



CHAPITRE 4

Les changements de température et de précipitations au Canada

RAPPORT SUR LE CLIMAT CHANGEANT DU CANADA



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

Canada



Auteurs

Xuebin Zhang, Environnement et Changement climatique Canada

Greg Flato, Environnement et Changement climatique Canada

Megan Kirchmeier-Young, Environnement et Changement climatique Canada

Lucie Vincent, Environnement et Changement climatique Canada

Hui Wan, Environnement et Changement climatique Canada

Xiaolan Wang, Environnement et Changement climatique Canada

Robin Rong, Environnement et Changement climatique Canada

John Fyfe, Environnement et Changement climatique Canada

Guilong Li, Environnement et Changement climatique Canada

Viatchelsav V. Kharin, Environnement et Changement climatique Canada

Citation recommandée : Zhang, X., Flato, G., Kirchmeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., Rong, R., Fyfe, J., Li, G., Kharin, V.V. « Les changements de température et de précipitations pour le Canada », chapitre 4 dans Rapport sur le climat changeant du Canada, E. Bush et D.S. Lemmen (éd.), gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2019, p. 113-193.

Table des matières du chapitre

MESSAGES CLÉS DU CHAPITRE (PAR SECTION)

RÉSUMÉ

4.1 Introduction

4.2 : Température

Encadré 4.1 : Un exemple de l'inhomogénéité des données

4.2.1 : La température moyenne

4.2.1.1 : Changements observés

4.2.1.2 : Causes des changements observés

4.2.1.3 : Changements projetés et incertitudes

4.2.2 : Températures extrêmes et autres indices

4.2.2.1 : Changements observés

4.2.2.2 : Causes des changements observés

4.2.2.3 : Changements projetés et incertitudes

4.3 : Précipitations

4.3.1 : Précipitations moyennes

4.3.1.1 : Changements observés

4.3.1.2 : Causes des changements observés

4.3.1.3 : Changements projetés et incertitudes

4.3.2 : Précipitations extrêmes

4.3.2.1 : Changements observés

4.3.2.2 : Changements projetés et incertitudes

Encadré 4.2 : L'impact des changements combinés de température et de précipitations sur des changements observés et projetés des conditions météorologiques propices aux incendies forestiers

4.4 : Attribution des événements extrêmes

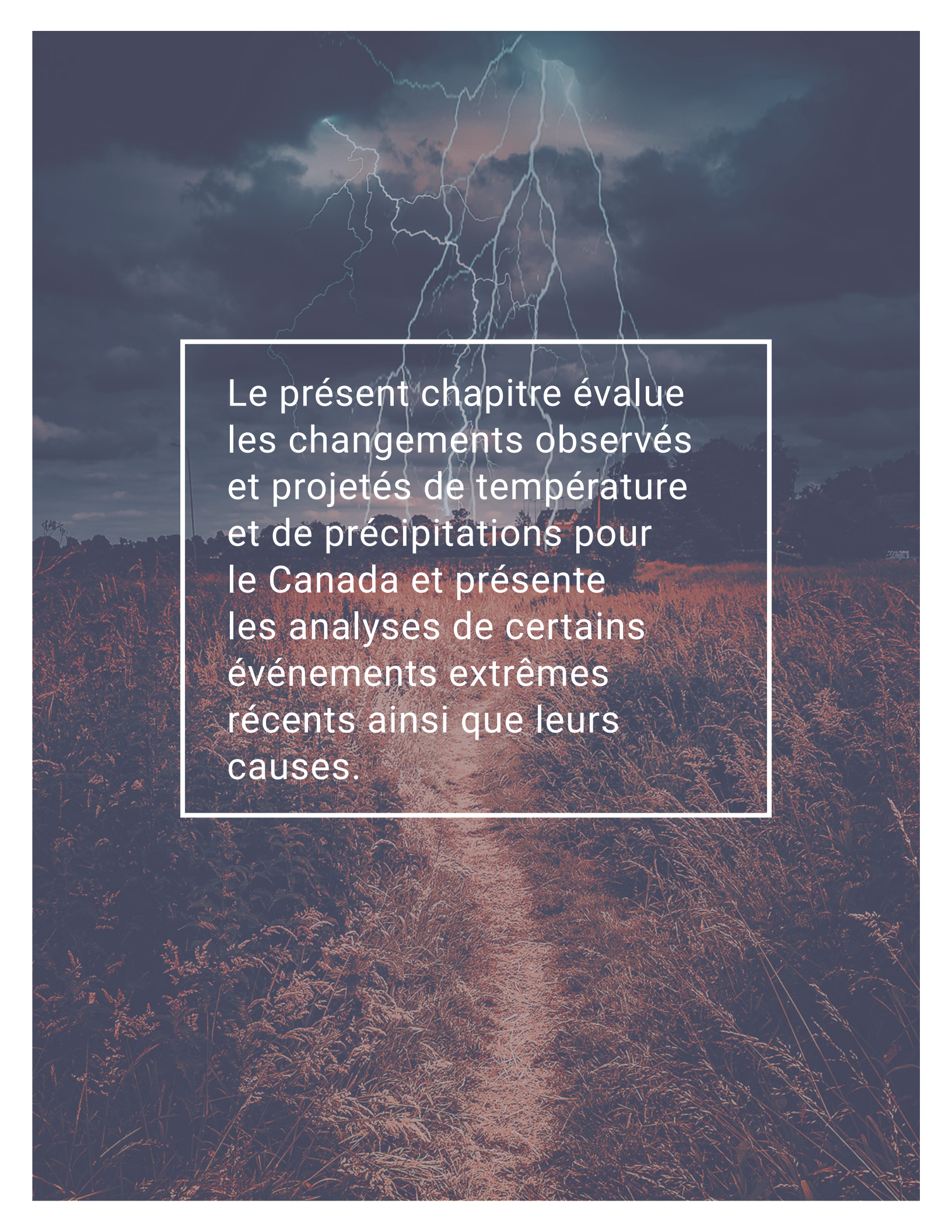
Encadré 4.3 : Méthodes pour l'attribution des événements

4.4.1 : Attribution de deux événements récents

4.4.1.1 : Inondations au Sud de l'Alberta en 2013

4.4.1.2 : Feux de forêt de Fort McMurray en 2016

RÉFÉRENCES

The background image is a full-page photograph. It depicts a dark, stormy sky with multiple bright, jagged lightning bolts striking down. Below the sky is a field of tall, dry, brownish grass. A narrow, light-colored path or clearing runs through the center of the grass field, leading towards the horizon. The overall mood is dramatic and intense, suggesting a powerful natural event.

