sur les sorties du CanRCM4 LE, ce qui signifie que les taux de chute de pluie sont analysés à l'échelle des cellules de grille dans le modèle et à l'échelle des points dans les observations.

L'analyse des valeurs extrêmes pour le risque combiné de vent et de pluie, simulé par le CanRCM4 diffère légèrement de celle utilisée pour les pressions de calcul du vent. L'exigence supplémentaire selon laquelle les vitesses extrêmes du vent se produisent en même temps que les chutes de pluie réduit le nombre de membres du CanRCM4 LE de 50 à 15, car seuls 15 membres ont archivé les variables de haute fréquence nécessaires pour calculer à la fois la vitesse du vent sur 1 heure et le taux de chute de pluie sur 1 heure. Dans les deux cas, les variables de vent et de pluie sont des valeurs moyennes mesurées sur trois pas de temps de 20 minutes. Cela diffère de la variable de vent maximal quotidien sur un pas de temps de 20 minutes, utilisée pour calculer les pressions de calcul du vent.

Les projections de la PPCV dépendent en partie de la capacité du CanRCM4 à simuler correctement la fréquence des chutes de pluie dont le taux horaire dépasse le seuil; par conséquent, les biais des modèles climatiques – dans ce cas, les différences systématiques entre les probabilités historiques simulées et observées de chutes de pluie dépassant le seuil – peuvent influer sur la crédibilité des projections. Il convient de noter que, même si le modèle n'était pas biaisé à l'échelle des cellules de grille qu'il représente, il devrait quand même y avoir des différences avec les mesures ponctuelles; les taux de chute de pluie moyennés dans l'espace ne devraient pas concorder avec ceux à l'échelle ponctuelle, en particulier pour les périodes plus courtes.

La figure 5.5 compare les simulations historiques du CanRCM4 LE pour les chutes de pluie dépassant le seuil, les vitesses maximales annuelles du vent sur 1 heure et les données de calcul de la PPCV avec les observations. Malgré la différence d'échelle spatiale – des cellules de grille du modèle climatique par rapport à celle des observations effectuées dans les stations – le CanRCM4 reproduit avec une fidélité raisonnable le profil et l'ampleur observés sur le plan spatial pour les chutes de pluie dépassant le seuil, la vitesse maximale annuelle du vent et la PPCV. Les simulations ne sont pas corrigées pour le biais avant de calculer les variations projetées, car les études sur le comportement à l'échelle spatiotemporelle nécessaires pour ajuster de manière crédible les valeurs des cellules de grille à l'échelle ponctuelle ne sont pas encore disponibles (Innocenti et coll., 2019).

Les variations projetées des PPCV de calcul (période de récurrence de 5 ans) et leur variabilité interne sont quantifiées à l'aide du CanESM2 et du CanRCM4 LE. Les valeurs sont présentées à différents niveaux de variation de la température moyenne mondiale future au-dessus de la valeur de référence 1986-2016. Le CanRCM4 LE projette une augmentation générale des futures PPCV de calcul pour la plupart des régions du Canada (figure 5.6). L'étendue spatiale et l'ampleur relative des augmentations s'agrandissent, de façon générale, à mesure que les niveaux de réchauffement climatique augmentent. En moyenne, les projections du CanRCM4 LE pour les PPCV de calcul montrent des augmentations de +5 % à environ +22 % pour les six régions canadiennes à un niveau de réchauffement mondial de +3 °C. La Colombie-Britannique et les régions du Nord affichent des augmentations plus importantes comparativement aux autres régions (tableau 5.3). En particulier, les intervalles interquartiles des PPCV de calcul pour la Colombie-Britannique et les régions du Nord excluent la ligne de variation zéro lorsque les niveaux de réchauffement climatique sont de +1 °C et de +2 °C, respectivement, par rapport à la période de référence (figure 5.7).

Le CanRCM4 LE projette des augmentations de la fréquence des chutes de pluie (> 1,8 mm/h) à l'avenir dans l'ensemble du Canada, reflétant les effets combinés de l'augmentation de la quantité des

précipitations totales futures et de la fréquence accrue des chutes de pluie en saison froide (automne-printemps) causée par l'augmentation de la température de l'air (figure 5.8). Le profil spatial des variations projetées pour la fréquence des chutes de pluie (> 1,8 mm/h) concorde avec les variations projetées pour la PPCV de calcul (indiquées à la figure 5.6 au niveau de réchauffement climatique de +2 °C), avec des augmentations plus importantes au-dessus de la Colombie-Britannique, du Nord et des régions septentrionales du Québec. Par conséquent, des données indiquent que l'augmentation de la fréquence des chutes de pluie futures est le principal facteur contribuant aux augmentations projetées de la future PPCV de calcul. Il en ressort que les profils spatiaux des variations projetées dans les PPCV de calcul sont très différents de ceux des pressions de calcul du vent, présentés dans les figures 5.1 et 5.2, en particulier pour la Colombie-Britannique et les régions du Nord. En outre, les variations relatives projetées des PPCV de calcul sont plus grandes que celles des pressions de calcul du vent.

Le lien entre la température et l'augmentation correspondante de la proportion des épisodes de précipitations sous forme de pluie permet d'avoir un degré de confiance moyen en ce qui concerne l'augmentation des PPCV. Néanmoins, le degré de confiance à l'égard du profil et de l'ampleur des variations projetées des PPCV est très faible en raison de la grande incertitude liée aux multiples sources pour les projections des chutes de pluie et de la vitesse du vent. La variabilité interne associée aux chutes de pluie et à la vitesse du vent entraîne des intervalles interquartiles importants dans les variations de la PPCV projetées par le CanRCM4 pour toutes les régions canadiennes et les périodes futures (tableau 5.3 et figure 5.7). Comme mentionné précédemment dans le contexte des extrêmes de vent, l'incertitude supplémentaire relative aux variations projetées découle de la difficulté à quantifier les incertitudes de modélisation qui se reflètent dans la difficulté à simuler les cyclones extratropicaux dans les MCM et les MCR, et du fait que certains processus clés tels que les tempêtes de vent convectives à petite échelle ne sont pas représentés. En outre, il existe une incertitude considérable liée aux modèles en ce qui concerne la réponse des vents simulés aux forçages externes. Il existe également de nombreuses incertitudes liées aux modèles qui concernent l'aspect pluviométrique de la PPCV (sections 4.1 et 4.2). Par exemple, bien que le profil des variations des chutes de pluie du CanRCM4 (section 4.1.2; figure 4.1) corresponde aux variations régionales améliorées de la PPCV, le degré de confiance à l'égard de ce profil en tant que tel est nettement plus faible en raison de la rareté des études sur les variations projetées des chutes de pluie et les variations régionales obtenues à l'aide de différents modèles.

5.2.3 Interprétation

La PPCV est une variable de niveau 3 qui combine les variations de la fréquence d'épisodes de fortes pluies avec les variations des vents violents.

Tel qu'on l'a évalué ci-dessus, le degré de confiance global quant à l'augmentation de la PPCV est *moyen*. Les augmentations projetées sont principalement dues à l'augmentation de la fréquence des chutes de pluie futures (> 1,8 mm/h) en raison de l'augmentation combinée de la température de l'air et des quantités de précipitations. Les variations projetées de la température et des précipitations, et, par conséquent, des chutes de pluie sont relativement bien comprises au Canada, comparativement aux variations des vitesses moyennes et extrêmes du vent. Comme c'est le cas pour les charges dues au vent, les valeurs du rapport signal/bruit pour la PPCV sont généralement proches de 1 à tous les niveaux de réchauffement climatique. Néanmoins, même en l'absence de variations de la vitesse du vent et de cooccurrence du vent et des précipitations, l'augmentation de la fréquence des chutes de pluie entraînera des augmentations de la PPCV.

En revanche, le degré de confiance à l'égard de l'ampleur projetée des variations est *très faible*. À l'échelle régionale, le CanRCM4 LE projette des augmentations plus importantes de la PPCV au-dessus de la Colombie-Britannique et du Nord, avec l'émergence du signal forcé dû à la variabilité interne aux niveaux de réchauffement climatique dépassant +1 °C et +2 °C, respectivement. Toutefois, les études sont rares, et on ne peut donc pas évaluer la robustesse de ces résultats pour les différents systèmes de modélisation climatique.

Quoi qu'il en soit, des augmentations de la PPCV pourraient constituer un nouveau risque pour les bâtiments existants conçus en fonction de données historiques de la PPCV. Les variations projetées à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 sont donc fournies à l'annexe 1.2 d'après le CanRCM4 LE pour chaque niveau de réchauffement climatique. Il est impossible d'évaluer un degré de confiance pour ces projections propres aux lieux, mais elles sont tout de même fournies afin que les praticiens puissent s'en servir pour explorer les scénarios futurs possibles et comme complément à l'analyse des risques.

Tableau 5.1 : Variations projetées de la pression horaire du vent ayant une période de récurrence de 50 ans (en haut) et coefficient de variation (CV) de la pression horaire maximale annuelle du vent (en bas) à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement climatique de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation des pressions hor. du vent 1/50 [%]	Niveau de réchauffement mondial						
Région	+1°C +2°C +3°C						
Colombie-Britannique	1.1 (-5.7, 7.8)	3.9 (-3.2, 13.5)	7.4 (-0.2, 19.1)				
Prairies	-0.6 (-6.7, 6.0)	-0.2 (-7.1, 7.0)	0.0 (-6.7, 7.2)				
Ontario	2.1 (-5.5, 10.6)	4.8 (-3.9, 14.4)	8.5 (-0.8, 18.6)				
Québec	1.6 (-5.2, 9.0)	2.6 (-4.9, 11.8)	4.1 (-4.3, 12.2)				
Atlantique	2.9 (-4.5, 11.0)	5.8 (-3.8, 15.1)	6.2 (-2.2, 15.8)				
Nord	-0.6 (-7.3, 6.9)	0.6 (-7.2, 9.2)	1.6 (-6.1, 10.4)				
Canada	1.6 (-5.6, 9.3)	3.6 (-4.7, 12.3)	5.3 (-3.2, 14.4)				

Variation des pressions hor. du vent – CV [%]	Niveau de réchauffement mondial						
Région	+1°C +2°C +3°C						
Colombie-Britannique	0.6 (-11.1, 13.8)	2.3 (-10.8, 16.5)	6.5 (-6.8, 24.6)				
Prairies	1.4 (-10.4, 15.4)	4.2 (-9.8, 20.1)	7.6 (-6.3, 23.6)				
Ontario	2.3 (-10.4, 18.1)	5.3 (-9.1, 23.2)	10.2 (-4.9, 27.1)				
Québec	0.0 (-10.6, 12.9)	0.7 (-12.1, 17.3)	1.5 (-12.5, 17.0)				
Atlantique	1.6 (-12.0, 16.8)	3.0 (-11.4, 20.4)	3.1 (-10.0, 20.0)				
Nord	-1.6 (-12.6, 11.2)	0.3 (-13.3, 15.3)	1.4 (-13.2, 15.4)				
Canada	1.3 (-10.9, 15.1)	3.0 (-10.5, 19.6)	5.1 (-9.2, 21.0)				

Tableau 5.2 : Variations projetées (en pourcentage) de la pression horaire du vent ayant une période de récurrence de 10 ans à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement climatique de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation des pressions hor. du vent 1/10 [%]	Niveau de réchauffement mondial					
Région	+1°C +2°C +3 °C					
Colombie-Britannique	0.7 (-3.9, 5.5)	3.7 (-1.4, 9.7)	6.2 (-0.9, 14.1)			
Prairies	-0.9 (-5.2, 3.9)	-1.1 (-5.8, 3.9)	-1.4 (-6.0, 3.7)			
Ontario	1.8 (-3.6, 7.7)	3.6 (-2.3, 10.3)	6.7 (0.0, 13.6)			
Québec	1.3 (-2.9, 6.9)	2.6 (-3.0, 8.9)	3.5 (-1.9, 9.3)			
Atlantique	2.5 (-3.0, 8.2)	4.8 (-1.2, 11.6)	5.1 (-0.9, 12.4)			
Nord	-0.3 (-5.3, 5.2)	0.6 (-4.8, 6.5)	1.7 (-3.5, 7.5)			
Canada	1.3 (-3.8, 6.9)	3.1 (-3.0, 9.4)	4.4 (-1.5, 10.6)			

Tableau 5.3: Variations projetées de la pression de la pluie chassée par le vent (PPCV) ayant une période de récurrence de 5 ans à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour des niveaux de réchauffement climatique de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation de la PPCV 1/5 [%]	Niveau de réchauffement mondial				
Région	+1 °C	+2 °C	+3 °C		
Colombie-Britannique	6.7 (1.1, 13.2)	11.9 (5.6, 19.2)	15.1 (9.3, 22.7)		
Prairies	1.1 (-5.1, 8.1)	4.5 (-3.8, 12.9)	5.8 (-2.8, 15.7)		
Ontario	2.0 (-3.6, 8.4)	5.4 (-1.8, 11.6)	10.0 (2.4, 17.8)		
Québec	2.6 (-3.4, 7.9)	4.1 (-1.4, 12.5)	6.6 (-0.2, 13.2)		
Atlantique	4.2 (-1.9, 9.5)	6.5 (-0.1, 13.3)	8.3 (1.7, 15.2)		
Nord	7.7 (-0.8, 16.9)	13.5 (4.3, 24.2)	22.0 (11.2, 30.9)		
Canada	2.8 (-2.9, 9.2)	5.9 (-0.7, 13.4)	9.0 (1.8, 16.8)		

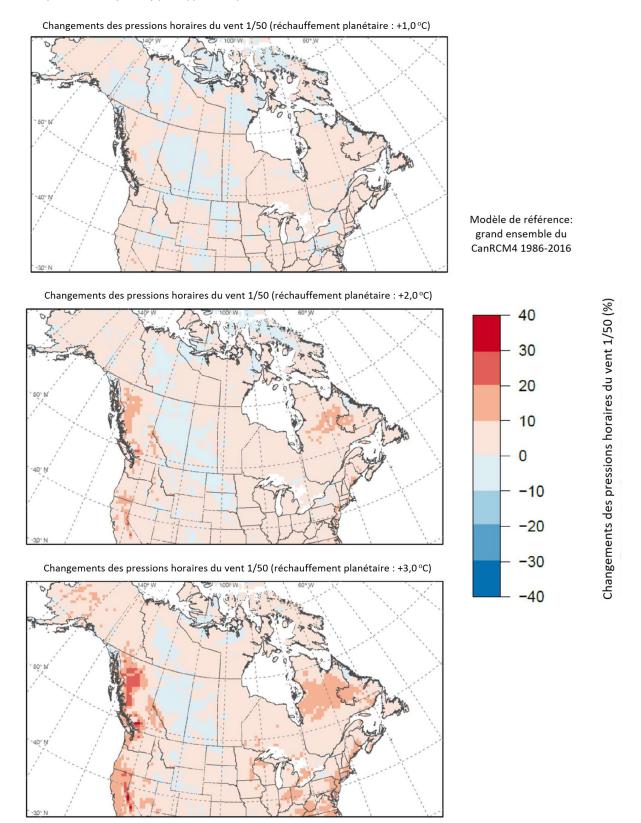


Figure 5.2 : Variations projetées des pressions horaires du vent ayant une période de récurrence de 50 ans à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction de la variation de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des superficies colorées représentent la projection d'ensemble du CanRCM4 et le 25° centile et 75° centile, respectivement.

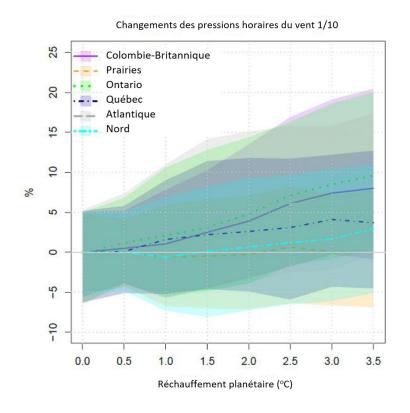


Figure 5.3 : Variations projetées (en pourcentage) de la pression de calcul du vent ayant une période de récurrence de 10 ans selon le CanRCM4 (moyenne d'ensemble) pour des niveaux de réchauffement climatique de +1 °C, de +2 °C et de +3 °C par rapport à la période de référence 1986-2016.

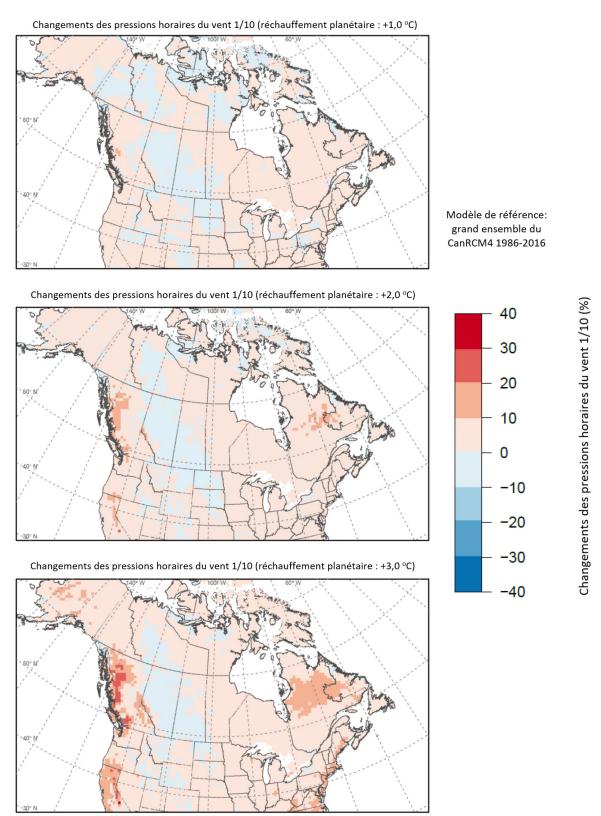


Figure 5.4 : Variations projetées (en pourcentage) des pressions horaires du vent ayant une période de récurrence de 10 ans pour six régions canadiennes en fonction de la variation de la température moyenne mondiale. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des superficies colorées représentent les 50°, 25° et 75° centiles, respectivement.

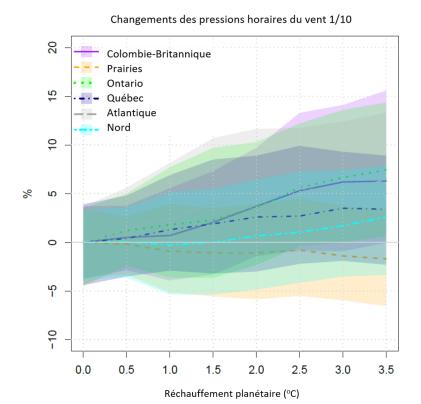


Figure 5.5 : a) Distributions spatiales et b) diagrammes de dispersion basés sur les données d'observation provenant de 130 stations météorologiques et de simulations du CanRCM4 LE pour le nombre d'heures annuelles de pluie (> 1,8 mm/h), la vitesse maximale annuelle moyenne du vent (m/s), et la PPCV (Pa) ayant une période de récurrence de 5 ans pour la période de référence 1986-2016. Les couleurs des cercles dans a) représentent les valeurs des observations provenant de stations avec la même échelle de couleurs que le CanRCM4. Les couleurs des symboles dans b) représentent les six régions canadiennes définies à la figure 2.5 (Colombie-Britannique : violet; Prairies : orange; Ontario : vert; Québec : bleu foncé; Atlantique : gris; et Nord : cyan).

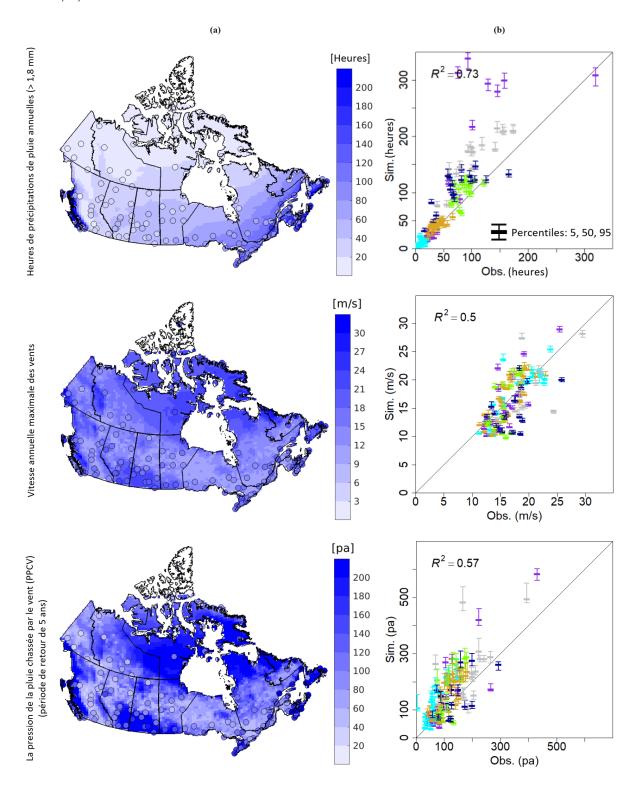


Figure 5.6 : Variations projetées (en pourcentage) de la PPCV ayant une période de récurrence de 5 ans selon le CanRCM4 LE pour des niveaux de réchauffement climatique de +1 °C (en haut), de +2 °C (au milieu) et de +3 °C (en bas) par rapport à la période de référence 1986-2016.

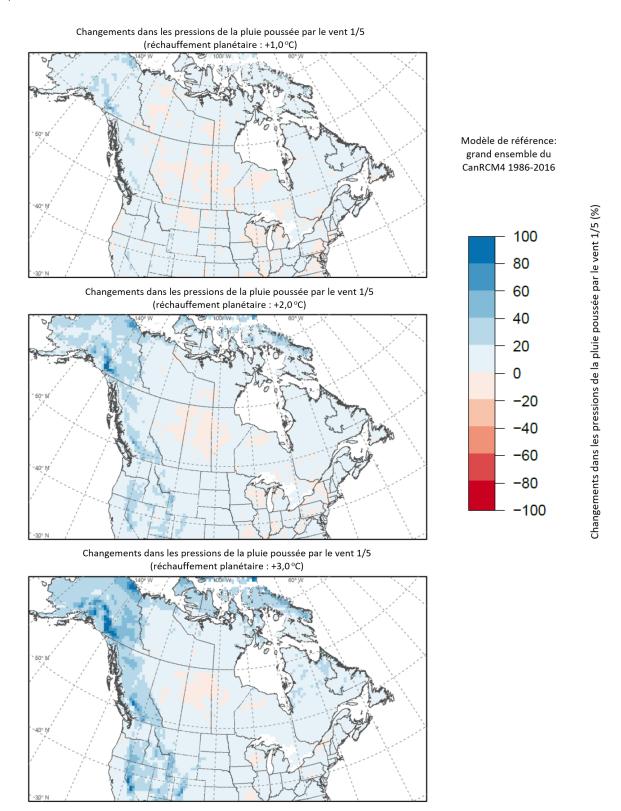


Figure 5.7 : Variations projetées de la PPCV ayant une période de récurrence de 5 ans à des localités s'approchant de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction de la variation de la température moyenne mondiale par rapport à la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des superficies colorées représentent les 50°, 25° et 75° centiles, respectivement.



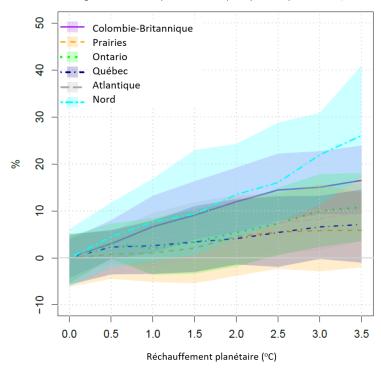
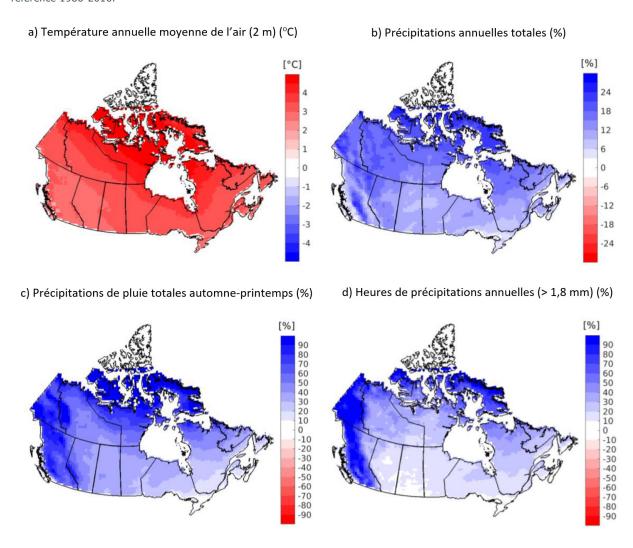


Figure 5.8 : Variations projetées de la a) température annuelle moyenne de l'air (à 2 m), des b) précipitations totales annuelles, de la c) quantité totale de pluie de l'automne au printemps, et du d) nombre d'heures annuelles de pluie (> 1,8 mm) d'après le CanRCM4 LE (moyenne d'ensemble) pour un niveau de réchauffement climatique de +2 °C par rapport à la période de référence 1986-2016.



6. NEIGE ET GLACE

6.1 Charges de neige

6.1.1 Évaluation

On utilise les éléments de la charge de neige du tableau C-2 du Code national du bâtiment du Canada (CNBC) pour prendre en compte les charges gravitationnelles causées par l'accumulation de neige sur le toit des bâtiments. On calcule la charge de neige totale en combinant deux composants : la charge de neige au sol et la charge de pluie correspondante. On transforme la charge au sol en une charge sur le toit au moyen d'un facteur de base, d'un facteur d'accumulation tenant compte des dérives, d'un facteur relatif à la pente et d'un facteur éolien ou d'exposition, avant l'ajout de la charge de pluie. Comme la quantité de neige sur les toits n'est pas surveillée régulièrement, on se sert de la charge de neige au sol comme référence pour estimer la charge de neige sur le toit. La charge de pluie correspondante tient compte des conditions de neige mouillée causées par les épisodes de pluie sur la neige. Cependant, elle ne doit pas dépasser la charge de calcul de la neige au sol et elle représente habituellement moins de 10 % de la charge de neige au sol.

L'étendue aréale de la couverture neigeuse (ECN) et l'équivalent en eau de la neige (EEN) sont les principales caractéristiques de la charge de neige au sol, dont l'accumulation et l'ablation réagissent à la fois à la température et aux précipitations. On utilise les valeurs maximales annuelles de l'EEN accumulée au sol pour déterminer les charges de calcul de la neige au sol. À la différence de l'ECN, l'EEN prend en compte l'épaisseur de la couche de neige et la densité de la neige. Dans le CNBC, la charge de calcul de la neige au sol est associée à la période de récurrence de 50 ans, comme estimée à partir de la distribution de Gumbel ajustée aux valeurs maximales annuelles.

Le Rapport sur le climat changeant du Canada (RCCC) [Bush et Lemmen, 2019] a présenté l'évaluation des tendances historiques et des projections de l'ECN et de l'EEN au Canada. La partie de l'année présentant une couverture neigeuse a diminué sur la majeure partie du Canada de 5 à 10 % par décennie depuis 1981, en raison de l'apparition de la neige plus tardive et de la fonte printanière plus précoce (degré de confiance très élevé). L'accumulation saisonnière de neige observée a également diminué de 5 à 10 % par décennie, à l'exception du Sud de la Saskatchewan et de certaines parties de l'Alberta et de la Colombie Britannique (augmentations de 2 à 5 % par décennie). D'après les projections de modèles climatiques, il est très probable que, dans tous les scénarios d'émissions, la durée de la couverture neigeuse diminuera d'ici le milieu du siècle au Canada en raison des augmentations de la température de l'air en surface. Des différences dans les projections de couverture neigeuse au printemps entre les scénarios d'émissions apparaissent vers la fin du siècle, la perte de couverture neigeuse stabilisée du scénario d'émissions RCP4.5 étant due à la stabilisation des forçages radiatifs en 2080 et à la stabilisation connexe de la température de l'air au Canada (figure 2.2), mais la perte de couverture neigeuse est continue dans le scénario d'émissions RCP8.5. Une réduction de l'accumulation de neige par saison de 5 à 10 % par décennie (jusqu'en 2050) est projetée sur la majeure partie du Sud du Canada. En revanche, seules de légères variations de l'accumulation de neige sont projetées dans les régions nordiques du Canada, car on prévoit des augmentations des précipitations hivernales pour contrebalancer une période d'accumulation de neige plus courte (degré de confiance moyen).

Plus généralement, dans des évaluations internationales, on a conclu qu'il existe un degré de confiance *très élevé* que l'ECN a diminué dans l'hémisphère Nord, surtout au printemps (GIEC, 2013). Selon le GIEC (2013), l'ECN au printemps, dans l'hémisphère Nord, a diminué de 1,6 % par décennie pendant la période de 1967 à 2012. Dans une étude récente, on a attribué à l'influence humaine la diminution observée de l'ECN au printemps dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord (Rupp et coll., 2013; Najafi et coll., 2016) et on a montré que la diminution de l'ECN est étroitement liée à un raccourcissement de la durée de la couverture neigeuse saisonnière (Brown et Mote, 2009).

Des évaluations internationales indiquent un degré de confiance *élevé* que l'ECN au printemps, dans l'hémisphère Nord, sera considérablement réduite d'ici la fin du présent siècle si la croissance du forçage climatique anthropique ne diminue pas (GIEC, 2013). De futures réductions de l'ECN, surtout dans le Sud du Canada au printemps, sont également projetées par les modèles climatiques mondiaux (MCM) CMIP3 (Roesch, 2006; Brown et Mote, 2009) et CMIP5 (Brutel-Vuilmet et coll., 2013, Mudryk et coll., 2018). Cependant, il existe un degré de confiance *faible* dans l'ampleur projetée des réductions de l'ECN dans l'hémisphère Nord, car les processus relatifs à la neige des MCM sont très simplifiés (GIEC, 2013).

Il y a également eu un nombre considérable d'études sur les variations observées et projetées de la quantité de neige. Par exemple, d'après des observations in situ, des diminutions de l'épaisseur de la couche de neige au printemps ou de l'EEN ont été rapportées en Chine (Ma et Qin, 2012) et dans les Alpes européennes (Marty et Meister, 2012). Des études ont également observé des diminutions de l'EEN au printemps au cours des trois dernières décennies, dans l'hémisphère Nord, d'après des ensembles de données satellitaires (p. ex., Luojus et coll., 2011; Gan et coll., 2013). Les diminutions de l'EEN au printemps déduites des analyses contraintes par observations ont été attribuées à une influence anthropique dans la moitié nord (> 45°) de l'hémisphère Nord (Jeong et coll., 2017) et dans le Sud de la Colombie-Britannique (Najafi et coll., 2017).

Le GIEC (2013) a déclaré que le réchauffement climatique mondial réduira l'EEN à mesure que le climat continue de se réchauffer, à la fois en transformant les précipitations de neige en pluie et en accélérant la fonte des neiges. D'autre part, les augmentations des précipitations entraîneront des diminutions de la quantité de neige dans la majeure partie des latitudes septentrionales élevées pendant les mois d'hiver, car les températures demeureront encore sous le point de congélation. D'après les modèles CMIP3 (Räisänen, 2008) et CMIP5 (Brutel Vuilmet et coll., 2013), l'EEN maximal annuel pourrait augmenter quelque peu dans les régions les plus froides, mais devrait diminuer fortement dans la limite méridionale de la zone enneigée en hiver vers la fin du présent siècle, bien que le moment où se produiront ces changements varie largement en fonction du scénario d'émissions.

Dans l'ensemble, il existe un degré de confiance *moyen* que l'EEN maximal annuel et, par conséquent, l'élément neige de la charge de neige au sol, soit augmentera, soit présentera peu de variation dans les latitudes septentrionales élevées et diminuera plus au sud, en raison de facteurs concurrents d'augmentation des températures et des précipitations. Cependant, étant donné le degré de confiance *faible* dans l'ampleur des diminutions de l'ECN, en combinaison avec une incertitude additionnelle dans les projections de l'EEN, le degré de confiance dans l'ampleur projetée des variations dans les charges de neige au sol au Canada est *très faible*.

6.1.2 Recherche ciblée

L'évaluation des variations futures de l'accumulation de neige dans le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) est fondée sur les projections des MCM pour des périodes fixes dans différents scénarios d'émissions. Comme décrite au chapitre 1, l'approche recommandée pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base (BIPB) consiste plutôt à fournir les variations régionales liées à des niveaux fixes de réchauffement climatique mondial que pour des périodes fixes dans différents scénarios, car cela permet de réduire considérablement la dépendance aux scénarios d'émissions pour la majeure partie du présent siècle.

Les variations projetées des charges de calcul de la neige (période de récurrence de 50 ans) et leur variabilité interne sont quantifiées à l'aide des extrants quotidiens de l'EEN obtenus directement des simulations du CanESM2 et du CanRCM4 LE. La distribution de Gumbel est ajustée par la méthode des moments aux quantités quotidiennes maximales annuelles de l'EEN pour des périodes de 31 ans associées à différents niveaux de réchauffement climatique mondial. Les valeurs sont donc calculées directement de l'EEN plutôt qu'à partir de l'épaisseur et de la densité de la couche de neige comme dans le CNBC. Les résultats sont fournis à certains niveaux de variation de température moyenne mondiale future (p. ex., +1 °C, +2 °C et +3 °C) supérieurs au niveau de référence de 1986-2016.

Le modèle CanRCM4 LE projette des diminutions dans les futures charges de calcul de la neige dans les régions méridionales du Canada. L'étendue spatiale et l'ampleur relative des diminutions augmentent, en général, avec le niveau de réchauffement climatique mondial (voir les figures 6.1 et 6.2). Cette augmentation est principalement causée par des augmentations des futures températures de l'air en surface, ce qui mène à des diminutions générales des accumulations de neige au sol et de l'EEN maximal annuel en raison de l'apparition retardée de la neige et de la fonte plus précoce des neiges ainsi que d'épisodes de fonte des neiges plus fréquents pendant la période d'enneigement. À l'inverse, les variations projetées pour les charges de calcul de la neige révèlent quelques augmentations dans le Nord (tableau 6.1), lesquelles sont principalement dues à des augmentations continues des précipitations tombant sous forme de neige dans le futur. Cependant, l'ampleur relative des variations projetées dans cette région est faible, p. ex., en gros + 5 % pour un niveau de réchauffement climatique mondial de + 3 °C par rapport à la période de référence, car les augmentations des précipitations hivernales sont contrebalancées par une période d'accumulation de la neige plus courte.

Même si Jeong et Sushama (2018b) ont étudié les variations projetées des caractéristiques de base des épisodes de pluie sur la neige, comme la fréquence des épisodes et la quantité totale des précipitations, en utilisant un modèle régional du climat (MRC) canadien, le modèle CRCM5, qui a également été utilisé à un espacement de grille de 0,44°, aucune étude visant à déterminer les quantités extrêmes de pluie sur la neige n'a été réalisée pour le Canada. Lorsqu'elles étaient comparées aux variations projetées de l'élément neige, les simulations du CanRCM4 LE semblaient indiquer des variations relatives plus faibles de l'élément pluie ayant une variabilité interne considérablement plus élevée (figure 6.3). Cependant, comme mentionné ci-dessus, l'élément pluie est habituellement inférieur à 10 % de l'élément charge de neige au sol et son ampleur est limitée à celle de la charge de neige au sol. Néanmoins, l'incertitude globale concernant les processus combinés pluie-neige sur le sol est élevée. Finalement, en complément, les variations projetées de la moyenne et du coefficient de variation des éléments charge de neige sont présentées aux tableaux S6.1 et S6.2, respectivement.

Le degré de confiance dans les projections de la charge de neige et de la charge de pluie associée est très faible malgré le degré de confiance moyen dans le profil à grande échelle des variations projetées de la charge de neige, avec des diminutions dans le Sud du Canada et peu de variation ou de modestes augmentations dans le Nord. Il existe un degré de confiance très faible dans les variations projetées de l'étendue de la couverture neigeuse, également un degré de confiance très faible dans les différentiations des régions présentant des diminutions projetées avec celles présentant peu de variation ou de modestes augmentations. En outre, l'incertitude du modèle associée aux MCM et aux MRC, leurs sous-modèles de la surface terrestre et leurs modèles très simplifiés utilisés pour la neige donnent lieu à une incertitude des modèles très élevée et difficile à quantifier. Cela est davantage compliqué pour les charges de pluie, car il existe très peu d'études visant à évaluer la capacité des modèles à simuler des épisodes de pluie sur la neige et à déterminer si les processus et les situations synoptiques qui produisent de tels épisodes sont suffisamment représentés dans les modèles.