Le présent chapitre évalue les changements observés et projetés de température et de précipitations pour le Canada et présente les analyses de certains événements extrêmes récents ainsi que leurs causes.

Messages clés du chapitre

4.2: Température

Il est *quasiment certain* que le climat du Canada s'est réchauffé et qu'il se réchauffera davantage dans l'avenir. Les augmentations observées et projetées de la température moyenne au Canada sont environ le double des augmentations correspondantes de la température moyenne mondiale, peu importe le scénario d'émissions.

Les températures moyennes annuelles et saisonnières au Canada ont augmenté, le plus grand réchauffement se produisant en hiver. Entre 1948 et 2016, la meilleure estimation d'augmentation de la température moyenne annuelle est de 1,7 °C pour le Canada dans son ensemble et de 2,3 °C pour le Nord du Canada.

Bien que les activités humaines et les variations naturelles du climat ont toutes deux contribué au réchauffement observé au Canada, le facteur humain est dominant. Il est *probable*¹³ que plus de la moitié du réchauffement observé au Canada est causé par l'influence des activités humaines.

On prévoit que la température moyenne annuelle et saisonnière augmentera partout, avec des changements plus importants dans le Nord du Canada pendant l'hiver. En moyenne dans l'ensemble du pays, le réchauffement projeté dans un scénario de faibles émissions est d'environ 2 °C supérieur à celui de la période de référence de 1986 à 2005, demeurant relativement stable après 2050, alors que, dans un scénario d'émissions élevées, les augmentations de température continueront, atteignant plus de 6 °C d'ici la fin du XXI^e siècle.

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

Les changements extrêmes de température, dans les observations et les projections futures, sont cohérents avec le réchauffement. Les températures extrêmement chaudes sont devenues plus chaudes, tandis que les températures extrêmement froides sont devenues moins froides. De tels changements sont prévus de continuer dans l'avenir, l'ampleur du changement étant proportionnelle à l'ampleur du changement de la température moyenne.

13 Le présent rapport utilise le même langage calibré pour l'incertitude que le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Les cinq termes suivants sont utilisés pour exprimer le degré de confiance évalué dans les constatations selon la disponibilité, la qualité et la cohérence des preuves : très faible, faible, moyen, élevé, très élevé. Les termes suivants sont utilisés pour indiquer la probabilité évaluée d'un résultat : quasiment certain (probabilité de l'ordre de 99 % à 100 %), extrêmement probable (probabilité de l'ordre de 95 % à 100 %), très probable (probabilité de l'ordre de 90 % à 100 %), probable (probabilité de l'ordre de 66 % à 100 %), à peu près aussi probable qu'improbable (probabilité de l'ordre de 33 % à 66 %), improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 33 %), très improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 10 %), extrêmement improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 5 %), exceptionnellement improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 1 %). Ces termes sont insérés en caractères italiques dans le texte. Voir le chapitre 1 pour plus de précisions.

4.3: Précipitations

Il y a un *degré de confiance moyen* que les précipitations moyennes annuelles ont augmenté, en moyenne, au Canada, avec un pourcentage d'augmentation plus élevé pour le Nord du Canada. Ces augmentations sont cohérentes avec les simulations des modèles de changement climatique anthropique.

On prévoit que les précipitations annuelles et hivernales augmenteront partout au Canada au cours du XXI^e siècle, avec un pourcentage de changements plus important dans le Nord du Canada. On prévoit que les précipitations estivales diminueront dans le Sud du Canada dans un scénario d'émissions élevées vers la fin du XXI^e siècle, mais seulement de petits changements sont projetés dans un scénario de faibles émissions.

Pour l'ensemble du Canada, il n'y a pas de preuves d'observations disponibles des changements dans les quantités de précipitation extrêmes, accumulées sur une période d'un jour ou moins. Cependant, dans l'avenir, les précipitations extrêmes quotidiennes sont prévues d'augmenter (*degré de confiance élevé*).

4.4: Attribution des événements climatiques extrêmes

Le changement climatique anthropique a augmenté la probabilité de certains types d'événements extrêmes, comme les feux de forêt de Fort McMurray en 2016 (*degré de confiance moyen*) et les précipitations extrêmes qui ont produit les inondations au Sud de l'Alberta en 2013 (*degré de confiance faible*).

Résumé

La température et les précipitations sont des quantités climatiques fondamentales qui ont une influence directe sur les systèmes humains et naturels. Elles sont habituellement mesurées dans le cadre du système d'observation météorologique qui fournit les données actuelles et historiques sur les changements partout au Canada. Les changements dans le système d'observation, comme les changements d'instruments ou d'emplacement du site de mesure, doivent être pris en compte dans l'analyse du dossier historique à long terme. Le système d'observation est également réparti de façon hétérogène dans tout le Canada, une grande partie du Nord du Canada ayant un réseau très clairsemé et qui est en place depuis seulement 70 ans environ. L'on peut affirmer, avec un **degré de confiance très élevé**, que les ensembles de données de température sont suffisamment fiables pour calculer des moyennes régionales de température pour le Sud du Canada¹⁴ de 1900 jusqu'au présent et pour le Nord du Canada de 1948 jusqu'au présent. L'on peut dire, avec un **degré de confiance moyen**, que les ensembles de données de précipitations sont suffisamment fiables pour calculer des moyennes régionales des anomalies de précipitations normalisées (écart par rapport à la moyenne initiale divisée par la moyenne initiale) pour le Sud du Canada de 1900 jusqu'à présent, mais ces affirmations s'appuient seulement sur un **degré de confiance faible** pour le Nord du Canada de 1948 jusqu'à présent.