6.1.3 Interprétation

La charge de neige est une variable de niveau 3. Les variations projetées dans les éléments neige et pluie dans les localités situées près de celles indiquées au tableau C-2 sont présentées à l'annexe 1.2. Les valeurs sont fondées sur les projections du modèle CanRCM4 LE. Dans l'ensemble, les profils spatiaux des variations projetées par le CanRCM4 LE dans l'élément neige au Canada concordent avec les résultats des MCM pour l'ECN (p. ex., Peacock, 2012; Brutel Vuilmet et coll., 2013; Mudryk et coll., 2018), l'épaisseur de la couche de neige (Peacock, 2012) et l'EEN maximal annuel (p. ex., Räisänen, 2008; Brutel Vuilmet et coll., 2013), de même qu'avec les résultats des simulations de la charge de neige par le CRCM5 (Jeong et Sushama, 2018a). Étant donné cette concordance, ainsi que les liens entre les variations de temperature, de précipitations et de l'EEN, comme indiqué ci-dessus également, il existe un degré de confiance *moyen* dans le profil spatial des diminutions de l'élément

neige des charges de neige projetées par le CanRCM4 LE dans le Sud et de possibles augmentations dans le Nord. L'ampleur de la variation est plus incertaine (degré de confiance *très faible*) en raison du rôle de la variabilité interne représentée par les écarts à la figure 6.2, ainsi que d'une vaste gamme d'incertitudes du modèle difficiles à quantifier. Les valeurs du rapport signal/bruit pour l'élément neige de la charge de neige totale dépassent généralement 0,5 jusqu'à ce que le niveau du réchauffement climatique mondial de + 2,5 °C indique une incertitude considérable due à une variable interne. De plus, une incertitude plus importante est prévue dans les régions présentant un terrain plus complexe qui ne sont pas résolues à la résolution spatiale du CanRCM4 (p. ex., Terzago et coll., 2017). Il existe également un degré de confiance *très faible* dans les projections de l'élément pluie de la charge de neige, en raison principalement de la grande variabilité interne, ainsi que de la nature complexe de la variable (la pluie doit tomber lorsqu'il y a présence de neige au sol; les valeurs du rapport signal/bruit dépassent généralement 0,5 à tous les niveaux de réchauffement climatique mondial), des incertitudes du modèle influant sur la présence ou l'absence de neige au sol, et les précipitations en général, et de la représentation des processus responsables des précipitations de pluie par temps froid.

Les diminutions dans l'élément sol futur des charges de calcul de la neige, projetées par le CanRCM4 LE pour le Sud du Canada, concordent avec les résultats obtenus pour l'ECN, l'épaisseur de la couche de neige, l'EEN et les charges de neige des projections antérieures des MCM et MRC, et avec la compréhension des processus. Par conséquent, il existe un degré de confiance *moyen* que l'élément neige des charges de calcul de la neige diminuera avec le réchauffement climatique dans toutes les régions sauf les Prairies (degré de confiance *faible* dans les diminutions) et le Nord (degré de confiance *faible* qu'il y aura soit aucune variation, soit une augmentation modeste). Il existe un degré de confiance *très faible* dans l'ampleur des variations projetées pour toutes les régions.

6.2 Charges d'accumulation de glace

6.2.1 Évaluation

On précise les charges d'accumulation de glace pour prendre en compte l'accumulation de glace sur toutes les surfaces exposées des ponts routiers, comme les éléments de superstructures, les supports structuraux, les feux de circulation, les luminaires, les garde fous, les panneaux de signalisation, les poutres de ponts et les barrières solides. L'accumulation de glace atmosphérique est principalement causée par les précipitations verglaçantes pendant les tempêtes de verglas, tandis que les précipitations deviennent habituellement verglaçantes lorsqu'elles passent à travers des couches chaudes en altitude (> 0 °C), puis arrivent dans une couche de surface sous le point de congélation (surtout entre - 10 °C et environ 0 °C) [Cortinas et coll., 2004]. L'épaisseur de la glace varie en fonction d'autres variables, notamment de la vitesse du vent de surface et de la température de l'air en surface (Chaîné et Castonguay, 1974). Dans le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CHBDC), la charge de calcul de l'accumulation de glace est associée à la période de récurrence de 20 ans estimée à partir de la distribution de Gumbel ajustée à la série des épaisseurs de glace maximales annuelles.

La mesure et la simulation des précipitations verglaçantes sont difficiles à réaliser parce que ces précipitations sont souvent mêlées à d'autres types de précipitations (p. ex., pluie, neige et grésil) et ont lieu moins souvent que les précipitations de pluie et de neige en raison de la plage étroite des températures de l'air en surface et en altitude dont la formation dépend. Néanmoins, les variations dans la fréquence des précipitations verglaçantes pendant la dernière décennie par rapport à celles de la fin du XX^e siècle ont été évaluées pour l'Amérique du Nord par Groisman et coll. (2016) d'après des données des stations météorologiques. L'équipe de Groisman a constaté des diminutions dans la fréquence des précipitations verglaçantes dans le Sud-Est des États-Unis, mais des augmentations sur les parties nord de l'Amérique du Nord.

Quelques études ont porté sur la manière dont les précipitations verglaçantes peuvent évoluer dans le contexte des changements climatiques. D'après le modèle couplé canadien du climat mondial de troisième génération (CGCM3, un prédécesseur du CanESM2), Lambert et Hansen (2011) ont découvert un déplacement des futures précipitations verglaçantes vers le pôle à la fin du présent siècle en raison des augmentations futures des températures de surface et du déplacement corrélatif de l'isotherme de 0 °C vers le pôle. Cependant, ils ont constaté que la faible résolution du CGCM3 pourrait ne pas être suffisante pour projeter de façon précise les variations régionales dans les précipitations verglaçantes. Klima et Morgan (2015) ont étudié les répercussions des changements climatiques sur la fréquence des tempêtes de verglas dans le Sud Est du Canada et l'Est des États-Unis, d'après une expérience faisant appel à d'anciens profils verticaux de températures combinés à plusieurs scénarios de réchauffement des températures en altitude et en surface. Ils ont également trouvé un déplacement des futures précipitations verglaçantes vers le pôle accompagné d'une augmentation des épisodes de tempête de verglas, mais des diminutions globales pour le Sud des États Unis.

On a récemment utilisé les MRC, qui représentent généralement la topographie plus en détail que les MCM et, parfois, représentent également mieux les processus clés menant aux précipitations verglaçantes, pour étudier les épisodes passés de précipitations verglaçantes. Par exemple, Bresson et coll. (2017) ont révélé que le CRCM5 peut reproduire la climatologie de la pluie verglaçante et du grésil dans la région de Montréal ainsi que celle de l'épisode de pluie verglaçante qui a eu lieu dans la région en janvier 1998. St Pierre et coll. (2019) ont évalué le modèle en profondeur dans l'Est du Canada, constatant une performance généralement bonne, bien qu'ils aient trouvé que le biais dans la fréquence des épisodes de pluie verglaçante était lié à la résolution, avec une surestimation de la fréquence lorsque le modèle a été utilisé à une résolution spatiale de 0,11°, mais avec une sous estimation lorsqu'utilisé à une résolution spatiale plus petite de 0,44°. De plus, on a utilisé les MRC pour quantifier les variations projetées des caractéristiques des précipitations verglaçantes, comme la fréquence, l'intensité, les épisodes extrêmes et la répartition géographique. Plus particulièrement, à l'aide du CRCM5, Jeong et coll. (2018) ont constaté des augmentations générales dans la fréquence et les quantités mensuelles des futures précipitations verglaçantes au nord du futur isotherme de 0 °C de la température de surface moyenne mensuelle, mais des diminutions générales au sud de la future limite de congélation, ce qui concorde avec les études antérieures. Par conséquent, conformément aux résultats de Lambert et Hansen (2011), le placement de l'isotherme de 0 °C à différents niveaux de réchauffement climatique peut donner certaines indications sur la direction et l'ampleur des variations dans les précipitations verglaçantes. Néanmoins, le degré de confiance global demeure très faible, étant donné la complexité des processus impliqués et la rareté des travaux faisant appel à des modèles qui peuvent représenter explicitement ces processus.

Le nombre d'études ayant porté sur les variations projetées des charges d'accumulation de glace et les répercussions connexes sur les infrastructures est également très limité. Rezaei et coll. (2016) ont comparé les variations de la fiabilité des lignes de transport d'électricité aux variations des accumulations de glace atmosphérique, d'après une gamme de variations présumées dans la moyenne et l'écart-type des futures charges d'accumulation de glace. Ils ont constaté qu'ils avaient besoin de scénarios de changements climatiques à l'échelle locale et régionale pour réaliser une analyse des risques exhaustive. Jeong et coll. (2018) ont quantifié les variations des charges de calcul de l'accumulation de glace pour les lignes de transport aériennes pour deux périodes futures (c.-à-d., de 2041 à 2070 et de 2071 à 2100) par rapport à la période s'échelonnant de 1976 à 2005 dans l'ensemble du Canada, à l'aide de simulations du modèle CRCM5 fondé sur deux MCM (c.-à-d., CanESM2 et le modèle du système terrestre de l'Institut Max Planck) pour les scénarios RCP4.5 et 8.5. Ils ont trouvé d'importantes augmentations dans les charges de calcul de l'accumulation de glace pour l'Est du Canada, des augmentations dispersées dans le centre sud et l'Ouest du Canada et quelques diminutions sur la côte est et dans la région des Grands Lacs pour les périodes à venir.

Si on prévoit un déplacement des températures inférieures au point de congélation vers le pôle pendant le réchauffement climatique, la complexité des processus physiques menant à de la pluie verglaçante locale et à une accumulation de glace, la résolution spatiale et verticale limitée des

modèles climatiques, l'absence de modélisation directe des précipitations verglaçantes dans les modèles et le manque de documentation portant sur les variations au Canada donnent lieu à un degré de confiance *très faible* dans les futures projections de l'accumulation de glace.

6.2.2 Recherche ciblée

Étant donné qu'il existe peu de projections régionales des changements climatiques pour les précipitations verglaçantes et l'accumulation de glace associée, une étude en profondeur fondée sur les simulations réalisées à l'aide du CanRCM4 LE a été effectuée dans le cadre du présent projet. Pour obtenir toutes les précisions, y compris une évaluation exhaustive de la capacité du CanRCM4 à reproduire les anciennes données de précipitations verglaçantes et d'accumulation de glace, voir le lien à l'annexe 2.7 (Jeong et coll., 2019). Les méthodes et les résultats de la principale projection dans le futur sont présentés ci-dessous.

Les précipitations verglaçantes sont calculées de façon autonome à l'aide de l'algorithme de Bourgouin (Bourgouin, 2000), car elles ne sont pas incluses dans le modèle CanRCM4. L'algorithme de Bourgouin a été employé de façon opérationnelle dans les modèles de prévision météorologique numérique du Canada. Les quantités de précipitations verglaçantes pour des périodes de trois heures sont calculées de façon autonome au moyen du CanRCM4 LE et à l'aide des températures de surface, des températures à 500, à 850 et à 1000 hPa, de la pression de l'air en surface et des précipitations pour la période de 1986 à 2100. L'algorithme de Bourgouin distingue quatre types de précipitations (c.-à-d., neige, grésil, précipitations verglaçantes et pluie) et présente des taux pour chaque type. Les précipitations verglaçantes se produisent lorsque les précipitations passent à travers des couches chaudes (> 0 °C) en altitude, puis arrivent à une couche, près de la surface, qui est sous le point de congélation. Jeong et coll. (2019) ont rapporté que le modèle CanRCM4 LE, utilisé avec l'algorithme de Bourgouin, reproduit les précipitations verglaçantes extrêmes plutôt bien par comparaison avec les observations sur les sites et les données de la réanalyse régionale de l'Amérique du Nord (North American Regional Reanalysis) (Mesinger et coll., 2006), et que les précipitations verglaçantes extrêmes sont un déterminant clé de l'épaisseur de glace extrême. Les accumulations de glace par période de trois heures sont calculées à l'aide de l'approche de Chaîné (Chaîné et Skeates, 1974), qui est le schéma opérationnel utilisé par ECCC. Les charges de calcul de la glace de la période de récurrence de 20 ans sont estimées à partir de la distribution de Gumbel ajustée aux données de l'accumulation de glace maximale annuelle.

Le modèle CanRCM4 LE projette des diminutions dans les données de calcul de l'accumulation de glace future (période de récurrence de 20 ans) sur la majeure partie des États Unis et sur certaines régions de la côte est du Canada (figure 6.4). L'étendue spatiale et l'ampleur relative des diminutions augmentent généralement avec le réchauffement climatique. Néanmoins, le modèle CanRCM4 LE projette des augmentations globales dans les charges de calcul de l'accumulation de glace future sur la majeure partie du Canada, à l'exception de certaines régions côtières de l'Atlantique et de la baie d'Hudson. Cependant, la variabilité interne rend ces projections des changements très incertaines, comme l'illustrent le tableau 6.2 et la figure 6.5. Comme complément, les variations projetées de la moyenne et du coefficient de variation sont présentées aux tableaux S6.1 et S6.2, respectivement. L'incertitude du modèle, qui n'est pas quantifiée, pourrait également être très élevée.

Comme les variations dans l'épaisseur de glace extrême future sont largement déterminées par les variations dans les précipitations verglaçantes extrêmes (Jeong et coll., 2019), les variations des précipitations verglaçantes extrêmes projetées dans le profil spatial du CanRCM4 LE (annexe 2.7) sont semblables à celles des charges de calcul de l'accumulation de glace (figure 6.4). Les profils spatiaux des variations projetées des précipitations verglaçantes extrêmes et de la charge de calcul de la glace concordent généralement avec les résultats fondés sur une autre simulation du modèle CRCM5 canadien sur l'ensemble du Canada (Jeong et coll., 2018).

Les simulations par le CanRCM4 LE des précipitations verglaçantes et de l'accumulation de glace présentent une grande variabilité interne (voir le tableau 6.2 et la figure 6.5). L'apparition du signal

forcé provenant du bruit de la variabilité interne survient uniquement dans certaines régions à des degrés de réchauffement climatique mondial élevés. Les incertitudes autres que celles dues à la variabilité interne ne sont pas présentées dans le tableau 6.2 et la figure 6.5. Elles comprennent le choix du MRC et sont fondées sur le MCM et le choix des méthodes pour calculer les précipitations verglaçantes et l'accumulation de glace. L'incertitude du modèle, qui touche à la fois les MRC et les MCM sur lesquels ils sont fondés, découle probablement de plusieurs facteurs, notamment des biais de température et de précipitations dans les modèles, des limites dans la représentation des processus produisant les précipitations, des différences entre la topographie du modèle et la topographie réelle, et du fait que les processus de formation de la pluie verglaçante et d'accrétion ne sont pas représentés de manière explicite.

Les variations projetées des charges de calcul de l'accumulation de glace par le CanRCM4 LE découlent principalement des variations du profil vertical de la température (Jeong et coll., 2019), qui influe directement sur la détermination de la fréquence des précipitations verglaçantes. Les précipitations verglaçantes se forment généralement lorsque les températures de l'air en altitude, qui sont suffisamment élevées pour causer la fonte (p. ex., température à 850 hPa = $T_{850} > 3$ °C), coïncident avec les températures inférieures au point de congélation de l'air en surface (T_s) qui causent le gel (p. ex., -10 °C < T_s < 0 °C). Le réchauffement à la fois en altitude et en surface (figure 6.6) mène à une diminution de la fréquence future des conditions de température favorables à la formation de pluie verglaçante aux États Unis et dans les régions côtières de l'Ouest et de l'Est du Canada au niveau du réchauffement climatique mondial de + 2 °C, mais à une augmentation globale de la fréquence de telles conditions dans la plupart des autres régions du Canada.

Afin d'offrir un aperçu initial des effets de l'incertitude du modèle, on a comparé les variations des conditions qui favorisent les précipitations verglaçantes projetées par le modèle CanRCM4 LE avec celles projetées par neuf MCM de CMIP5 (figure 6.6) et on a constaté que l'incertitude était généralement constante. Les MCM, cependant, affichent quelques différences régionales, surtout sans les régions de la côte du Nord Ouest, du Nord Est et du centre du Canada. Six MCM projettent des diminutions de la fréquence des températures de surface entre -10 °C et environ 0 °C et une fréquence associée de conditions propices aux épisodes de précipitations verglaçantes dans quelques régions du Nord-Ouest ou du Nord-Est du Canada. Par conséquent, les réponses régionales diffèrent probablement d'un modèle à l'autre au même niveau de réchauffement climatique mondial, illustrant la présence de l'incertitude des modèles. L'interprétation est davantage compliquée par le grand rôle de la variabilité interne de l'incertitude des projections indiquée ci-dessus, comme on peut le constater en comparant les résultats de chaque simulation réalisée avec le même modèle. De plus, les interprétations sont compliquées par le fait que les biais de température des modèles influant sur les températures de l'air en surface et en altitude toucheront la fréquence, l'intensité et la distribution spatiale des précipitations verglaçantes du climat actuel de manière différente dans chaque modèle et, donc, les variations qui sont projetées pendant le réchauffement. Comme la production des précipitations verglaçantes implique des changements dans la phase eau qui se produisent à une température fixe, il est peu probable que des facteurs simples de la mise à l'échelle de la température, qui semblent bien fonctionner pour les précipitations en général, soient presque aussi utiles dans le cas des précipitations verglaçantes.

6.2.3 Interprétation

La charge d'accumulation de glace est une variable de niveau 3. Les variations projetées aux localités situées près de celles indiquées au tableau C-2 sont fournies à l'annexe 1.2. Les valeurs sont fondées sur des projections du modèle CanRCM4 LE. Les profils spatiaux des variations projetées des précipitations verglaçantes et des charges d'accumulation de glace du modèle CanRCM4 LE concordent généralement avec ceux projetés par un modèle régional différent (CRCM5), tous deux fondés sur le même MCM et un MCM différent pour le Canada (Jeong et coll., 2018). Cette constance donne un certain degré de confiance qu'il est raisonnable de prévoir des augmentations dans les charges de calcul de l'accumulation de glace dans le futur sur la majeure partie du Canada.

Cependant, le CanRCM4 LE illustre que les projections sont soumises à une variabilité interne élevée, les variations forcées présentant des rapports signal/bruit internes faibles jusqu'à ce que le réchauffement climatique mondial dépasse +2 °C. Les valeurs du rapport signal/bruit sont près de 1 à tous les niveaux du réchauffement climatique mondial. Comme indiqué ci-dessus, les projections sont également presque certainement touchées par les incertitudes des modèles et les incertitudes algorithmiques qui ne sont toujours pas quantifiées. Il existe un degré de confiance *moyen* que les charges d'accumulation de glace augmenteront sur la majeure partie du Canada à mesure que le climat continue de se réchauffer, mais le degré de confiance est *très faible* relativement aux projections des variations de charges d'accumulation de glace du modèle CanRCM4, y compris les détails des variations spatiales des variations des charges projetées.