Ces ensembles de données montrent que la température au Canada a augmenté environ deux fois plus vite que la moyenne mondiale, la température annuelle moyenne du Canada ayant augmenté d'environ 1,7 °C (plage probable de 1,1 °C à 2,3 °C) au cours de la période de 1948 à 2016. Les températures ont augmenté davantage dans le Nord que dans le Sud du Canada, et plus en hiver qu'en été. La température moyenne annuelle dans le Nord du Canada a augmenté de 2,3 °C (plage probable de 1,7 °C à 3,0 °C) de 1948 à 2016, soit environ trois fois le taux de réchauffement moyen mondial. Plus de la moitié du réchauffement peut être attribué à des émissions de gaz à effet de serre causés par l'humain. Les modèles climatiques projettent des tendances semblables de changements dans l'avenir, l'ampleur du réchauffement dépendant des futures émissions de gaz à effet de serre. Un scénario de faibles émissions (RCP2.6), généralement compatible avec l'objectif de température mondiale de l'Accord de Paris, augmentera la température moyenne annuelle au Canada de 1,8 °C supplémentaire d'ici le milieu du siècle, demeurant à peu près constant par la suite. Un scénario d'émissions élevées (RCP8.5), selon lequel on réalise peu de réductions d'émissions, verrait la température moyenne annuelle du Canada augmenter de plus de 6 °C¹⁵ d'ici la fin du XXI^e siècle. Dans tous les cas, le Nord du Canada est projeté de se réchauffer plus que le Sud du Canada et les températures hivernales sont projetées d'augmenter plus que les températures estivales. Il y aura de plus en plus de degrés-jours de croissance (une mesure de la saison de croissance, importante pour l'agriculture) et moins de degrés-jours de gel (une mesure de la rigueur de l'hiver), un travail de concert avec le changement de la température moyenne.

Il y a un **degré de confiance moyen**, étant donné le réseau des stations d'observations partout au Canada, que les précipitations moyennes annuelles ont augmenté, en moyenne, au Canada, avec des augmentations plus importantes dans le Nord du Canada. Les modèles climatiques projettent davantage d'augmentations des précipitations, avec une augmentation des précipitations moyennes annuelles projetées à environ 7 % selon le scénario de faibles émissions (RCP2.6) et 24 % selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5) d'ici la fin du XXI^e siècle. À mesure que la température augmente, il continuera d'y avoir un changement entre la neige et la pluie au printemps et à l'automne.

14 Pour simplifier, le Sud et le Nord du Canada sont définis en fonction de l'emplacement géographique dans le présent rapport : le Sud du Canada est défini comme la région au sud du 60^e latitude nord, alors que la région au nord de cette latitude est définie comme le Nord du Canada. L'expression « le Nord » est utilisée pour désigner les trois territoires du Nord, en fonction de leurs frontières politiques (voir le chapitre 1, figure 1.1).

15 Les valeurs présentées dans ce résumé sont des projections médianes fondées sur de multiples modèles climatiques. Certains modèles projettent des augmentations plus importantes, alors que d'autres projettent des augmentations moins importantes.

Même si, en général, les précipitations sont prévues d'augmenter dans le futur, les précipitations estivales dans certaines parties du Sud du Canada sont projetées de diminuer d'ici la fin du XXI^e siècle selon le scénario d'émissions élevées. Cependant, il y a un degré de confiance plus faible dans cette diminution estivale projetée que dans l'augmentation projetée des précipitations annuelles. Il y a un **degré de confiance élevé** dans cette dernière parce que différentes générations de modèles ont produit des projections cohérentes et parce que l'augmentation de vapeur d'eau atmosphérique dans cette partie du monde devrait se traduire par plus de précipitations, selon notre compréhension des processus physiques. Le degré de confiance plus faible pour la diminution estivale dans le Sud du Canada est parce que cette région se trouve à l'extrémité nord de la région des terres continentales intérieures de l'Amérique du Nord, où les précipitations sont projetées de diminuer, et à la transition vers une région où les précipitations sont projetées d'augmenter. Le modèle atmosphérique contrôlé par la circulation est incertain à cette extrémité et différents modèles ne s'entendent pas sur l'emplacement de la limite nord de ce modèle.

Les plus importants impacts des changements climatiques sont souvent reliés aux changements dans les extrêmes climatiques. Il y a eu plus de journées extrêmement chaudes et moins de journées extrêmement froides — une tendance qui devrait continuer dans le futur. Des températures plus élevées dans le futur contribueront à une augmentation de la possibilité d'incendies (« conditions météorologiques propices aux incendies »). Les précipitations extrêmes sont également projetées d'augmenter dans le futur, même si le dossier d'observation n'a pas encore montré des données probantes de changements cohérents dans les précipitations extrêmes de courte durée dans tout le pays.

On peut s'attendre à ce que le changement de la fréquence de la température et des précipitations extrêmes mène à un changement dans la probabilité d'événements comme les feux de forêt, les sécheresses et les inondations. Le domaine émergent « d'attribution des événements » offre une perspective sur la façon dont les changements climatiques peuvent avoir influé sur la probabilité d'événements comme les inondations au Sud de l'Alberta en 2013 ou les feux de forêt de Fort McMurray en 2016. Dans les deux cas, les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine peuvent avoir augmenté le risque de tels événements extrêmes par rapport à leur risque dans un climat préindustriel.

4.1: Introduction

La température et les précipitations ont une influence cruciale sur la société humaine et les systèmes naturels. Elles influencent les décisions concernant les plantes à cultiver dans une région donnée, les exigences de chauffage et de refroidissement de bâtiments ainsi que la taille des collecteurs d'eaux pluviales. La température et les précipitations sont également les variables climatiques les mieux surveillées et les plus largement étudiées. Le présent chapitre porte sur les changements dans les températures et précipitations moyennes et extrêmes dans tout le Canada. Il évalue les changements passés, notre compréhension des causes de ces changements ainsi que les projections futures. De plus, nous évaluons les indices climatiques dérivés des données de température et de précipitations qui sont pertinentes pour les impacts ou la planification, comme les degrés-jours de réchauffement, de refroidissement et de croissance. Le présent rapport évalue également les changements de l'environnement physique qui sont influencés principalement par une combinaison de température et de précipitation, comme les conditions météorologiques propices aux incendies (voir l'encadré 4.2); les conditions de neige et de glace (voir le chapitre 5); et le ruissellement des rivières, l'inondation et la sécheresse (voir le chapitre 6). D'autres variables climatiques, comme les vitesses moyennes et extrêmes des vents, ne sont pas évaluées dans ce rapport en raison des analyses limitées d'observations disponibles et des recherches limitées sur les mécanismes et les causes des changements observés et projetés au Canada, même s'ils sont très pertinents pour des questions comme la production d'énergie éolienne et les codes du bâtiment.

Les événements climatiques extrêmes entraînent souvent des répercussions climatiques coûteuses. Un simple événement, comme les inondations au Sud de l'Alberta en 2013, peut entraîner des dommages évalués à des milliards de dollars. Afin de mieux comprendre si les changements climatiques ont contribué à l'occurrence d'un événement extrême particulier, nous évaluons l'étendue à laquelle l'influence humaine sur le climat peut avoir joué un rôle dans ces événements catastrophiques. Comme la science de l'attribution des événements est encore en émergence, nous fournissons une description générale de l'attribution des événements, tout comme deux exemples : les inondations au Sud de l'Alberta en 2013 et les feux de forêt de Fort McMurray en 2016.

Le climat canadien est vaste, variant d'une région à l'autre. Il fluctue naturellement d'une année à l'autre et d'une décennie à l'autre, selon le contexte des changements climatiques causés par l'humain. Comme nous le verrons, la variabilité naturelle interne du climat¹⁶ est un facteur important pour certains des changements observés discutés dans le présent chapitre. La variabilité naturelle interne du climat renvoie aux variations à court terme autour du climat moyen à un endroit ou dans une région. Certains aspects de la variabilité naturelle sont associés à des « modes de variabilité » à grande échelle, qui sont des caractéristiques solides dans le système climatique avec des caractéristiques spatiales et temporelles identifiables (voir le chapitre 2, encadré 2.5). Par exemple, la phase positive (chaude) d'El Niño–Oscillation australe (ENSO), connue sous le nom d'El Niño, a tendance à être associée en hiver à des températures de l'air plus chaudes et à des conditions plus sèches dans une grande partie du Canada. Le contraire est vrai lors de la phase négative (froide) de ENSO, connue sous le nom de la Niña. D'autres modes de variabilité communs sont également caractérisés par des phases positives (chaudes) ou négatives (froides) qui ont tendance à être associées à des températures saisonnières plus chaudes ou plus froides pour presque toutes les régions ou l'ensemble du Canada (voir le chapitre 2, encadré 2.5).

16 Il existe deux types de variabilité du climat qui ne sont pas attribuables à l'activité humaine. L'un découle de la nature chaotique du système climatique; il s'agit de la variabilité naturelle interne du climat. L'autre est en réaction aux forçages naturels externes, comme ceux causés par les activités solaires et volcaniques (voir le chapitre 2).

4.2: Température

Message clé

Il est quasiment certain que le climat du Canada s'est réchauffé et qu'il se réchauffera davantage dans l'avenir. Les augmentations observées et projetées de la température moyenne au Canada sont environ le double des augmentations correspondantes dans la température moyenne mondiale, peu importe le scénario d'émissions.

Message clé

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

Message clé

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 causé par l'influence des activités humaines.

Message clé

On prévoit que la température moyenne annuelle et saisonnière augmentera partout, avec des changements plus importants dans le Nord du Canada pendant l'hiver. En moyenne dans l'ensemble du pays, le réchauffement projeté dans un scénario de faibles émissions est d'environ 2 °C supérieur à celui de la période de référence de 1986 à 2005, demeurant relativement stable après 2050, alors que dans un scénario d'émissions élevées, les augmentations de température continueront, atteignant plus de 6 °C d'ici la fin du XXI^e siècle.

Message clé

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

Message clé

Les changements extrêmes de température, dans les observations et les projections futures, sont cohérents avec le réchauffement. Les températures extrêmement chaudes sont devenues plus chaudes, tandis que les températures extrêmement froides sont devenues moins froides. Ces tels changements sont prévus de continuer dans l'avenir, l'ampleur du changement étant proportionnelle à l'ampleur du changement de la température moyenne.

Les températures mentionnées dans le présent chapitre sont les températures de l'air en surface, habituellement mesurées à 2 m au-dessus du sol, qui ont un effet immédiat sur la santé et le confort humains, qui jouent un rôle important dans la détermination des types de cultures qu'un agriculteur peut faire pousser et influencent le fonctionnement des écosystèmes locaux. Les températures au Canada varient largement dans l'ensemble du pays. La température la plus basse jamais enregistrée est -63°C , enregistrée à Snag (Yukon), le 3 février 1947. La température la plus élevée jamais enregistrée est 45°C , enregistrée à Midale et Yellow Grass (Saskatchewan), le 5 juillet 1937. La température moyenne annuelle fournit une simple mesure de la chaleur globale dans une région : elle varie d'environ 10°C dans certaines régions du sud à environ -20°C dans le Grand Nord. En saison, cette variabilité est encore plus marquée. Les moyennes hivernales varient de -5°C dans le sud à environ -35°C dans le Grand Nord, tandis que les moyennes estivales varient d'environ 22°C dans le sud à 2°C dans le Grand Nord (Gullett et Skinner, 1992).