Il n'est pas possible d'évaluer les projections de variations de charges propres à la localité et au degré de réchauffement climatique fournies à l'annexe 1.2. Néanmoins, étant donné l'incidence potentielle d'une défaillance structurale désastreuse due à des charges de glace excessives, une approche prudente qui tient compte des augmentations de charges projetées dans ces localités où les augmentations sont projetées et qui fait appel aux charges établies à partir de données d'un passé récent dans toutes les autres localités semblerait justifiée.

6.3 Pergélisol

6.3.1 Évaluation

Le pergélisol désigne souvent une matière sous la surface dont la température est invariablement inférieure à 0 °C pendant deux années ou plus. Les fondations solides des bâtiments et des infrastructures construits dans les régions touchées par le pergélisol sont dues au pergélisol près de la surface (Zhou et coll., 2008). À l'heure actuelle, le pergélisol est répandu dans l'ensemble des régions des latitudes élevées, qui couvrent environ la moitié du Canada (Heginbottom, 1995) et 80 % de l'Alaska (Jorgenson et coll., 2008). Dans le Nord de l'Amérique du Nord, le pergélisol continu est présent presque partout dans la région située au nord de la limite forestière boréale, tandis que le pergélisol discontinu se trouve généralement au sud de la limite forestière (Brown et coll., 1998; voir également la figure 6.7).

L'ASC (2014) fournit les limites sud approximatives des zones de pergélisol continu et discontinu (y compris les îlots sporadiques et isolés). Les zones de pergélisol déterminées par l'ASC (2014) ont été établies d'après les données obtenues de Brown (1968) et de dix différentes cartes de référence de 1968 à 1988 (Heginbottom, 1995). Par conséquent, ces cartes ne représentent pas la détérioration récente de la région marginale du pergélisol dans le Nord de l'Amérique du Nord (p. ex., Jorgenson et coll., 2008; Thibault et Payette, 2009). Il est notoire que le pergélisol est très sensible au réchauffement (Wei et coll., 2009; Paquin et Sushama, 2015). La détérioration du pergélisol a été observée dans le Nord de l'Amérique du Nord (Jorgenson et coll., 2006; Fortier et coll., 2007; Thibault et Payette, 2009).

On peut utiliser différentes approches pour évaluer l'incidence possible du réchauffement climatique mondial continu sur le pergélisol. Une approche souvent utilisée est associée aux variations projetées des températures du sol simulées par des MCM de l'atmosphère, de l'océan, du continent et de la glace de mer intégralement couplés (Sazonova et Romanovsky, 2003; Zhang et coll., 2008; Koven et coll., 2013; Slater et Lawrence, 2013). Ces études indiquent qu'il existe un degré de confiance *élevé* que le réchauffement climatique mondial futur entraînera un dégel important du pergélisol dans les régions étudiées. L'ampleur de la variation projetée est, toutefois, bien moins certaine, car il existe une grande variation dans l'étendue présente et le rétrécissement futur projeté du pergélisol situé sous la surface, quantifié directement à partir des températures du sol dans les MCM. Cela est dû au fait que les résultats varient fortement en fonction de la capacité des MCM à représenter les régimes climatiques près de la surface et les régimes thermiques du sol dans les climats froids (Koven et coll.,

2013). Les MRC présentent un certain potentiel pour réduire les biais dans les températures du sol dans les simulations des MCM en améliorant la résolution spatiale et la représentation des processus physiques, mais la concrétisation de ce potentiel nécessiterait des informations bien plus détaillées que celles utilisées actuellement dans de tels modèles pour décrire les variations spatiales dans les propriétés du sol et des terres en surface (Paquin et Sushama, 2015).

Une autre approche consiste à employer les indices indirects de la présence de pergélisol près de la surface qui sont calculés à partir de variables du climat de surface comme la température de surface et l'épaisseur de la couche de neige. L'indice de gel de surface (IGS) est une méthode indirecte qui a été utilisée avec succès pour évaluer la durabilité du pergélisol près de la surface dans des scénarios de changements climatiques (Anisimov et Nelson, 1996; Slater et Lawrence, 2013; Guo et Wang, 2016). Cet indice est calculé à partir d'une estimation du cycle annuel des températures de surface et de l'épaisseur mensuelle de la couche de neige, qui est nécessaire pour tenir compte de l'effet isolant de la neige étendue à la surface du sol. L'IGS donne des valeurs sans dimension entre zéro et un qui peuvent être utilisées pour classer le pergélisol comme pergélisol isolé, sporadique, discontinu (étendu) ou continu d'après les seuils suggérés par Anisimov et Nelson (1996). En utilisant une telle approche, Slater et Lawrence (2013) ont estimé qu'il y aurait une détérioration future de 1,67 ± 0,7 × 106 km² de l'étendue du pergélisol près de la surface par 1 °C d'augmentation des températures mondiales d'après 19 MCM de CMIP5 selon le scénario RCP 8.5. Cela concorde avec le rapport du GIEC (2013), qui a indiqué que la région de pergélisol près de la surface (p. ex., à moins de trois mètres de la surface) pourrait être réduite de 37 à 81 % d'ici la fin du XXIº siècle, selon les scénarios d'émissions et les augmentations associées de la température de l'air en surface.

D'après le RCCC (Bush et Lemmen, 2019), les observations révèlent des augmentations de la température du pergélisol (p. ex., d'environ 0,1 °C par décennie dans la partie centrale de la vallée du Mackenzie et de 0,3 à 0,5 °C par décennie dans l'Extrême-Arctique [Alert] au cours des trois ou quatre dernières décennies) et de l'épaisseur de la couche active (environ 10 % depuis 2000 dans la vallée du Mackenzie) [degré de confiance élevé] ainsi que la formation répandue de topographie de thermokarst dans l'ensemble du Nord du Canada (degré de confiance moyen). Les augmentations projetées de la température moyenne de l'air au-dessus du continent de pergélisol, dans tous les scénarios d'émissions, entraîneront quasi certainement un réchauffement et un dégel continus du pergélisol sur de grandes superficies d'ici le milieu du présent siècle, avec des répercussions sur l'infrastructure du Nord et le rôle des écosystèmes terrestres nordiques dans le cycle du carbone.

6.3.2 Recherche ciblée

Étant donné le degré d'incertitude de la simulation directe de l'étendue du pergélisol dans les modèles climatiques, et l'inaccessibilité des données archivées sur les températures du sol provenant du CanRCM4 LE, on a utilisé l'approche simple de l'IGS pour produire des projections de l'étendue future du pergélisol à l'aide du CanRCM4. Par comparaison avec les observations de l'International Permafrost Association (IPA) [figure 6.7], le CanRCM4 LE donne une étendue plus petite du pergélisol près de la surface pour une période comparable (c.-à-d. comparer la figure 6.7a avec les figures 6.7b et 6.7c) lorsqu'on utilise l'approche de l'IGS, indiquant que des biais considérables sont présents par rapport à l'IPA, même au début de la période représentée par la carte de l'IPA.

D'après l'approche de l'IGS, le CanRCM4 LE projette des diminutions considérables de l'étendue future du pergélisol près de la surface dans le Nord de l'Amérique du Nord (figure 6.8). La réduction fractionnaire de la zone de pergélisol concernée peut être plus robuste que la représentation de l'étendue de référence (en gris, dans la figure), ou les précisions spatiales concernant les transitions entre les différents types de pergélisol. La détérioration future du pergélisol varie fortement en fonction des augmentations de la température moyenne mondiale et des augmentations connexes de la température de surface régionale. Le CanRCM4 LE projette que la zone future de pergélisol près de la surface au Canada (y compris toutes les régions continues et discontinues) diminuera d'environ 16 % par 1 °C d'augmentation de la température du globe (figure 6.9). Ces résultats sont comparables aux résultats de Guo et Wang (2016), qui ont trouvé une détérioration du pergélisol

de $45\% \pm 10\%$ et de $68\% \pm 13\%$ par l'ensemble de modèles CMIP5 avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, respectivement, au Canada, pour la période s'échelonnant de 2080 à 2099 par rapport à la période de 1986 à 2005. Par conséquent, il existe un degré de confiance très élevé dans la réduction future des zones de pergélisol près de la surface au Canada. Néanmoins, le degré de confiance est très faible dans l'ampleur de la réduction des variations projetées par le CanRCM4 LE et dans les endroits et les années où les transitions entre les zones de pergélisol continu, discontinu et les îlots sporadiques et isolés auront lieu. La principale raison de ce faible degré de confiance est l'incertitude de la simulation de la répartition de référence du pergélisol au Canada, laquelle est affectée par les biais des modèles et les limitations de l'approche de l'IGS qui ne tient compte que des données sur le climat de surface pour déterminer l'état du pergélisol près de la surface.

Les variations relatives projetées de l'étendue du pergélisol près de la surface, fondées sur le modèle CRCM5 forcé avec le même MCM, mais avec des scénarios d'émissions différents (RCP4.5 et RCP8.5), sont similaires et semblables aux variations projetées par le CanRCM4 LE au même niveau de réchauffement climatique mondial (figure 6.9). L'effet de la variabilité interne sur les variations relatives de la zone de pergélisol concernée dans le CanRCM4 est faible (figure 6.9), comme on s'y attendrait pour un indice résumant les variations dominées par la température dans une vaste zone.

6.3.3 Interprétation

Le pergélisol est une variable de niveau 3. Étant donné les liens entre les réductions de l'étendue du pergélisol près de la surface et les tendances au réchauffement climatique de la surface à long terme, qui sont bien compris, le degré de confiance est *très élevé* dans la réduction continue de l'étendue du pergélisol près de la surface dans le futur dans le Nord du Canada à des niveaux de réchauffement climatique mondial supérieurs au niveau de référence (figures 6.8 et 6.9). Les projections des variations relatives de la superficie dont le pergélisol est touché de deux MRC, soit le CanRCM4 LE et le CRCM5, concordent et sont cohérents avec les résultats de précédentes études reposant sur des projections de MCM.

Il existe cependant une incertitude considérable sur la répartition actuelle du pergélisol tant dans les observations de l'IPA que dans les simulations des modèles climatiques, laquelle influe sur les projections de l'endroit, du type et de l'étendue réelle de la zone de pergélisol près de la surface future. De plus, l'approche indirecte de l'IGS ne permet que de faire une approximation de la durabilité du pergélisol près de la surface, et peut donner des résultats assez différents de ceux fondés sur la simulation directe des températures du sol par des modèles climatiques. En outre, comme cette approche doit faire appel à des seuils de température et à des accumulations de neige absolus, elle est sensible aux biais des modèles. Aucune, sinon très peu d'études visant à déterminer les incidences de ces biais sur la déduction de l'endroit du pergélisol, de son type et de son étendue n'ont été réalisées jusqu'ici. Le degré de confiance est donc *très faible* dans les endroits et les étendues aréales futurs des différentes zones de pergélisol.

Tableau 6.1. Variations projetées par le CanRCM4 LE des charges de calcul de la neige pour les localités situées près de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +1,0 °C, +2,0 °C et +3,0 °C pour la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25 $^{\circ}$ centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Changements dans les charges neigeuses 1/50 [%]	Niveaux de réchauffement climatique mondial						
Région	+1 °C +2 °C +3 °C						
Colombie-Britannique	-22.0 (-35.4, -8.7)	-39.2 (-55.2, -24.9)	-55.8 (-68.9, -45.2)				
Prairies	-1.6 (-10.4, 8.1)	-5.5 (-16.6, 5.6)	-12.6 (-21.4, -2.5)				
Ontario	-18.3 (-27.2, -7.1)	-31.6 (-42.1, -21.4)	-41.9 (-52.1, -34.1)				
Québec	-13.7 (-22.9, -4.4)	-27.6 (-35.3, -18.8)	-40.4 (-49.2, -34.9)				
Atlantique	-25.2 (-34.1, -14.8)	-43.0 (-52.3, -35.8)	-61.7 (-68.0, -57.0)				
Nord	4.0 (-1.9, 9.6)	5.4 (-0.4, 11.9)	5.4 (0.2, 12.5)				
Canada	-14.8 (-23.0, -4.6)	-28.1 (-36.7, -18.8)	-40.7 (-49.8, -32.5)				

Tableau 6.2. Variations projetées par le CanRCM4 LE dans le calcul de l'épaisseur de glace pour les localités indiquées au tableau C-2 et situés dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +1 °C, +2 °C et +3 °C pour la période de référence 1986-2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation d'épaisseur de la couche de glace 1/20 [%]	Niveaux de réchauffement climatique mondial								
Région	+1 °C	+1 °C +2 °C +3 °C							
Colombie-Britannique	3.5 (-11.3, 19.5)	3.1 (-14.1, 23.4)	0.3 (-13.0, 14.8)						
Prairies	15.2 (-6.9, 40.0)	27.6 (2.0, 58.9)	38.1 (6.8, 73.2)						
Ontario	1.1 (-13.3, 17.5)	0.3 (-16.7, 17.1)	-9.6 (-24.5, 9.2)						
Québec	5.0 (-8.7, 20.7)	9.3 (-4.6, 29.0)	6.6 (-10.6, 27.8)						
Atlantique	-4.4 (-20.5, 15.9)	-22.8 (-36.5, -1.0)	-39.5 (-52.0, -26.4)						
Nord	10.4 (-9.2, 47.9)	21.0 (0.2, 59.3)	33.0 (5.2, 79.0)						
Canada	3.4 (-11.5, 20.1)	4.9 (-11.6, 23.6)	2.0 (-14.9, 20.7)						

Figure 6.1. Variations projetées par le CanRCM4 LE (en pourcentage) des charges de calcul de la neige (période de récurrence de 50 ans; charges de neige) pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +1 °C (figure du haut), de +2 °C (figure du centre) et de +3 °C (figure du bas) pour la période de référence 1986 2016.

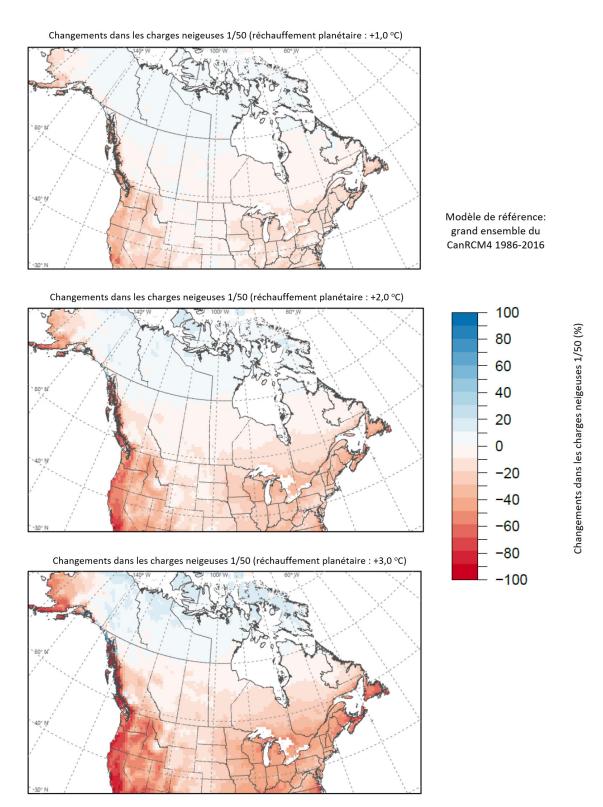


Figure 6.2. Variations projetées des charges de calcul de la neige pour les localités situées près de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction de la variation de la température moyenne mondiale pour la période de référence de 1986 à 2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des régions ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et)

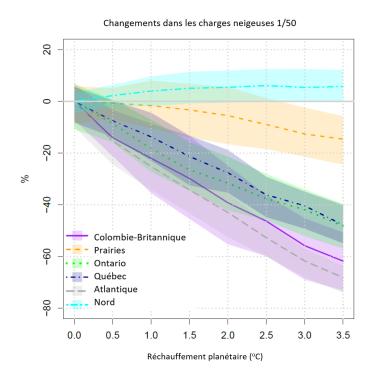


Figure 6.3. Variations projetées de la charge de calcul de la pluie pour les localités situées près de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction de la variation de température moyenne mondiale pour la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des zones ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir du CanRCM4 LE.

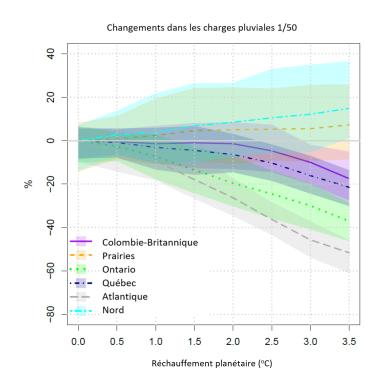


Figure 6.4. Variations projetées par le CanRCM4 LE (en pourcentage) de l'épaisseur de calcul de la glace (période de récurrence de 20 ans) pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +1,0 °C (figure du haut), de +2,0 °C (figure du milieu) et de +3,0 °C (figure du bas) pour la période de référence 1986-2016.

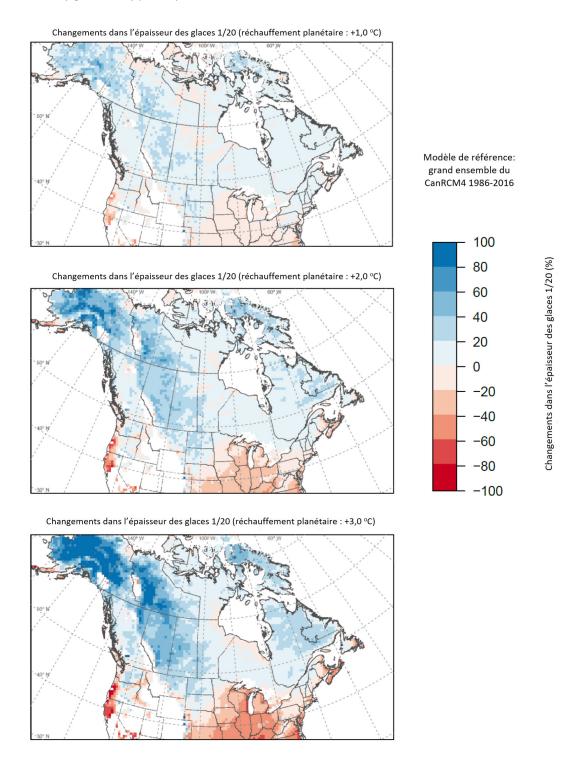


Figure 6.5. Variations projetées par le CanRCM4 LE de l'épaisseur de calcul de la glace pour les localités situées près de celles indiquées au tableau C-2 dans six régions canadiennes en fonction de la variation de la température moyenne mondiale pour la période de référence 1986-2016. Les lignes et les valeurs minimale et maximale des zones ombrées représentent la projection d'ensemble et les 25° et 75° centiles, respectivement, calculés à partir du CanRCM4 LE.