À certains endroits au Canada, les températures ont été observées depuis longtemps. Par exemple, un site d'observation à Toronto a fourni des données quotidiennes de température continuellement depuis 1840. De nombreux sites ont des dossiers sur la température qui remontent à un siècle ou plus. Cependant, la disponibilité des données de température est inégalement répartie dans l'ensemble du pays ou au cours de différentes périodes. Les sites d'observation ont une distribution relativement dense dans la partie peuplée du Sud du Canada, alors que, pour la majorité du pays, surtout le Nord du Canada, les observations sont rares (voir la figure 4.1) et très peu de sites d'observation précèdent 1948. Par conséquent, l'analyse des changements passés de température pour l'ensemble du Canada est limitée à la période de 1948 à maintenant, alors que 1900 peut être utilisé comme point de départ pour les données du Sud du Canada (Vincent et coll., 2015; DeBeer et coll., 2016).

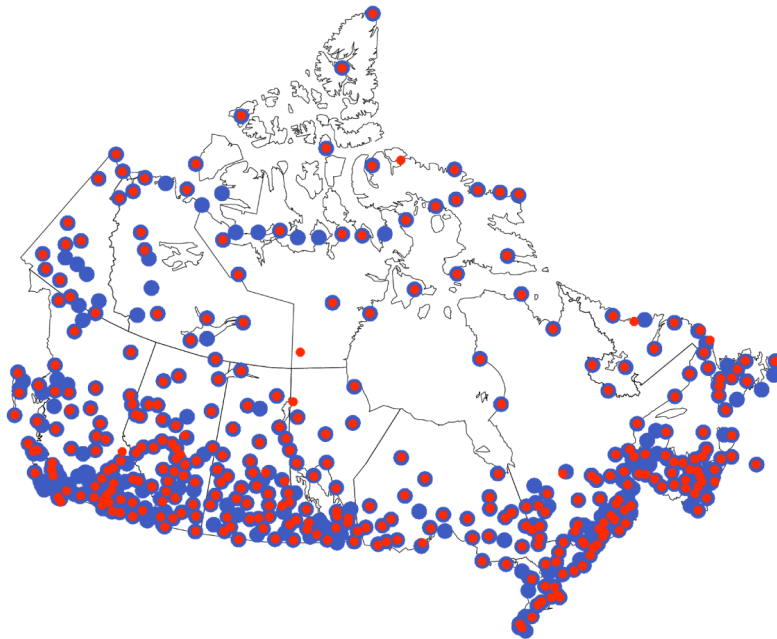


Figure 4.1 : Stations d'observation pour les précipitations et la température au Canada

Emplacements des stations pour lesquelles les observations à long terme des précipitations (bleu) et de la température (rouge) existent et pour lesquelles les données ont été homogénéisées (pour la température) et ajustées (pour les changements dans les instruments pour les précipitations). Au cours des deux dernières décennies, la technologie de surveillance a évolué et le réseau d'observation du climat a fait la transition des observations manuelles à automatiques. Des procédures sont en cours d'élaboration pour joindre et ajuster les

observations passées manuelles et celles actuelles automatiques du climat afin de préserver la continuité pour la surveillance du climat et l'analyse des tendances (Milewska et coll. 2018; Vincent et coll. 2018).

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

La température est également un indicateur clé de la réponse du climat face aux émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques, étant donné que l'augmentation des concentrations de GES entraîne un réchauffement de la couche inférieure de l'atmosphère (voir le chapitre 2, section 2.3). Même si l'objectif original des observations historiques était de surveiller la variabilité quotidienne et saisonnière du climat et d'appuyer les prédictions météorologiques, aujourd'hui ces observations appuient également les études d'impact des changements climatiques et les services climatiques. Des instruments de surveillance, des sites d'observation et l'environnement alentour, ainsi que les procédures d'observation, ont fait l'objet de changements au cours du dernier siècle pour répondre aux nouveaux besoins et pour introduire une nouvelle technologie. Ces changements introduisent également des changements non climatiques, appelés les « inhomogénéités des données », dans les dossiers de données. Les inhomogénéités influencent la fiabilité de l'évaluation des tendances à long terme si on ne les prend pas en compte (Milewska et Vincent, 2016; Vincent et coll., 2012, voir l'encadré 4.1). En particulier, la réduction du nombre de sites d'observation habités, de nombreux étant convertis en stations automatiques, a nécessité l'intégration de données de ces différentes sources, ce qui s'est révélé difficile. Les changements identifiés dans le dossier des données historiques reflètent les changements du climat et de l'inhomogénéité des données (Vincent et coll., 2012). Les techniques pour éliminer l'inhomogénéité des données climatiques (« homogénéisation des données climatiques ») ont été développées pour identifier ce genre d'artéfact dans les dossiers climatiques et les éliminer (voir l'encadré 4.1; Vincent et coll., 2002, 2012, 2017; Wang et coll., 2007, 2010).

Encadré 4.1: Un exemple de l'inhomogénéité des données

Le dossier de la température observée à Amos (Québec) montre la façon dont les changements dans les emplacements et leur environnement peuvent influencer l'estimation des changements à long terme du climat. Entre 1927 et 1963, l'abri Stevenson à la station d'Amos était situé au bas d'une colline (voir la figure 4.2a) et a été déplacé après 1963 (voir la figure 4.2 b) au niveau du sol à plusieurs mètres de son emplacement d'origine. Le site était protégé par des arbres et un bâtiment entre 1927 et 1963, ce qui aurait pu empêcher l'air froid de s'écouler librement pendant la nuit. Le site actuel a une exposition ouverte et est plus représentatif de la région environnante. Une comparaison soigneuse des données sur la température à ce site avec celles d'une station à proximité a révélé un changement en deux étapes, un de $-0,8^{\circ}\text{C}$ en 1927 et un autre de $1,3^{\circ}\text{C}$ en 1963 (voir la figure 4.2c). Les fichiers historiques de la station ne fournissent pas de renseignements sur la cause de la première étape, mais il est possible que l'abri ait également été déplacé à ce moment-là. Ces différences ont entraîné une tendance à la hausse de $2,4^{\circ}\text{C}$ dans les données originales de température pour la période de 1951 à 1995 (voir la figure 4.2d) tandis que, après que les artéfacts ont été retirés, un réchauffement de seulement $0,8^{\circ}\text{C}$ était montré.