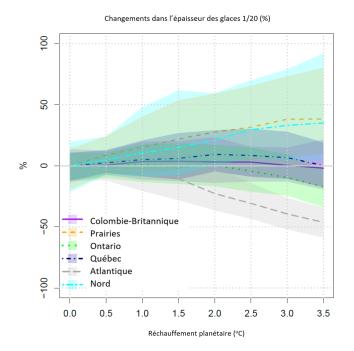


Figure 6.6. Variations des fréquences de a) la température de surface (Ts) [c.-à-d., -10 °C < Ts < 0 °C] et b) de la Ts et de la température à 850 hPa (T_{850}) combinées (c.-à-d., T_{850} > 3 °C et Ts < 0 °C) qui sont propices aux épisodes de précipitations verglaçantes, projetées par le CanRCM4 LE et six MCM à leur niveau de réchauffement climatique mondial de +2 °C par rapport à la période de référence 1986 2016, respectivement. Les six MCM comprennent une simulation de chacun des modèles suivants : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model avec l'élément Generalized Ocean Layer Dynamics ESM2G (GFDL-ESM2G), GFDL ESM avec l'élément Modular Ocean Model, ESM2M (GFDL ESM2M), le modèle E du Goddard Institute for Space Studies, couplé avec le modèle océan de Russell (GISS-E2-R), le modèle couplé version 5 à résolution moyenne de l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL-CM5-MR), le modèle norvégien de système terrestre (Norwegian Earth System Model), version 1, à résolution intermédiaire (NorESM1-M), et IPSL-CM5 à résolution *faible* (IPSL-CM5-LR) dont quatre simulations sont illustrées (r1 à r4). SOURCE DE LA FIGURE : Jeong et coll. (2019; annexe 2.7)

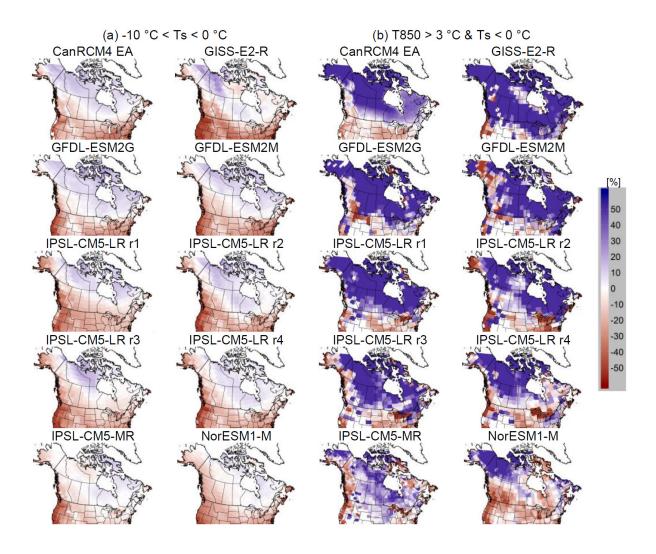
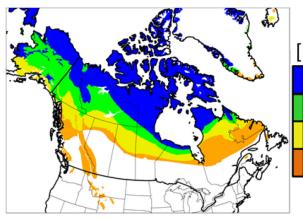


Figure 6.7. a) Carte de l'étendue du pergélisol près de la surface de l'International Permafrost Association (IPA) d'après des observations du Nord de l'Amérique du Nord (Brown et coll., 1998). Les données sont sous forme de grille (c.-à-d. grille terrestre évolutive à projection équivalente) à une résolution horizontale de 12,5 km. Le pergélisol est divisé en quatre catégories fondées sur l'étendue aréale du pergélisol près de la surface de chaque maille de la grille : 90 à 100 % de la couverture sont considérés comme du pergélisol de surface, 50 à 90 % comme du pergélisol discontinu (étendu), 10 à 50 % comme du pergélisol sporadique et moins de 10 % comme du pergélisol isolé. À des fins de comparaison, l'étendue du pergélisol près de la surface, projetée par le CanRCM4 LE et fondée sur l'approche de l'indice de gel de surface (IGS), est présentée pour les années b) 1968 et c) 1998.

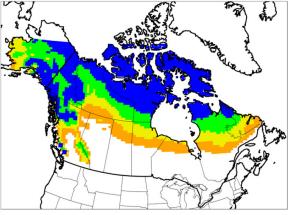
(a) Pergélisol (IPA)



[Étendue du pergélisol]
Continu (90-100 %)
Discontinu (50-90 %)
Sporadique (10-50 %)
Parcelles isolées (0-10 %)

(b) Grand ensemble du CanRCM4 (année 1968)





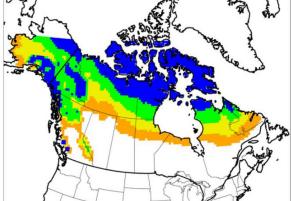


Figure 6.8. Variations projetées par le CanRCM4 de l'étendue du pergélisol près de la surface, fondées sur l'approche de l'indice de gel de surface (IGS) pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +1 °C (figure du haut), de +2 °C (figure du centre) et de +3 °C (figure du bas) pour la période de référence 1986 2016. L'étendue du pergélisol près de la surface de la période de référence est illustrée en gris.

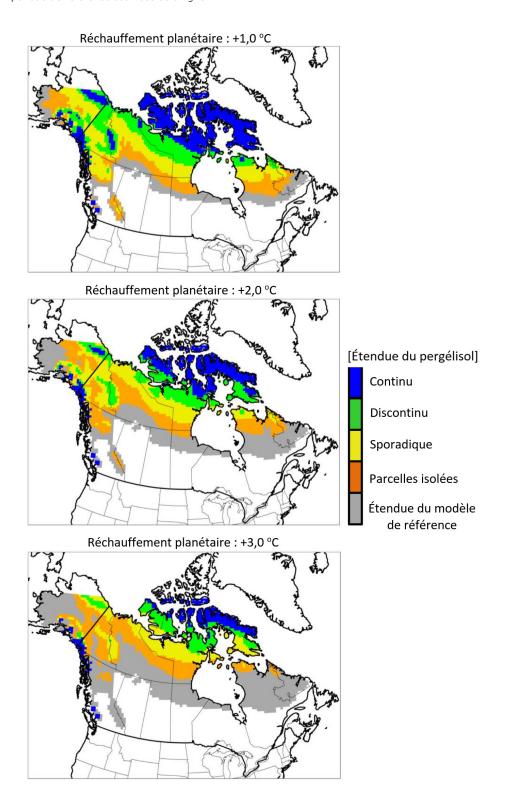


Figure 6.9. Variations projetées de la zone de pergélisol près de la surface (en pourcentage) dans le Nord du Canada (c.-à-d. au nord de 50° N), par le CanRCM4 LE et par le CRCM5, à l'aide de l'approche de l'IGS. Les variations projetées sont présentées pour des fenêtres mobiles de 31 ans associées à différents niveaux de réchauffement climatique mondial pour la période de référence 1986 2016 et les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. La ligne et les valeurs minimale et maximale de la zone ombrée du CanRCM4 LE représentent la valeur médiane de l'ensemble ainsi que les valeurs aux 25° et 75° centiles, respectivement, des 50 membres de l'ensemble.

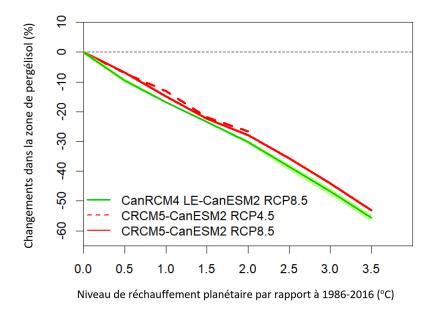


Tableau S6.1. Variations projetées de la moyenne des variables charge de neige (SL) [tableau du haut], charge de pluie (SLr) [tableau du milieu] et épaisseur de la couche de glace (tableau du bas) des localités situées près de celles indiquées dans le tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +0,5 °C à +3,5 °C de la période de référence 1986 2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation d	e la moyenne	de la charge	de neige [%]	Niveau	x de réchauff	ement climat	ique mondial
Région	+0.5 °C	+1 °C	+1.5 °C	+2 °C	+2.5 °C	+3 °C	+3.5 °C
Colombie- Britannique	-20.2 (-25.1, -12.2)	-34.3 (-41.4, -25.1)	-46.3 (-54.9, -37.7)	-56.9 (-62.8, -47.9)	-64.8 (-71.4, -58.1)	-71.7 (-77.8, -66.2)	-77.0 (-81.2, -71.0)
Prairies	-2.2 (-6.6, 2.5)	-3.8 (-10.1, 2.2)	-7.3 (-14.4, -1.1)	-11.7 (-18.3, -5.1)	-16.4 (-22.4, -10.5)	-21.4 (-26.8, -15.1)	-26.4 (-32.4, -20.5)
Ontario	-12.4 (-17.9, -6.4)	-22.4 (-28.8, -15.1)	-33.5 (-39.6, -26.1)	-41.4 (-47.0, -34.0)	-49.9 (-54.9, -43.8)	-56.5 (-61.8, -50.7)	-63.1 (-67.9, -58.5)
Québec	-11.9 (-17.8, -6.3)	-21.0 (-28.1, -12.8)	-31.3 (-35.8, -23.6)	-38.5 (-44.0, -30.8)	-47.0 (-52.9, -41.7)	-53.1 (-58.8, -48.0)	-60.2 (-63.4, -56.3)
Atlantique	-20.1 (-25.8, -14.6)	-34.0 (-40.2, -27.7)	-46.8 (-51.9, -40.1)	-58.0 (-62.2, -53.3)	-67.6 (-70.8, -63.9)	-75.2 (-78.0, -71.8)	-80.8 (-84.0, -78.0)
Nord	1.7 (-0.3, 4.1)	2.5 (-0.4, 5.7)	3.2 (0.0, 6.2)	3.4 (0.3, 6.6)	3.1 (-0.2, 7.6)	3.2 (-0.2, 7.0)	1.4 (-1.7, 4.6)
Canada	-11.7 (-17.2, -5.6)	-21.3 (-27.3, -13.6)	-31.8 (-37.1, -25.0)	-40.0 (-44.7, -33.0)	-48.5 (-53.3, -42.4)	-55.0 (-60.2, -49.2)	-61.3 (-65.6, -56.6)
Variation d	e la moyenne	de la charge	de pluie [%]	Niveau	x de réchauff	ement climat	ique mondial
Région	+0.5 °C	+1 °C	+1.5 °C	+2 °C	+2.5 °C	+3 °C	+3.5 °C
Colombie- Britannique	0.5 (-3.0, 3.8)	-1.6 (-4.9, 2.3)	-5.9 (-10.8, -1.8)	-13.6 (-18.1, -7.9)	-24.3 (-28.6, -20.1)	-35.2 (-38.3, -32.6)	-46.6 (-50.3, -43.4)
Prairies	4.0 (-3.6, 11.3)	8.0 (-2.4, 18.9)	11.7 (1.2, 24.1)	14.9 (3.0, 27.4)	18.1 (7.2, 30.4)	19.4 (8.1, 32.1)	21.4 (9.2, 33.5)
Ontario	-6.3 (-11.0, -1.0)	-13.3 (-20.0, -5.6)	-22.1 (-29.5, -15.7)	-31.3 (-36.5, -25.3)	-39.4 (-45.3, -33.6)	-46.5 (-51.1, -40.8)	-53.3 (-57.3, -49.0)
Québec	-2.3 (-7.2, 1.1)	-7.3 (-12.7, -0.8)	-13.5 (-18.9, -6.2)	-20.1 (-26.2, -13.6)	-26.8 (-31.9, -21.2)	-33.8 (-38.0, -28.9)	-41.0 (-45.3, -35.8)
Atlantique	-12.9 (-16.6, -7.2)	-23.1 (-29.2, -16.8)	-34.2 (-41.2, -28.1)	-46.1 (-52.1, -40.4)	-57.8 (-61.7, -53.5)	-66.7 (-71.1, -62.1)	-73.5 (-77.2, -70.1)
Nord	3.2 (-4.6, 10.9)	6.3 (-3.6, 16.2)	8.4 (-1.8, 21.7)	13.2 (1.6, 24.3)	17.0 (5.2, 29.5)	20.4 (9.7, 33.7)	25.5 (14.3, 37.2)
Canada	-2.7 (-7.5, 1.2)	-7.3 (-12.9, -0.8)	-13.6 (-18.9, -6.9)	-20.7 (-26.3, -15.4)	-28.4 (-33.2, -22.9)	-35.8 (-40.4, -30.6)	-42.8 (-47.5, -38.6)
Variation de	la moyenne d	épaisseur de l	la couche de g	lace [%] Nive	aux de réchau	iffement clima	tique mondial
Région	+0.5 °C	+1 °C	+1.5 °C	+2 °C	+2.5 °C	+3 °C	+3.5 °C
Colombie- Britannique	2.0 (-7.9, 20.7)	1.0 (-12.6, 32.4)	2.1 (-13.6, 34.0)	-1.0 (-12.7, 25.5)	-6.3 (-17.4, 16.0)	-11.3 (-28.3, 14.8)	-14.0 (-29.2, 14.1)
Prairies	13.6 (-4.8, 34.9)	25.5 (0.0, 57.7)	36.8 (9.8, 75.8)	43.8 (16.8, 88.7)	50.4 (24.6, 98.0)	59.6 (28.7, 105.9)	63.2 (28.7, 115.7)
Ontario	-2.1 (-14.5, 10.6)	-3.3 (-19.1, 14.4)	-7.8 (-24.0, 10.0)	-13.5 (-28.8, 5.1)	-21.8 (-36.6, -8.2)	-31.1 (-43.0, -17.7)	-40.8 (-53.6, -27.9)
Québec	2.5 (-7.7, 13.3)	1.8 (-10.6, 16.6)	0.8 (-14.7, 19.5)	-0.7 (-12.8, 16.3)	-4.0 (-18.3, 11.7)	-7.2 (-21.8, 10.1)	-16.3 (-30.1, -1.8)
Atlantique	-7.2 (-16.0, 4.8)	-13.8 (-25.6, 5.3)	-25.5 (-35.8, -7.5)	-37.5 (-46.8, -20.9)	-48.5 (-57.6, -37.3)	-57.5 (-65.7, -50.3)	-66.6 (-73.8, -59.0)
Nord	10.3 (-8.1, 35.0)	15.8 (-9.4, 67.5)	24.5 (-2.4, 88.5)	37.7 (2.6, 98.8)	56.0 (15.4, 123.0)	67.8 (15.9, 138.6)	86.4 (30.6, 165.6)
Canada	1.3 (-9.4, 13.5)	1.0 (-12.8, 17.5)	0.0 (-15.5, 17.5)	-1.9 (-18.7, 15.0)	-6.2 (-20.5, 11.7)	-11.3 (-26.4, 8.5)	-18.0 (-32.8, -1.8)

Tableau S6.2. Variations projetées de la moyenne des variables charge de neige (SL) [tableau du haut], charge de pluie (SLr) [tableau du milieu] et épaisseur de la couche de glace (tableau du bas) des localités situées près de celles indiquées dans le tableau C-2 dans six régions canadiennes et dans l'ensemble du Canada pour les niveaux de réchauffement climatique mondial de +0,5 °C à +3,5 °C de la période de référence 1986 2016. Les valeurs représentent la projection d'ensemble (25° centile, 75° centile) calculée à partir du CanRCM4 LE.

Variation d	le la charge de	e neige – CV I	1%1	Niveaux	de réchauffen	nent climatiqu	ue mondial
Région	+0.5 °C	+1 °C	+1.5 °C	+2 °C	+2.5 °C	+3 °C	+3.5 °C
Colombie- Britannique	6.3 (-4.3, 20.7)	13.6 (-2.8, 30.8)	23.4 (3.2, 38.6)	30.3 (13.9, 54.7)	45.8 (26.5, 72.6)	61.3 (47.0, 83.0)	84.4 (59.3, 119.5)
Prairies	2.2 (-5.9, 11.9)	4.5 (-7.0, 18.2)	7.7 (-4.7, 22.6)	11.3 (-3.2, 26.8)	14.6 (0.0, 31.0)	20.2 (5.7, 36.6)	27.3 (10.4, 44.0)
Ontario	6.0 (-3.0, 17.1)	8.3 (-4.2, 24.8)	15.5 (0.9, 34.2)	24.8 (11.0, 43.8)	35.9 (21.0, 57.4)	48.7 (30.1, 68.5)	59.4 (38.5, 81.1)
Québec	8.5 (0.3, 17.9)	12.9 (-0.5, 28.7)	21.5 (6.5, 35.9)	30.1 (16.2, 48.4)	37.9 (20.8, 53.6)	46.8 (30.3, 65.4)	53.0 (36.9, 69.7)
Atlantique	10.1 (-2.1, 22.1)	20.0 (4.8, 38.1)	35.0 (18.4, 58.4)	53.5 (31.0, 76.7)	69.2 (46.0, 93.5)	88.5 (59.5, 112.5)	111.2 (74.1, 135.5
Nord	1.4 (-6.8, 10.0)	3.0 (-8.9, 14.9)	3.2 (-8.5, 17.5)	4.9 (-7.1, 17.0)	5.5 (-5.2, 19.1)	7.6 (-3.5, 19.9)	10.8 (-1.8, 25.0)
Canada	6.3 (-3.2, 17.0)	9.4 (-3.4, 25.7)	17.1 (2.1, 34.4)	26.7 (11.9, 44.2)	35.6 (19.3, 55.2)	46.3 (26.5, 65.7)	54.1 (36.7, 76.7)
Variation d	e la charge de	e pluie – CV [%]	Niveaux	de réchauffen	nent climatiq	ue mondial
Région	+0.5 °C	+1 °C	+1.5 °C	+2 °C	+2.5 °C	+3 °C	+3.5 °C
Colombie- Britannique	2.3 (-6.5, 12.2)	4.5 (-10.5, 20.3)	16.3 (-2.3, 31.5)	31.3 (18.2, 51.1)	59.8 (42.8, 87.7)	81.1 (58.8, 109.8)	110.6 (78.1, 139.7
Prairies	-4.1 (-13.1, 5.7)	-7.7 (-19.8, 7.3)	-10.6 (-22.5, 5.1)	-13.6 (-25.2, 1.8)	-15.7 (-26.9, 0.0)	-17.8 (-29.5, -3.6)	-18.4 (-29.9, -4.9)
Ontario	5.6 (-3.5, 15.3)	10.1 (-4.6, 23.3)	17.4 (1.4, 32.7)	27.9 (13.2, 44.6)	40.4 (22.3, 58.1)	52.9 (31.0, 70.6)	63.0 (40.0, 84.6)
Québec	3.3 (-4.9, 11.6)	5.7 (-7.4, 17.6)	12.2 (-1.4, 24.1)	23.0 (9.0, 36.4)	34.8 (18.0, 49.7)	41.9 (25.5, 58.9)	53.8 (34.2, 72.8)
Atlantique	12.5 (1.8, 22.4)	26.4 (12.2, 41.8)	43.4 (26.6, 59.2)	61.8 (40.6, 82.0)	85.1 (55.5, 103.8)	103.4 (75.4, 125.8)	133.7 (94.9, 157.1
Nord	-0.6 (-9.9, 10.3)	-2.2 (-15.4, 12.2)	-3.7 (-17.3, 12.8)	-4.8 (-18.6, 9.1)	-6.3 (-20.2, 6.8)	-9.6 (-22.0, 4.8)	-11.7 (-24.1, 4.1)
Canada	3.1 (-5.6, 12.5)	5.8 (-8.0, 19.1)	12.2 (-2.3, 26.2)	21.5 (6.1, 39.5)	30.6 (13.4, 49.7)	41.3 (21.3, 61.2)	49.7 (31.7, 72.1)
Variation d	'épaisseur de	la couche de	glace - CV [%] Niveaux (le réchauffen	nent climatiqu	e mondial
Région	+0.5 °C	+1 °C	+1.5 °C	+2 °C	+2.5 °C	+3 °C	+3.5 °C
Colombie- Britannique	-2.4 (-11.4, 9.1)	-4.8 (-15.8, 12.9)	-0.7 (-16.4, 17.9)	1.1 (-11.2, 20.4)	6.5 (-8.0, 26.4)	11.2 (-2.0, 36.3)	20.8 (1.8, 46.8)
Prairies	-6.8 (-17.6, 4.2)	-11.6 (-25.6, 3.0)	-15.4 (-29.6, 0.2)	-17.7 (-32.0, -3.1)	-19.1 (-31.0, -5.2)	-20.6 (-33.4, -5.3)	-20.1 (-32.7, -6.1)
Ontario	3.3 (-5.7, 15.3)	8.2 (-4.7, 23.5)	14.2 (-0.3, 33.5)	26.5 (10.7, 44.9)	37.5 (17.9, 58.5)	52.7 (31.3, 78.6)	64.6 (48.5, 92.5)
Québec	-0.2 (-8.6, 11.0)	2.4 (-11.7, 16.6)	7.5 (-8.3, 20.7)	10.8 (-2.2, 26.2)	18.5 (3.1, 36.4)	25.2 (5.9, 45.4)	31.3 (11.5, 49.8)
Atlantique	5.7 (-4.0, 17.9)	12.6 (-3.5, 29.6)	26.0 (7.7, 45.8)	37.8 (21.7, 62.1)	51.4 (31.6, 85.0)	70.5 (50.1, 102.6)	94.8 (68.0, 132.9)
Nord	-3.7 (-16.1, 7.2)	-5.2 (-20.6, 9.1)	-10.6 (-27.5, 7.2)	-15.1 (-33.0, 4.5)	-22.1 (-39.5, -4.1)	-27.5 (-46.0, -10.8)	-34.0 (-48.5, -22.4
Canada	0.3 (-9.3, 11.7)	2.8 (-11.7, 18.0)	6.6 (-9.7, 23.0)	11.3 (-3.4, 27.1)	18.5 (2.7, 36.4)	24.5 (6.6, 45.4)	31.3 (11.0, 51.8)

7. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Dans le présent rapport, on a évalué les variations futures projetées des variables de conception climatique pour le Canada pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base (BIPB), d'après les publications scientifiques, ainsi que des données probantes qui sont directement accessibles des études ciblées fondées sur l'ensemble CanESM2-CanRCM4. Les variables de conception climatique ont été divisées en trois niveaux, conformément au degré de confiance déterminé dans les projections pour l'ensemble du Canada.

Les variables de niveau 1 sont celles pour lesquelles il existe un degré de confiance généralement élevé ou très élevé dans les projections pour un niveau donné de réchauffement climatique mondial. Ce degré de confiance est attribué en raison de la compréhension approfondie des processus en jeu et d'un ensemble de données probantes abondantes et solides (notamment des données probantes provenant d'autres parties du monde) qui porte sur les causes des variations observées. Cela implique un degré de confiance relativement élevé dans les facteurs de la variation projetée pour ces variables, degré de confiance qui semble indiquer que certaines valeurs de ces facteurs de variation pourraient être prises en compte lors de la conception d'une nouvelle infrastructure si cela est justifié du point de vue technique et s'il existe des approches convenables pour tenir compte des incertitudes restantes, notamment à l'égard de la valeur quantitative du réchauffement qui pourrait se produire d'ici la fin de la durée de vie utile de la structure en préparation.

Les variables de niveau 2 sont celles pour lesquelles il existe un degré de confiance généralement *moyen* dans les projections pour un niveau donné de réchauffement climatique mondial. Dans la plupart des cas, une évaluation de degré de confiance *moyen* signifie qu'il existe une certaine compréhension des processus qui mènent à des variations futures. Cette compréhension pourrait être complétée par un ensemble de données probantes liant les causes des variations observées à grande échelle, mais, en général, de telles données probantes seraient bien moins nombreuses, les études accessibles présentant un degré de cohérence plus faible que pour les variables de niveau 1. Contrairement aux situations où les climatologues ont un degré de confiance *élevé* ou *très élevé*, ces scientifiques ne sont généralement pas capables d'estimer la probabilité d'une variation projetée lorsqu'ils déterminent qu'ils ont un degré de confiance *moyen* dans les projections. Les facteurs de variation pour ces variables conviennent donc davantage aux analyses coût-avantages ou à une analyse de risques, ainsi qu'à l'exploration de l'incertitude associée à la conception.

Les variables de niveau 3 sont celles pour lesquelles il existe un degré de confiance faible ou très faible dans les projections pour un niveau donné de réchauffement climatique mondial. Un degré de confiance faible ou très faible est attribué aux projections pour les variables qui n'ont pas fait l'objet d'études approfondies dans les publications scientifiques ou pour lesquelles les processus en jeu sont mal compris. Dans certains cas, un degré de confiance très faible est attribué aux projections pour les variables qui sont évaluées indirectement, par exemple, à l'aide de relations empiriques, parce que la compréhension des processus est limitée. Même si les facteurs de variation sont projetés, ils conviennent probablement le mieux à l'exploration des répercussions potentielles des changements climatiques sur la fiabilité des structures dans différents scénarios de combinaisons de réchauffement et de charge.

7.1 Température

Les variables de conception climatique liées à la température de surface sont des variables de niveau 1. Les données probantes du RCCC (Bush et Lemmen, 2019) et les simulations des modèles climatiques semblent indiquer qu'il est *quasi certain* que le climat au Canada se réchauffera davantage dans le futur. Les augmentations projetées des températures moyennes annuelles des régions du Canada, déterminées dans le présent rapport, représentent environ 1,5 à 2 fois les augmentations correspondantes de la température moyenne mondiale, les augmentations étant supérieures dans le

Nord. Le réchauffement régional est un signal robuste qui ressort du bruit de la variabilité historique du climat à de très faibles niveaux de variation de la température moyenne mondiale. Étant donné la convergence des données probantes provenant des évaluations internationales et nationales, le degré de confiance est élevé dans les projections des données de conception climatique liées à la température de surface. Des augmentations des températures de conception en janvier et en juillet et des températures moyennes quotidiennes minimales et maximales, et des diminutions des degrésjours de chauffage à froid se produiront dans toutes les régions du Canada. Sur le plan spatial, les valeurs des données de conception climatique provenant de la partie froide de l'année augmentent généralement plus à mesure que l'isotherme se déplace du sud vers le nord, tandis que les variations dans les températures extrêmement chaudes sont plus uniformes sur le plan spatial. En général, les variations projetées dans les extrêmes de température sont à peu près proportionnelles aux variations de la température moyenne mondiale, la constante de proportionnalité dépendant de la variable, étant égale ou supérieure à celle de la température moyenne annuelle. Par rapport aux projections de la température moyenne annuelle pour laquelle le degré de confiance est très élevé, l'incertitude des projections des indices de température des caractéristiques des températures locales extrêmes et autres est en grande partie due à une plus grande variabilité interne, à l'influence des biais des modèles sur les dépassements du seuil et à la plus grande incertitude quant à la performance des modèles climatiques en ce qui concerne les extrêmes.

7.2 Précipitations et humidité

Les précipitations et la pluie annuelles sont des variables de niveau 2. Les données probantes évaluées dans le RCCC (Bush et Lemmen, 2019) et les simulations de CanESM2 CanRCM4 LE semblent indiquer qu'il existe un degré de confiance élevé que les précipitations et la pluie annuelles augmenteront au Canada avec le réchauffement climatique mondial. En raison du rapport signal/bruit faible relatif à la température plus élevé et des indications que l'incertitude des modèles contribue de façon plus importante à l'incertitude globale des projections, le degré de confiance est faible à moyen dans la variation projetée en pourcentage des précipitations et de la pluie à l'échelle régionale. Les augmentations projetées des précipitations et de la pluie annuelles sont encore une fois à peu près proportionnelles aux variations de la température moyenne mondiale, avec des taux d'intensification supérieurs dans le Nord et, pour la pluie, dans les régions montagneuses de l'Ouest du Canada. Dans toutes les régions, des augmentations relatives plus importantes sont projetées pour la pluie comparativement aux précipitations totales.

Les périodes de pluie d'un jour (période de retour de 50 ans) et de 15 minutes (période de retour de 10 ans) sont également des variables de niveau 2. Dans le RCCC (Bush et Lemmen, 2019), les auteurs considèrent qu'il est probable que les précipitations extrêmes augmenteront au Canada dans le futur, bien que l'ampleur de cette augmentation à l'échelle régionale soit beaucoup plus incertaine. À l'heure actuelle, il est recommandé que les projections des données de conception de périodes de pluie extrême d'un jour et de 15 minutes soient réalisées suivant la relation de Clausius-Clapeyron (CC), qui semble indiquer une intensification de ~7 % par degré Celsius de variation de la température moyenne annuelle locale. Ce résultat est corroboré par le fait que l'intensification des précipitations extrêmes avec le réchauffement climatique au Canada dans différents modèles climatiques semble concorder, en gros, avec la relation de CC théorique. Il existe cependant certaines données probantes indiquant qu'il peut y avoir des déviations de ce taux pour différentes régions (taux plus élevé le long des côtes), les durées d'accumulation (plus élevé pour les durées plus courtes) et les phénomènes plus rares (plus élevé pour les phénomènes plus rares), quoiqu'avec un degré de confiance très faible à faible dans de tels détails. Le fondement scientifique de la « mise à l'échelle de l'hyperrelation de CC » et l'intensification considérablement supérieure au taux de la relation de CC pour les courtes durées (6 heures ou moins) demeurent non résolus.

L'humidité relative moyenne annuelle est une variable de niveau 3. Selon le GIEC (2007), à l'échelle mondiale [traduction] « une réponse de [l'humidité relative] à grande échelle presque inchangée [aux

changements climatiques] est sans controverse ». Dans l'ensemble, il existe un degré de confiance généralement élevé que les variations futures de l'humidité relative seront faibles. Le GIEC (2014) a constaté que [traduction] « bien que les variations projetées par le modèle CMIP5 soient faibles, [il existe] un degré de confiance *moyen* que des réductions [de l'humidité relative] près de la surface, dans de nombreuses régions terrestres, soient *probables*. »

Conformément aux évaluations internationales, les projections de CanESM2-CanRCM4 LE indiquent une variation faible, voire nulle, de l'humidité relative annuelle au Canada. Cependant, tandis que les MCM du CMIP5 projettent une tendance faible à la sécheresse, le CanRCM4 LE projette une tendance faible à l'humidité. Étant donné le faible signal, l'incertitude relativement grande des évaluations multimodèles et le signal contradictoire de la variation entre le CanRCM4 LE et les MCM des modèles CMIP3/CMIP5, le degré de confiance dans l'ampleur de la variation dans les régions du Canada est très faible.

7.3 Vent

La pression de calcul du vent est une variable de niveau 3. Même s'il existe certaines concordances entre les projections de différents modèles indiquant que les variations dans les pressions de calcul du vent futures au Canada seront faibles, ces projections sont soumises à une incertitude considérable en raison de l'incapacité générale des modèles climatiques à faible résolution à résoudre bon nombre des processus physiques qui régissent les vents extrêmes et le rapport signal/bruit faible. La documentation scientifique accessible et les projections des modèles indiquent de faibles augmentations dans les pressions de calcul du vent futures en Colombie-Britannique, en Ontario et dans les régions de l'Atlantique, à des niveaux de réchauffement climatique mondial supérieurs à +3 °C, mais le degré de confiance dans ces projections est *très faible*. Une surveillance continue des nouvelles études et évaluations est justifiée dans ces régions et, plus généralement, dans l'ensemble du Canada.

La pression de la pluie chassée par le vent (PPCV) est également une variable de niveau 3. Même s'il existe un degré de confiance *moyen* que la pression de calcul de la pluie chassée par le vent augmentera, le degré de confiance dans le profil spatial et l'ampleur des variations de la PPCV projetées est *très faible* en raison de la grande incertitude quant aux vents extrêmes. Les variations projetées dans la température et les précipitations et, par conséquent, la pluie, sont, pour l'ensemble du Canada, relativement bien comprises en comparaison avec les variations des vitesses de vent moyennes et extrêmes. Cependant, des augmentations de la pression de calcul du vent future sont projetées pour la Colombie-Britannique, l'Ontario et les régions de l'Atlantique à des niveaux de réchauffement climatique mondial supérieurs à +3 °C (degré de confiance *très faible*). Par conséquent, la PPCV pourrait augmenter davantage en raison des dangers associés aux variations du vent dans ces régions.

7.4 Neige et glace

La charge de neige est une variable de niveau 3. Il existe un degré de confiance *moyen* que la charge de neige diminuera dans la plupart des régions du Sud du Canada. Les projections de différents modèles concordent et les liens entre les variations de température, de précipitations et d'équivalent en eau de la neige (EEN; la masse de l'eau gelée à la surface du sol) sont assez bien compris aux échelles spatiales représentées par les modèles.

Il existe cependant un degré de confiance faible uniquement dans l'ampleur de la diminution de l'élément neige des charges de neige en raison du rôle de la variabilité interne ainsi que de l'incertitude due aux modèles simplifiés de neige utilisés dans les modèles climatiques régionaux actuels. En outre, on s'attend à une plus grande incertitude dans les régions présentant un terrain

complexe qui ne sont pas bien résolues par les modèles climatiques à résolution relativement faible. Dans le Nord, où les augmentations des précipitations peuvent contrebalancer les réductions dues aux augmentations des températures, le degré de confiance est *très faible* quant à une variation nulle ou une augmentation modeste.

Il existe également un degré de confiance *très faible* dans les futures projections de l'élément pluie de la charge de neige en raison, en grande partie, de la variabilité interne élevée et de la nature combinée de la variable (la pluie doit tomber lorsqu'il y a présence de neige au sol).

La charge d'accumulation de la glace est une variable de niveau 3. Les projections sont sans conteste affectées par les incertitudes des modèles climatiques et de l'estimation de l'accumulation de glace qui ne sont pas encore quantifiées. Par conséquent, il existe un degré de confiance *très faible* dans les projections des variations de charge d'accumulation de la glace du CanRCM4, y compris dans les détails des variations spatiales des variations des charges projetées et même de la variation régionale du signal des variations projetées. Les projections sont soumises à une variabilité interne élevée et, par conséquent, le rapport signal/bruit des variations forcées dans le CanRCM4 demeure faible jusqu'à ce que les niveaux de réchauffement climatique mondial dépassent +2 °C. Même si les profils spatiaux des variations dans les conditions de température en altitude et en surface qui sont propices aux précipitations verglaçantes sont, en gros, similaires d'un membre à l'autre du grand ensemble de modèles climatiques, les différences régionales du même niveau de réchauffement climatique mondial sont néanmoins considérables.

Le pergélisol est une variable de niveau 3. Néanmoins, étant donné les liens forts entre les baisses des tendances pour l'étendue du pergélisol et le réchauffement climatique en surface à long terme, qui sont bien compris, le degré de confiance est *très élevé* dans la détérioration continue de l'étendue future du pergélisol près de la surface dans le Nord du Canada. Les projections sont toutefois préliminaires et sont fondées sur une approche indirecte simple de l'indice de gel de surface, plutôt que sur une simulation directe des températures du sol. Il existe donc une incertitude considérable et un degré de confiance *très faible* dans les projections des endroits et des étendues aréales futurs des différentes zones de pergélisol.

7.5 Conclusions et voie à suivre

Les variations projetées pour diverses régions et certains sites de BIPB dans le présent rapport sont fondées sur un grand ensemble de 50 membres du système de modélisation climatique CanESM2-CanRCM4. L'interprétation appropriée de ces données doit prendre en compte le fait que cette information est conditionnelle à cet ensemble particulier de simulations et au degré de confiance scientifique qui peut être placé dans les projections. Les valeurs exactes de ces projections seraient différentes si un ensemble différent de simulations par modèles était utilisé. Dans le présent rapport, comme le degré de confiance est évalué à l'échelle spatiale de la masse continentale du Canada et comme le degré de confiance diminue généralement avec la diminution de l'échelle spatiale en raison de la réduction du rapport signal/bruit, le degré de confiance dans les projections régionales et locales/propres aux sites est plus faible. Le degré de confiance est également plus faible pour les projections des variations de l'ampleur d'une charge climatique particulière que pour les projections de la direction de sa variation.

L'évolution rapide de la science et de la technologie du climat devrait, en pratique, mener à une meilleure compréhension des processus et à un renforcement de la capacité de modélisation du climat, par exemple par la mise au point et l'application de MCM et de MCR à résolution plus élevée dotés d'une représentation améliorée des processus et la production de simulations d'ensemble avec des MCR à résolution très élevée permettant la convection. Dans le cas des expériences de modélisation

climatique régionale, le défi de taille consiste à concevoir des expériences qui échantillonnent efficacement l'incertitude des modèles, dans les MCM et les MCR, et à obtenir la participation du centre de modélisation à ces expériences. Cela est essentiel afin de mieux comprendre quelles variations projetées des valeurs de conception sont robustes et insensibles au choix de la combinaison MCM-MCR, et quelles autres variations projetées demeurent fortement affectées par de telles sources d'incertitude. Il convient également de prendre note que même s'il y a un intérêt fortement croissant et une activité de recherche tout aussi croissante qui font appel à des modèles permettant la convection, ces modèles restent extrêmement dispendieux à utiliser, ont un grand nombre de mises en garde et demeurent à la merci d'une vaste gamme de paramètres malgré leur résolution très élevée. À mesure que la recherche sur ces modèles avancera, il sera possible de déterminer de façon plus éclairée quels aspects des simulations permettant la convection des variations des données de conception sont robustes. Plus généralement, la compréhension des processus constitue toujours la clé pour renforcer les projections des précipitations extrêmes, de l'humidité relative, des pressions de vent, des charges de neige et de glace, et du pergélisol (variables de niveaux 2 et 3). Pour mieux comprendre les processus physiques nécessaires à la crédibilité des projections régionales, avec un degré de confiance accru, des études climatologiques fondamentales significatives et ciblées sont nécessaires. Les améliorations apportées à la modélisation climatique et à la compréhension des processus mèneront ultimement à de meilleures évaluations des changements climatiques pour les BIPB et projections des données de conception climatique au Canada, ce qui facilitera l'élaboration de recommandations quantitatives plus robustes et des commentaires dans les nouvelles éditions du Code national du bâtiment du Canada (CNBC, tableau C-2) et du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CHBDC, CSA, S6, annexe A3.1).