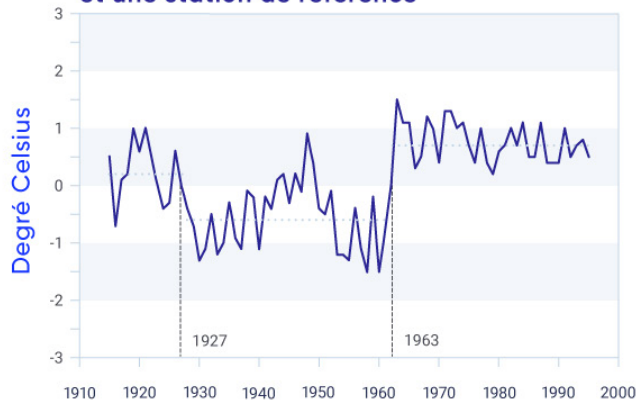
a) Site d'Amos, Québec, avant 1963



b) Site d'Amos, Québec, après 1963



c) La différence de température entre Amos et une station de référence



d) La température avant et après l'ajustement

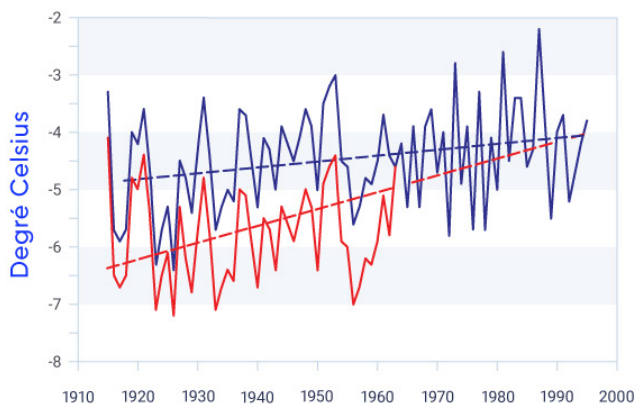


Figure 4.2 : La façon dont les artéfacts dans les données des instruments peuvent influencer sur les estimations de changement de température

Des photos du site d'observation d'Amos (Québec) prises par des inspecteurs montrant le site avant 1963 (a) et après 1963 (b). Les séries chronologiques (c) de la différence dans la moyenne annuelle des températures minimales quotidiennes entre Amos et une station de référence montrent une étape de diminution en 1927 et une étape d'augmentation en 1963; les séries chronologiques (d) originales (ligne rouge) et ajustées (ligne bleue) de la moyenne annuelle des températures minimales quotidiennes. La ligne en pointillés rouge représente une tendance à la hausse de 2,4 °C pour la période de 1915 à 1995 dans la série originale, alors que la ligne en pointillés bleus montre une tendance à la hausse de 0,8 °C pour la période de 1915 à 1995 dans les données homogénéisées.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

4.2.1: La température moyenne

4.2.1.1: Changements observés

La température moyenne annuelle au Canada a augmenté de 1,7 °C (plage probable de 1,1 °C à 2,3 °C¹⁷) entre 1948 et 2016 (mise à jour de Vincent et coll., 2015; figure 4.3 et tableau 4.1), soit environ le double de l'augmentation observée à l'échelle mondiale (0,8 °C pour la période de 1948 à 2016 selon l'ensemble de données sur la température moyenne à la surface du globe produites par le Met Office Hadley Centre et le Climatic Research Unit à la University of East Anglia, au Royaume-Uni, HadCRUT4 [Osborn et Jones, 2014]). Le réchauffement n'était pas uniforme entre les saisons, avec un réchauffement très prononcé en hiver qu'en été. La température moyenne a augmenté de 3,3 °C en hiver, de 1,7 °C au printemps, de 1,5 °C en été et de 1,7 °C en automne entre 1948 et 2016 (voir la figure 4.4 et le tableau 4.1). Les changements de température sont significatifs au seuil de 5 % c.-à-d., il y a seulement 5 % de possibilité que de tels changements sont dus au hasard). De plus, le réchauffement était inégalement réparti dans l'ensemble du pays. Les plus importantes augmentations dans la température moyenne annuelle étaient dans le nord-ouest, où elle a augmenté de plus de 3 °C dans certaines régions. La température moyenne annuelle dans le Nord du Canada a augmenté de 2,3 °C (plage probable de 1,7 °C à 3,0 °C) de 1948 à 2016, soit environ trois fois le taux de réchauffement moyen mondial. Le réchauffement était beaucoup moins important dans le sud-est du Canada, où la température moyenne a augmenté de moins de 1 °C dans certaines zones maritimes. Le réchauffement hivernal était prédominant dans le nord de la Colombie-Britannique et de l'Alberta, du Yukon, des Territoires du Nord-Ouest et de l'ouest du Nunavut, allant de 4 °C à 6 °C au cours de la période de 1948 à 2016. Le printemps a une tendance de réchauffement semblable, mais de plus faible ampleur. Le réchauffement estival était beaucoup moins important qu'en hiver et au printemps, mais l'ampleur du réchauffement était généralement plus uniforme dans l'ensemble du pays que pendant les autres saisons. Lors de l'automne, la majorité du réchauffement était observé dans les régions du nord-est du Canada (principalement le nord des Territoires du Nord-Ouest, au Nunavut et au nord du Québec). En plus des températures plus élevées, la réduction du manteau neigeux (voir le chapitre 5) et une fonte des neiges plus précoce (voir le chapitre 6) indiquent également que le Canada s'est réchauffé.

17 La plage d'incertitude de 95 % de la tendance estimée basée sur la température annuelle est de 1,1 °C–2,3 °C. Ici et ailleurs, dans le présent chapitre, des plages d'incertitude calculées de 90 % et 95 % sont référées comme des plages probables (nominalement représentant 66 % de probabilité). Cela est fait pour prendre en compte les autres sources d'incertitude, comme la quantité de données et la couverture spatiale et temporelle.

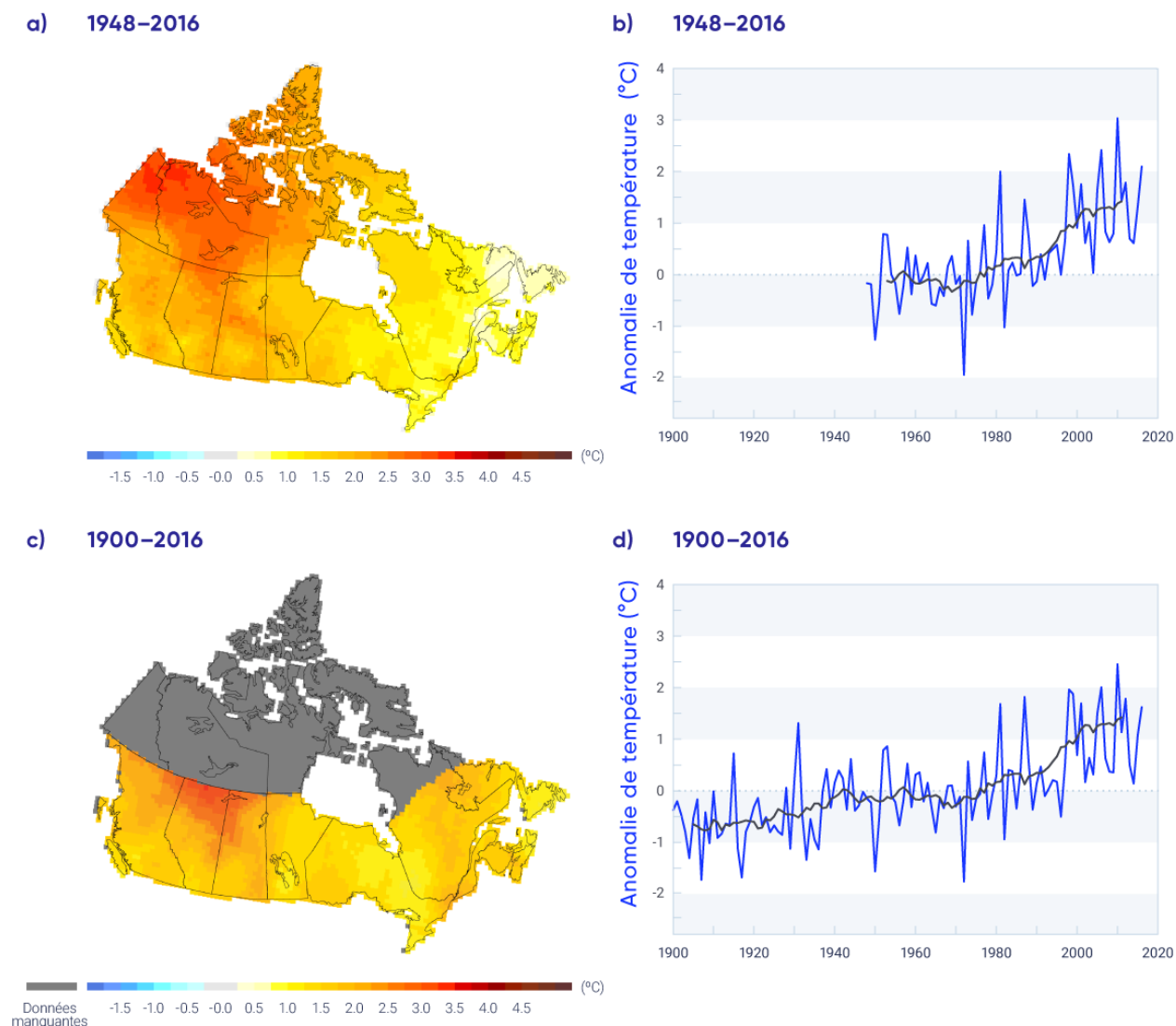


Figure 4.3 : Tendances dans les températures annuelles au Canada

Les changements observés (°C) dans les températures annuelles de (a) 1948 à 2016 et (c) de 1900 à 2016. Les changements sont calculés selon les tendances linéaires lors des périodes respectives. Les anomalies de température annuelle (écart par rapport à la moyenne de base) sont exprimées par rapport à la moyenne pour la période de 1961 à 1990 (b) pour l'ensemble du Canada et (d) pour le Sud du Canada (au sud du 60^e degré de latitude nord); les lignes noires sont des moyennes continues de 11 ans. Des estimations sont dérivées des données interpolées des stations. Il n'y a pas suffisamment de données dans le Nord du Canada pour calculer sûrement les tendances de réchauffement de 1900 à 2016.

SOURCE DE LA FIGURE : MISE À JOUR DE LA FIGURE 2 DE VINCENT ET COLL., 2015.

Tableau 4.1: Changements observés dans les températures moyennes saisonnières et annuelles de 1948 à 2016 pour six régions et pour l'ensemble des terres canadiennes^a

RÉGION	CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE, °C				
	Annuel	Hiver	Printemps	Été	Automne
Colombie-Britannique	1,9	3,7	1,9	1,4	0,7
Prairies	1,9	3,1	2,0	1,8	1,1
Ontario	1,3	2,0	1,5	1,1	1,0
Québec	1,1	1,4	0,7	1,5	1,5
Atlantique	0,7	0,5	0,8	1,3	1,1
Nord du Canada	2,3	4,3	2,0	1,6	2,3
Canada	1,7	3,3	1,7	1,5	1,7

^a Les changements sont représentés par des tendances linéaires tout au long de la période. Des estimations sont dérivées des données interpolées des stations. Il y a un manque de données pour le Nord du Canada (voir la figure 4.1).