RÉFÉRENCES

Alexander K. et Easterbrook, S. M. (2015). « The software architecture of climate models: a graphical comparison of CMIP5 and EMICAR5 configurations ». *Geoscientific Model Development*, 8(4), 1221 1232.

Allen, M. R. et Ingram, W. J. (2002). « Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle ». *Nature*, 419(6903), 224.

Allen, M. R., Frame, D. J., Huntingford, C., Jones, C. D., Lowe, J. A., Meinshausen, M. et Meinshausen, N. (2009). « Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne ». *Nature*, 458(7242), 1163.

Anisimov, O. A. et Nelson, F. E. (1996). « Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change ». *Global and Planetary Change*, 14(12), 5972.

Arora, V. K., Scinocca, J. F., Boer, G. J., Christian, J. R., Denman, K. L., Flato, G. M., et Merryfield, W. J. (2011). « Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases ». *Geophysical Research Letters*, 38(5).

Arora, V.K. et Cannon, A.J. (2018). « A brief background on climate models: the source of future climate information », dans P. Mukhopadhyaya (dir.), 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering (NHICE 01), Victoria (Colombie Britannique), 25 au 27 avril 2018. ISBN: 978 1 55058 620 6. p. 348 356 [annexe 2.1].

Ball, J., Babister, M., Nathan, R., Weeks, W., Weinmann, E., Retallick, M. et Testoni, I. (dir.) (2016). *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation*, Commonwealth of Australia.

Ben Alaya, M.A., Zwiers, F.W. et Zhang, X. (2019). « Evaluation and comparison of CanRCM4 and CRCM5 to estimate probable maximum precipitation over North America ». *Journal of Hydrometeorology*, (20), 2069 2089.

Bindoff, N. L., Stott, P. A., AchutaRao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N., Gutzler, D., et Mokhov, I. I. (2013). « Detection and attribution of climate change: from global to regional. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis ». Contribution of Working Group I to the *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume Uni) et New York (États Unis).

Bourgouin, P. (2000). « A method to determine precipitation types ». *Weather and Forecasting*, 15(5), 583 592.

Bresson, É., Laprise, R., Paquin, D., Thériault, J. M. et de Elía, R. (2017). « Evaluating the ability of CRCM5 to simulate mixed precipitation ». *Atmosphere Ocean*, 55(2), 79 93.

Brown, R. J. E. (1968). « Permafrost map of Canada ». *Canadian Geographical Journal*, février, p. 56 63, CNRC 10326.

Brown, J., Ferrians Jr, O. J., Heginbottom, J. A. et Melnikov, E. S. (1998). *Circum Arctic map of permafrost and ground ice conditions*. Boulder (États Unis), National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Données numériques.

Brown, R. D. et Mote, P. W. (2009). « The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate ». *Journal of Climate*, 22(8), 2124 2145.

Brutel Vuilmet, C., Ménégoz, M. et Krinner, G. (2013). « An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models ». *Cryosphere*, 7(1).

Bush E. et Lemmen D. S. (dir.) (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada*. Gouvernement du Canada (Ottawa, Ontario).

Caldwell, P. M., Zelinka, M. D., Taylor, K. E. et Marvel, K. (2016). « Quantifying the sources of intermodel spread in equilibrium climate sensitivity ». *Journal of Climate*, 29(2), 513 524.

Cannon, A. J. et Innocenti, S. (2019). « Projected intensification of sub daily and daily rainfall extremes in convection permitting climate model simulations over North America: implications for future intensity–duration–frequency curves ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(2), 421 440. [annexe 2.6].

Chaîné P. M. et Skeates P. (1974). Sélection des critères de la charge due à la glace et au vent. Centre climatologique canadien, Rapport interne, Météorologie industrielle — Étude III. Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ontario).

Choi, E. C. C. (1992). « Extreme wind speeds during rainfall » dans *Australian Wind Engineering Society 2nd Workshop*, Melbourne (Australie).

CNRC (Conseil national de recherches du Canada). (2015). *Code national du bâtiment — Canada, 2015*. Conseil national de recherches Canada, Ottawa (Ontario).

Colle, B. A., Zhang, Z., Lombardo, K. A., Chang, E., Liu, P. et Zhang, M. (2013). « Historical evaluation and future prediction of eastern North American and western Atlantic extratropical cyclones in the CMIP5 models during the cool season ». *Journal of Climate*, 26(18), 6882 6903.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J. L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., et Shongwe, M. (2013). « Long term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility » dans T. F. Stocker et more (dir.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 1029 1136). Cambridge University Press.

Cornick, S. M. et Lacasse, M. A. (2005). « A review of climate loads relevant to assessing the watertightness performance of walls, windows, and wall window interfaces ». *Journal of ASTM International*, 2(10), 1 15.

Cortinas, Jr J.V., Bernstein, B.C., Robbins, C.C. et Walter Strapp, J. (2004) « An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976–90 ». *Weather and Forecasting*, 19(2), 377 390.

Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M. et Staniforth, A. (1998). « The operational CMC–MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation ». *Monthly Weather Review*, 126(6), 1373 1395.

CSA (Association canadienne de normalisation) (2014) CAN/CSA S6 F14, Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA (Mississauga, Ontario).

CSA (Association canadienne de normalisation) (2018) CAN/CSA A440.4 F18, *Installation des fenêtres, des portes et des lanterneaux*, CSA (Mississauga, Ontario).

Deser, C., Phillips, A., Bourdette, V. et Teng, H. (2012). « Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability ». *Climate Dynamics*, 38(3 4), 527 546.

Diaconescu, E. P., Gachon, P., Laprise, R. et Scinocca, J. F. (2016). « Evaluation of precipitation indices over North America from various configurations of regional climate models ». *Atmosphere Ocean*, 54(4), 418 439.

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. et Taylor, K. E. (2016). « Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization ». *Geoscientific Model Development*, 9(LLNL JRNL 736881).
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W. J., et Forest, C. (2013). « Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on *Climate Change* ». Climate Change 2013, 5, 741 866.
- Fortier, D., Allard, M. et Shur, Y. (2007). « Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago ». *Permafrost and Periglacial Processes*, 18(3), 229 243.
- Fyfe, J. C., Derksen, C., Mudryk, L., Flato, G. M., Santer, B. D., Swart, N. C., et Scinocca, J. (2017). « Large near term projected snowpack loss over the western United States ». *Nature Communications* 8, 14996.
- Gan, T. Y., Barry, R. G., Gizaw, M., Gobena, A. et Balaji, R. (2013). « Changes in North American snowpacks for 1979–2007 detected from the snow water equivalent data of SMMR and SSM/I passive microwave and related climatic factors ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14), 7682 7697.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur le changement climatique) (2007) Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M., et Miller HL (dir.)], Cambridge University Press, Cambridge (Royaume Uni) et New York (États Unis), 996 p.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur le changement climatique), (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (dir.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume Uni) et New York (États Unis), 582 p.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur le changement climatique) (2013) Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, et Midgley PM (dir.)], Cambridge University Press, Cambridge (Royaume Uni) et New York (États Unis), 1535 p.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur le changement climatique), (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur le changement climatique) SRES (2000). Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emissions Scenarios. N. Nkicenovic and R. Swart, eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Groisman, P. Y., Bulygina, O. N., Yin, X., Vose, R. S., Gulev, S. K., Hanssen Bauer, I. et Førland, E. (2016). « Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia ». *Environmental Research Letters*, 11(4), 045007.
- Guo, D. et Wang, H. (2016) « CMIP5 permafrost degradation projection: A comparison among different regions ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(9), 4499 4517.

Harder, P., Pomeroy, J. W. et Westbrook, C. J. (2015). « Hydrological resilience of a Canadian Rockies headwaters basin subject to changing climate, extreme weather, and forest management ». *Hydrological Processes*, 29(18), 3905-3924.

Heginbottom J.A. (1995) Canada, pergélisol. Atlas national du Canada.

Innocenti, S., Mailhot, A. et Frigon, A. (2017). « Simple scaling of extreme precipitation in North America ». *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5823 5846.

Innocenti, S., Mailhot, A., Frigon, A., Cannon, A.J. et Leduc, M. (2019). « Observed and Simulated Precipitation over Northeastern North America: How Do Daily and Subdaily Extremes Scale in Space and Time? » *Journal of Climate*, 32, 8563 8582.

Jeong, D. I., Cannon, A. J. et Zhang, X. (2019). « Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 857 872. [annexe 2.7].

Jeong. D. I. et Sushama, L. (2018a). « Projected changes to extreme wind and snow environmental loads for buildings and infrastructure across Canada ». *Sustainable Cities and Society*, 36. 225 236.

Jeong, D. I. et Sushama, L. (2018b). « Rain on snow events over North America based on two Canadian regional climate models ». *Climate Dynamics*, 50(1 2), 303 316.

Jeong, D. I., Sushama, L. et Khaliq, M. N. (2017). « Attribution of spring snow water equivalent (SWE) changes over the Northern Hemisphere to anthropogenic effects ». *Climate Dynamics*, 48(11 12), 3645 3658.

Jeong, D. I., Sushama, L., Vieira, M. J. et Koenig, K. A. (2018). « Projected changes to extreme ice loads for overhead transmission lines across Canada ». *Sustainable Cities and Society*, 39, 639 649.

Jones, G. S., Stott, P. A. et Christidis, N. (2013). « Attribution of observed historical near–surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4001 4024.

Jorgenson, M. T., Shur, Y. L. et Pullman, E. R. (2006). « Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska ». *Geophysical Research Letters*, 33(2).

Kendon, E. J., Ban, N., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., et Wilkinson, J. M. (2017). « Do convection permitting regional climate models improve projections of future precipitation change? » *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 79 93.

Kharin, V. V. et Zwiers, F. W. (2005). « Estimating extremes in transient climate change simulations ». *Journal of Climate*, 18(8), 1156 1173.

Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. et Wehner, M. (2013). « Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble ». *Climatic Change*, 119(2), 345 357.

Kirchmeier Young, M. C., Zwiers, F. W. et Gillett, N. P. (2017). « Attribution of extreme events in Arctic sea ice extent ». *Journal of Climate*, 30(2), 553 571.

Klima, K. et Morgan, M. G. (2015). « Ice storm frequencies in a warmer climate ». *Climatic Change*, 133(2), 209 222.

Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C. H., Kossin, J., et Wu, L. (2019a). « Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part I: Detection and Attribution ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10), 1987 2007.

- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C. H., Kossin, J., et Wu, L. (2020). « Tropical cyclones and climate change assessment: Part II. Projected response to anthropogenic warming ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303 322.
- Koven, C., Riley, W. et Stern, A. (2013) « Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models », *Journal of Climate*, 26, 1877 1900.
- Kumar, D., Mishra, V. et Ganguly, A. R. (2015). « Evaluating wind extremes in CMIP5 climate models ». *Climate Dynamics*, 45(1 2), 441 453.
- Lambert, S. J. et Hansen, B. K. (2011). « Simulated changes in the freezing rain climatology of North America under global warming using a coupled climate model ». *Atmosphere-Ocean*, 49(3), 289 295.
- Li, S., Irwin, P., Kilpatrick, J., Gibbons, M. et Sifton, V. (2017). « A review of historical extreme wind speeds in a changing climate at some major Canadian cities ». Dans *Proceedings of the CSCE, Leadership in Sustainable Infrastructure*, Vancouver (Canada), 31 mai au 3 juin 2017. 10 p.
- Li, G., Zhang, X., Cannon, A. J., Murdock, T., Sobie, S., Zwiers, F., Anderson, K. et Qian, B. (2018). « Indices of Canada's future climate for general and agricultural adaptation applications ». *Climatic Change*, 148(1 2), 249 263. [annexe 2.3].
- Li, C., Zwiers, F., Zhang, X. et Li, G. (2019a). « How Much Information Is Required to Well Constrain Local Estimates of Future Precipitation Extremes? » *Earth's Future*, 7(1), 11 24. [annexe 2.4].
- Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Chen, G., Lu, J., Li, G., Norris, J., Tan, Y., Sun, Y. et Liu, M. (2019b). Larger increases in more extreme local precipitation events as climate warms. Geophysical Research Letters, 46(12), 6885 6891.
- Li, C., Zwiers, F.W., Zhang, X., Li, G., Sun, Y. et Wehner, M. (2020). « Changes in temperature and precipitation extremes in the new generation CMIP6 models ». *Journal of Climate*, 1(aop), 1-61.
- Luojus, K., Pulliainen, J., Takala, M., Lemmetyinen, J., Derksen, C., Metsämäki, S. et Bojkov, B. (2011). « Investigating hemispherical trends in snow accumulation using GlobSnow snow water equivalent data ». Dans *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2011, IEEE International, p. 3772–3774.
- Ma, L. et Qin, D. (2012). « Temporal spatial characteristics of observed key parameters of snow cover in China during 1957–2009 ». *Sci. Cold Arid Reg*, 4(5), 384 393.
- Marty, C. et Meister, R. (2012). « Long term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high altitude observatories in the Alps ». *Theoretical and Applied Climatology*, 110(4), 573 583.
- Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G. K., Edenhofer, O., Stocker, T. F., Field, C. B., et Matschoss, P. R. (2011). « The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups ». *Climatic Change*, 108(4), 675.
- Matthews, H. D., Gillett, N. P., Stott, P. A. et Zickfeld, K. (2009). « The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions ». *Nature*, 459(7248), 829.
- McInnes, K. L., Erwin, T. A. et Bathols, J. M. (2011). « Global Climate Model projected changes in 10 m wind speed and direction due to anthropogenic climate change ». *Atmospheric Science Letters*, 12(4), 325 333.
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., Li, L. T., Van Niel, T. G., Thomas, A., et Mescherskaya, A. V. (2012). « Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near surface wind speeds: Implications for evaporation ». *Journal of Hydrology*, 416, 182 205.

Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., ... & Ek, M. B. (2006). « North American Regional Reanalysis ». Bulletin of the American Meteorological Society, 87(3), 343-360.

Millar, R. J., Fuglestvedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., et Allen, M. R. (2017). « Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C. *Nature Geoscience*, 10(10), 741.

Min, S. K., Zhang, X. et Zwiers, F. (2008). « Human induced Arctic moistening ». *Science*, 320(5875), 518 520.

Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W. et Hegerl, G. C. (2011). « Human contribution to more intense precipitation extremes ». *Nature*, 470(7334), 378.

Mudryk, L., C. Derksen, S. Howell, F. Laliberté, C. Thackeray, R. Sospedra Alfonso, V. Vionnet, P. Kushner et Brown, R. (2018) « Canadian snow and sea ice: historical trends and projections ». *The Cryosphere*, 12, 157 1176.

Murakami, S., Iwasa, Y., Morikawa, Y. et Chino, N. (1987). « Extreme wind speeds for various return periods during rainfall ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 26(1), 105 125.

Najafi, M. R., Zwiers, F. et Gillett, N. (2017). « Attribution of the observed spring snowpack decline in British Columbia to anthropogenic climate change ». *Journal of Climate*, 30(11), 4113 4130.

Najafi, M. R., Zwiers, F. W. et Gillett, N. P. (2016). « Attribution of the spring snow cover extent decline in the Northern Hemisphere, Eurasia and North America to anthropogenic influence. » *Climatic Change*, 136(3 4), 571 586.

Nik, V. M., Mundt Petersen, S. O., Kalagasidis, A. S. et De Wilde, P. (2015). « Future moisture loads for building facades in Sweden: Climate change and wind driven rain ». *Building and Environment*, 93, 362 375.

O'Gorman, P. A. et Muller, C. J. (2010). « How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius–Clapeyron scaling in climate change simulations? » *Environmental Research Letters*, 5(2), 025207.

Paquin, J. P. et Sushama, L. (2015). « On the Arctic near surface permafrost and climate sensitivities to soil and snow model formulations in climate models ». *Climate Dynamics*, 44(1 2), 203 228.

Peacock, S. (2012). « Projected twenty first century changes in temperature, precipitation, and snow cover over North America in CCSM4 ». *Journal of Climate*, 25(13), 4405 4429.

Pendergrass, A. G. (2018). « What precipitation is extreme? » Science, 360(6393), 1072 1073.

Pendergrass, A. G., Lehner, F., Sanderson, B. M. et Xu, Y. (2015). « Does extreme precipitation intensity depend on the emissions scenario? » *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8767-8774.

Pérez-Bella, J. M., Domínguez Hernández, J., Cano Suñén, E., del Coz Díaz, J. J. et Alonso Martínez, M. (2013). « Global analysis of building façade exposure to water penetration in Chile ». *Building and Environment*, 70, 284 297.

Pérez-Bella, J. M., Domínguez Hernández, J., Cano Suñén, E., del Coz Díaz, J. J. et Martín Rodríguez, Á. (2014). « Procedure for a detailed territorial assessment of wind driven rain and driving rain wind pressure and its implementation to three Spanish regions ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 128, 76 89.

Pfahl, S., O'Gorman, P. A. et Fischer, E. M. (2017). « Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation ». *Nature Climate Change*, 7(6), 423.

- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., et Brisson, E. (2015). « A review on regional convection permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges ». *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323 361.
- Prein, A. F., Liu, C., Ikeda, K., Trier, S. B., Rasmussen, R. M., Holland, G. J. et Clark, M. P. (2017a). « Increased rainfall volume from future convective storms in the US ». *Nature Climate Change*, 7(12), 880.
- Prein, A. F., Rasmussen, R. M., Ikeda, K., Liu, C., Clark, M. P. et Holland, G. J. (2017b). « The future intensification of hourly precipitation extremes ». *Nature Climate Change*, 7(1), 48.
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J. et Schoof, J. T. (2012). « Past and future wind climates over the contiguous USA based on the North American Regional Climate Change Assessment Program model suite ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D19).
- Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M., Startz, R. et Liu, P. (2017). « Less than 2 °C warming by 2100 unlikely ». *Nature Climate Change*, 7(9), 637.
- Räisänen, J. (2008). « Warmer climate: less or more snow? » Climate Dynamics, 30(2 3), 307 319.
- Rasmussen, R. et Liu, C. (2017). *High Resolution WRF Simulations of the Current and Future Climate of North America*, Boulder (États Unis), https://doi.org/10.5065/D6V40SXP.
- Rezaei, S. N., Chouinard, L., Langlois, S. et Légeron, F. (2016). « Analysis of the effect of climate change on the reliability of overhead transmission lines ». Sustainable Cities and Society, 27, 137 144.
- Roesch, A. (2006). « Evaluation of surface albedo and snow cover in AR4 coupled climate models ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D15).
- Rummukainen, M. (2016). « Added value in regional climate modeling ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 145 159.
- Rupp, D. E., Mote, P. W., Bindoff, N. L., Stott, P. A. et Robinson, D. A. (2013). « Detection and attribution of observed changes in Northern Hemisphere spring snow cover ». *Journal of Climate*, 26(18):6904–6914.
- Sazonova, T.S. et Romanovsky, V.E. (2003) A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active layer thickness and mean annual ground temperatures, Permafrost and Periglacial Processes, 14(2), 125 139.
- Scinocca, J. F., Kharin, V. V., Jiao, Y., Qian, M. W., Lazare, M., Solheim, L., et Dugas, B. (2016). « Coordinated global and regional climate modeling ». *Journal of Climate*, 29(1), 17 35. [annexe 2.2].
- Seiler, C., Zwiers, F. W., Hodges, K. I. et Scinocca, J. F. (2018). « How does dynamical downscaling affect model biases and future projections of explosive extratropical cyclones along North America's Atlantic coast? » *Climate Dynamics*, 50(1 2), 677 692.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., Knutti, R. et Wilby, R. L. (2016). « Allowable CO₂ emissions based on regional and impact related climate targets ». *Nature*, 529(7587), 477.
- Shepherd, T. G. (2014). « Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections ». *Nature Geoscience*, 7(10), 703.
- Slater, A. G. et Lawrence, D. M. (2013). « Diagnosing present and future permafrost from climate models ». *Journal of Climate*, 26(15), 5608 5623.
- Sobie, S. R. et Murdock, T. Q. (2017). « High resolution statistical downscaling in Southwestern British Columbia ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(6), 1625 1641.

St Pierre, M., Thériault, J. M. et Paquin, D. (2019). « Influence of the model horizontal resolution on atmospheric conditions leading to freezing rain in regional climate simulations ». *Atmosphere Ocean*, 57(2), 101 119.

Stull, R. (2011). « Wet bulb temperature from relative humidity and air temperature. » *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11), 2267-2269.

Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F.W., Westra, S. et Alexander, L.V. (2020a). « A global, continental and regional analysis of changes in extreme precipitation ». *Journal of Climate*, 1-52.

Sun, Q., Zwiers, F.W., Zhang, X. et Li, G. (2020b). « A comparison of intra-annual and long-term trend scaling of extreme precipitation with temperature in a large-ensemble regional climate simulation ». Journal of Climate, 33(21), 9233-9245.

Takayabu, I. et Hibino, K. (2016). « The skillful time scale of climate models ». *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 94, 191 197.

Tan, Q., Zwiers, F.W., Yang, S., Li, C. et Deng, K. (2020). « The role of circulation and its changes in present and future Atmospheric Rivers over western North America ». *Journal of Climate*, 33, 1261 1281.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. et Meehl, G. A. (2012). « An overview of CMIP5 and the experiment design ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485 498.

Terzago, S., Hardenberg, J. V., Palazzi, E. et Provenzale, A. (2017). « Snow water equivalent in the Alps as seen by gridded data sets, CMIP5 and CORDEX climate models ». *The Cryosphere* 11(4), 1625 1645.

Thibault, S. et Payette, S. (2009). « Recent permafrost degradation in bogs of the James Bay area, northern Quebec, Canada ». *Permafrost and Periglacial Processes*, 20(4), 383 389.

Trenberth, K. E. (1999). « Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change ». Dans *Weather and Climate Extremes* (p. 327 339). Springer, Dordrecht.

Trenberth, K. E. (2011). « Changes in precipitation with climate change ». *Climate Research*, 47(1 2), 123 138.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. et Shepherd, T. G. (2015). « Attribution of climate extreme events ». *Nature Climate Change*, 5(8), 725.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., et Masui, T. (2011). « The representative concentration pathways: an overview ». *Climatic Change*, 109(1 2), 5. doi: 10.1007/s10584 011 0148 z.

Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J. N. et Ciais, P. (2010). « Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness ». *Nature Geoscience*, 3(11), 756.

Verseghy, D. L. (1991). « CLASS—A Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil model ». *International Journal of Climatology*, 11(2), 111 133.

Verseghy, D. L. (2000). « The Canadian land surface scheme (CLASS): its history and future ». *Atmosphere Ocean*, 38(1), 1 13.

von Salzen, K., McFarlane, N. A. et Lazare, M. (2005). « The role of shallow convection in the water and energy cycles of the atmosphere ». *Climate Dynamics*, 25(7 8), 671 688.

von Salzen, K., Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Li, J., Cole, J. N., Plummer, D., et Solheim, L. (2013). « The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4). Part I: representation of physical processes ». *Atmosphere Ocean*, 51(1), 104 125.

Walton, D. B., Hall, A., Berg, N., Schwartz, M. et Sun, F. (2017). « Incorporating snow albedo feedback into downscaled temperature and snow cover projections for California's Sierra Nevada ». *Journal of Climate*, 30(4), 1417 1438.

Wan, H., Wang, X. L. et Swail, V. R. (2010). « Homogenization and trend analysis of Canadian near surface wind speeds ». *Journal of Climate*, 23(5), 1209 1225.

Wan, H., Zhang, X., Zwiers, F. et Min, S. K. (2015). « Attributing northern high latitude precipitation change over the period 1966–2005 to human influence ». *Climate Dynamics*, 45(7 8), 1713 1726.

Wang, Z., Lin, L., Zhang, X., Zhang, H., Liu, L. et Xu, Y. (2017). « Scenario dependence of future changes in climate extremes under 1.5 °C and 2 °C global warming ». *Scientific Reports*, 7, 46432.

Wei, M., Guodong, C. et Qingbai, W. (2009). « Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai–Tibet railroad ». *Cold Regions Science and Technology*, 59(1), 3 11.

Welsh, L. E., Skinner, W. R. et Morris, R. J. (1989). *A Climatology of Driving Rain Wind Pressures for Canada*. Ébauche de rapport de la direction du climat et de la Direction générale de la recherche sur le climat et l'atmosphère, Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Canada.

Westra, S., Alexander, L. V. et Zwiers, F. W. (2013). « Global increasing trends in annual maximum daily precipitation ». *Journal of Climate*, 26(11), 3904 3918.

Whan, K. et Zwiers, F. (2016). « Evaluation of extreme rainfall and temperature over North America in CanRCM4 and CRCM5 ». *Climate Dynamics*, 46(11 12), 3821 3843.

Whan, K. et Zwiers, F. (2017). « The impact of ENSO and the NAO on extreme winter precipitation in North America in observations and regional climate models ». *Climate Dynamics*, 48(5 6), 1401 1411.

Whan, K., Zwiers, F. et Sillmann, J. (2016). « The influence of atmospheric blocking on extreme winter minimum temperatures in North America ». *Journal of Climate*, 29(12), 4361 4381.

Zappa, G., Shaffrey, L. C., Hodges, K. I., Sansom, P. G. et Stephenson, D. B. (2013). « A multimodel assessment of future projections of North Atlantic and European extratropical cyclones in the CMIP5 climate models ». *Journal of Climate*, 26(16), 5846-5862.

Zelinka, M. D., Randall, D. A., Webb, M. J. et Klein, S. A. (2017). « Clearing clouds of uncertainty ». *Nature Climate Change*, 7(10), 674.

Zhang, G. J. et McFarlane, N. A. (1995). « Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model ». *Atmosphere-Ocean*, 33(3), 407 446.

Zhang, X., Wan, H., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C. et Min, S. K. (2013). « Attributing intensification of precipitation extremes to human influence ». *Geophysical Research Letters*, 40(19), 5252 5257.

Zhang, X., Zwiers, F. W., Li, G., Wan, H. et Cannon, A. J. (2017). « Complexity in estimating past and future extreme short duration rainfall ». Nature Geoscience, 10(4), 255. [annexe 2.5].

Zhang, Y., Chen, W. et Riseborough, D.W. (2008) « Transient projections of permafrost distribution in Canada during the 21st century under scenarios of climate change », *Global and Planetary Change*, 60(3 4), 443 456.

Zhou, F., Li, R., Zhang, A. et Zhu, L. (2008). « Surface-coupled three-dimensional geothermal model for study of permafrost geothermal regime in a building environment ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D19).

Zwiers, F.W. (2002). « The 20 year forecast ». Nature, 416, 690 691.

Annexe 1.1 : Déroulement du réchauffement planétaire

L'année au cours de laquelle la statistique multimodèle spécifiée aura irrémédiablement dépassé la température moyenne planétaire indiquée ΔT par rapport à la période de référence 1986-2016. CMIP5one = membre d'un seul ensemble par modèle; CMIP5all = modèles avec la moyenne de plus d'un membre d'ensemble avant la construction de la moyenne du modèle. Température moyenne ΔT de l'ensemble lissée à l'aide d'une fenêtre mobile de 31 ans, avec le test de dépassement réalisé sur la valeur centrale.

Scénario	N _{exécutions}	Δ <i>T</i> =0,5°C	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Année de dépassement : moyenne multimodèle (<i>supérieure</i> , CMIP5one; <i>inférieure</i> , CMIP5all)									
RCP2.6	32	2023	-	-	-	-	-	-	-
	65	2023	-	-	-	-	-	-	-
RCP4.5	42	2022	2043	2071	-	-	-	-	-
	108	2022	2043	2071	-	-	-	-	-
RCP6.0	25	2025	2049	2069	2087	-	-	-	-
	47	2025	2049	2069	2088	-	-	-	-
RCP8.5	39	2020	2035	2047	2059	2069	2080	2090	2100*
	81	2020	2035	2048	2059	2069	2080	2091	2100*
Année de dépassement : médiane multimodèle (<i>supérieure</i> , CMIP5one; <i>inférieure</i> , CMIP5all)									
RCP2.6	32	2025	-	-	-	-	-	-	-
	65	2025	-	-	-	-	-	-	-
RCP4.5	42	2023	2044	2078	-	-	-	-	-
	108	2023	2044	2078	-	-	-	-	-
RCP6.0	25	2026	2052	2072	2098	-	-	-	-
	47	2026	2052	2072	2098	-	-	-	-
RCP8.5	39	2021	2036	2050	2060	2072	2082	2092	-
	81	2021	2036	2050	2060	2072	2082	2092	-
Année de dépassement : quartile supérieur multimodèle (<i>supérieur</i> , CMIP5one; <i>inférieur</i> , CMIP5all)									
RCP2.6	32	2020	2100	-	-	-	-	-	-
	65	2020	2100	-	-	-	-	-	-
RCP4.5	42	2020	2036	2057	2079	-	-	-	-
	108	2020	2036	2057	2079	-	-	-	-
RCP6.0	25	2020	2042	2062	2079	2095	-	-	-
	47	2020	2042	2062	2079	2095	-	-	-
RCP8.5	39	2017	2033	2043	2052	2062	2071	2079	2089
	81	2017	2033	2043	2052	2062	2071	2079	2089

Notes

^{1.} La source des températures du CMIP5 est le KNMI Climate Explorer, https://climexp.knmi.nl/start.cgi.

^{2.} Près des points finaux, la fenêtre mobile de 31 ans se rétrécit en une fenêtre symétrique de n années, n s'approchant de 1 au point final.

^{3.} L'absence de donnée (—) signifie que la statistique du modèle spécifiée ne dépasse pas le ΔT spécifié avant 2100.

Annexe 1.2 : Changements projetés

Les changements projetés des variables climatiques à des localités se rapprochant de celles énumérées au tableau C 2 du *Code national du bâtiment du Canada* apparaissent dans les chiffriers Excel ci-inclus. Les chapitres 2 à 6 contiennent une discussion de la méthodologie, une l'évaluation des niveaux de confiance et des directives pour chaque variable.

Les valeurs données dans les feuilles +##C [+0,5 °C à +3,5 °C] sont les changements à venir, projetés dans les données de conception climatique pour des niveaux spécifiés de variation de la température mondiale moyenne (voir le chapitre 2.5.1, annexe 1.1). En général, les changements sont tirés des projections pour la cellule la plus proche de la grille terrestre du grand ensemble de CanRCM4. Les changements projetés de Rn15m et Rn1Day sont basés sur la formule de Clausius-Clapeyron (7 % par °C) pour le changement de la température moyenne annuelle (AnnTmean); les valeurs du rapport signal sur bruit (S/B) de ces variables reposent sur l'écart de l'ensemble des analyses des valeurs extrêmes de maximums annuels bruts pour 1 h et 1 jour à partir du grand ensemble de CanRCM4, respectivement.

Il est important de noter que les valeurs dans les tableaux d'une variable de conception donnée reposent sur les projections de changement qui ont été évaluées pour l'échelle régionale à nationale pour un niveau de confiance donné basé sur les preuves à l'appui et la compréhension du processus. On devrait considérer que la confiance dans les valeurs particulières pour des emplacements individuels est inférieure.

On a attribué une couleur aux valeurs des emplacements individuels en fonction de fourchettes du rapport S/B déterminées à partir des projections du grand ensemble de CanRCM4 et de la dispersion de l'ensemble :

```
\leq 0.2; 0.2 < \leq 0.4; 0.4 < \leq 0.6; 0.6 < \leq 0.8 \leq 0.9
```

Le niveau de confiance estimé est indiqué par les traits soulignés suivants sous les cellules :

Variables de niveau 1 (confiance élevée ou très élevée)

Variables de niveau 2 (confiance moyenne)

Variables de niveau 3 (confiance faible ou très faible)

Les changements sont exprimés dans les unités mentionnées plus bas :

Appendix1.2_+##C_CHBDC.xls

iceThick¹² — épaisseur de la glace (1/20) [%]

maxTmean — températures moyennes maximales quotidiennes de l'air [°C] minTmean — températures moyennes minimales quotidiennes de l'air [°C]

Q10 – pressions horaires du vent (1/10) [%]

Q25 – pressions horaires du vent (1/25) [%]

Q50 – pressions horaires du vent (1/50) [%]

Q100 - pressions horaires du vent (1/100) [%]

¹² Les valeurs de l'épaisseur de la glace marquées #NA n'ont pas pu être calculées en raison du faible nombre de niveaux de pression verticale du grand ensemble CanRCM4 LE.

Appendix1.2_+##C_NBCC.xls

AnnP — précipitations totales annuelles [%]

AnnR — pluie annuelle [%]

AnnTmean — température moyenne annuelle de l'air [°C]

DRQ - pression du vent de pluie battante [%]

HDD – degrés-jours sous 18 °C [°C-jours]

RH - humidité relative [%]

Q10 - pressions horaires du vent (1/10) [%]

Q50 – pressions horaires du vent (1/50) [%]

Rn15m — pluie de 15 minutes (1/10) [%]

Rn1Day — pluie durant une journée (1/50) [%]

SLr — charge due à la pluie (1/50) [%]

SLs — charge due à la neige (1/50) [%]

TJan10 — températures de conception, 1er centile de janvier [°C]

TJan25 — températures de conception, 2,5° centile de janvier [°C]

TJuly — températures de conception, 2,5° centile de juillet, thermomètre sec [°C]

TwJuly — températures de conception, 2,5° centile de juillet, thermomètre humide [°C]

Téléchargez des données de l'annexe 1.2 CHBDC :

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2_+0.5C_CHBDC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2_+1.0C_CHBDC.xls

 $http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2_+1.5C_CHBDC.xls$

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2 +2.0C CHBDC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2_+2.5C_CHBDC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2 +3.0C CHBDC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_CHBDC/Appendix1.2_+3.5C_CHBDC.xls

Téléchargez des données de l'annexe 1.2 CNBC :

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2 +0.5C NBCC.xls

 $http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2_+1.0C_NBCC.xls$

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2_+1.5C_NBCC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2_+2.0C_NBCC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2_+2.5C_NBCC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2_+3.0C_NBCC.xls

http://scenarios-climatiques.canada.ca/files/buildings_report/Appendix_1.2_NBCC/Appendix1.2_+3.5C_NBCC.xls

Annexe 2: Liens vers les publications

Annexe 2.1

Arora V. K. et Cannon A. J. (2018). « A brief background on climate models: the source of future climate information » dans P. Mukhopadhyaya (dir.), 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering (NHICE-01), Victoria (Colombie-Britannique), Canada, 25 au 27 avril 2018. ISBN: 978-1-55058-620-6. p. 348-356. En ligne: https://onlineacademiccommunity.uvic.ca/nhice/wp-content/uploads/sites/2382/2019/02/Proceedings_22Feb2019.pdf

Annexe 2.2

Scinocca J. F., Kharin V. V., Jiao Y., Qian M. W., Lazare M., Solheim L., Flato G. M., Binner S.et Dugas B. (2016). « Coordinated global and regional climate modeling ». *Journal of Climate*, 29(1), p. 17-35. En ligne: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0161.1

Annexe 2.3

Li G., X. Zhang, Cannon A. J., Murdock T. Q., Sobie S., Zwiers F. W., Anderson K. et Qian B. (2018). « Indices of Canada's future climate for general and agricultural adaptation applications ». *Climatic Change*, 148(1-2), p. 249-263. En ligne: https://doi.org/10.1007/s10584-018-2199-x

Annexe 2.4

Li C., Zwiers F., Zhang X. et Li G. (2019). « How much information is required to well constrain local estimates of future precipitation extremes? » $Earth's\ Future$, 7, p. 11-24. En ligne: https://doi.org/10.1029/2018EF001001

Annexe 2.5

Zhang X., Zwiers F. W., Li G., Wan H. et Cannon A. J. (2017). « Complexity in estimating past and future extreme short-duration rainfall ». *Nature Geoscience*, 10, p. 255-259. En ligne: https://doi.org/10.1038/NGEO2911

Annexe 2.6

Cannon A. J. et Innocenti S. (2019). « Projected intensification of sub-daily and daily rainfall extremes in convection-permitting climate model simulations over North America: Implications for future intensity-duration-frequency curves ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, p. 421-440. En ligne: https://doi.org/10.5194/nhess-19-421-2019

Annexe 2.7

Jeong D. I., Cannon A. J. et Zhang X. (2019). « Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, p. 857-872. En ligne: https://doi.org/10.5194/nhess-19-857-2019