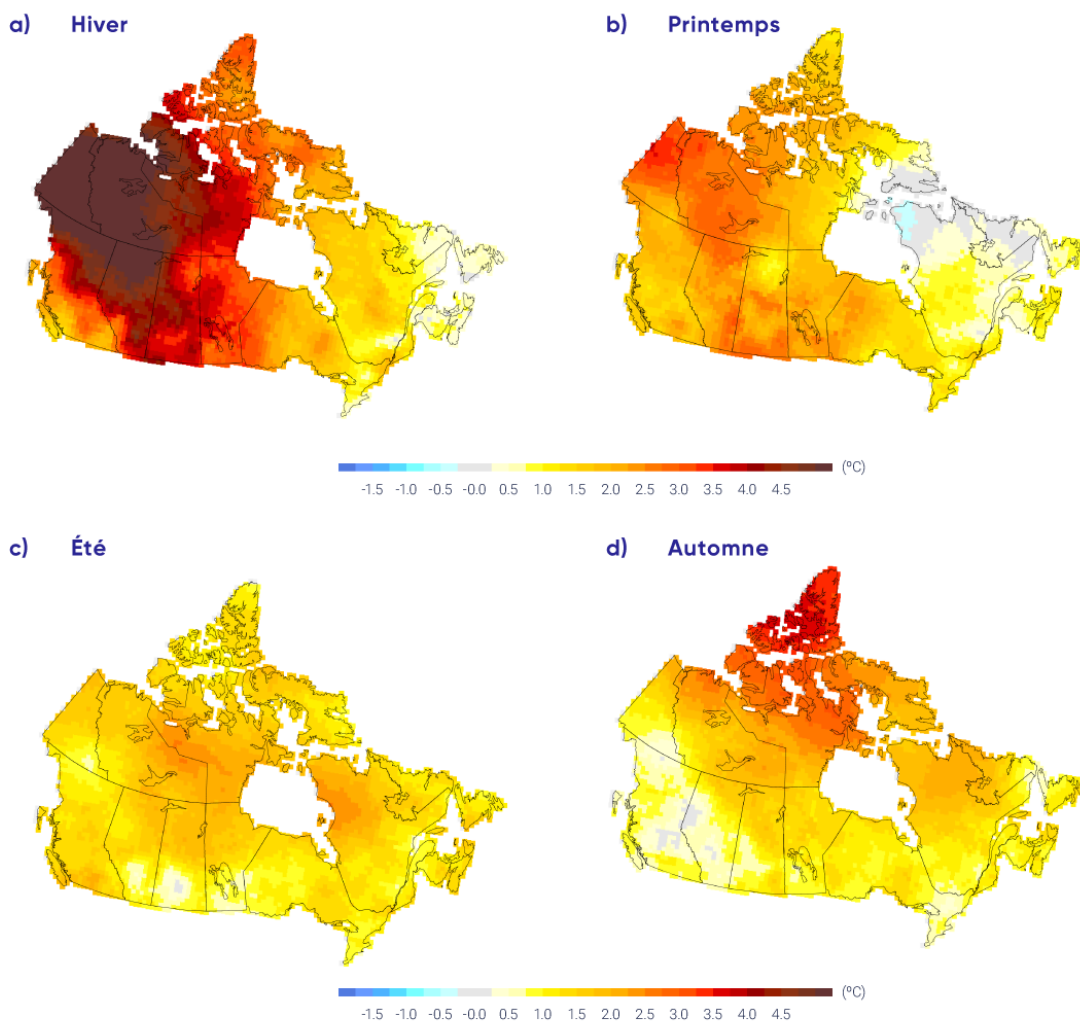


Figure 4.4: Tendances dans les températures saisonnières dans l'ensemble du Canada

Les changements observés (°C) dans les températures moyennes saisonnières de 1948 à 2016 pour les quatre saisons. Des estimations sont dérivées selon les tendances linéaires des données interpolées des stations.

SOURCE DE LA FIGURE : MISE À JOUR DE LA FIGURE 3 DE VINCENT ET COLL., 2015.

Dans le Sud du Canada, la température moyenne annuelle a augmenté de 1,9 °C entre 1900 et 2016 (mise à jour de Vincent et coll., 2015). Ce réchauffement est significatif au seuil de 5 %. Cette température n'a pas augmenté régulièrement au fil du temps. La température a augmenté jusqu'aux environs des années 1940, a diminué légèrement jusqu'en 1970 et a ensuite augmenté rapidement jusqu'en 2016. Ce comportement à long terme de la température est cohérent avec celui observé à l'échelle mondiale (voir le chapitre 2, section 2.2.1; Hartmann et al., 2013), mais l'ampleur du réchauffement au Canada est plus importante. La température moyenne au Sud du Canada a augmenté de 2,8 °C en hiver, de 2,2 °C au printemps, de 1,7 °C en été et de 1,6 °C en automne pendant la même période.

4.2.1.2: Causes des changements observés

Il est *extrêmement probable* que les activités humaines ont causé plus de la moitié de l'augmentation observée dans la température moyenne à la surface du globe pour la période de 1951 à 2010 (Bindoff et coll., 2013). Cet effet causal a été établi à l'aide d'une analyse de détection et d'attribution, comparant les changements observés avec la variabilité naturelle interne du climat et les réponses attendues du climat face aux activités humaines (voir le chapitre 2, section 2.3.4). Les changements climatiques deviennent détectables s'ils sont importants lorsqu'on les compare à la variabilité naturelle interne du climat, et le changement est attribué à l'activité humaine si celui-ci est (1) cohérent avec les « empreintes » attendues du changement d'origine humaine, comme le démontrent les modèles climatiques (voir le chapitre 3); (2) incohérent avec les autres causes possibles. Pour le Canada et l'Arctique, où la variabilité naturelle interne de la température est élevée, l'attribution du réchauffement observé est plus difficile qu'à l'échelle mondiale. Néanmoins, des preuves de l'influence anthropique sur les températures canadiennes ont émergé (Gillett et coll., 2004; Zhang et coll., 2006; Wan et coll., 2018) avec une contribution détectable de réchauffement dans les températures saisonnières et annuelles ainsi que dans les températures extrêmes.

Deux modes de variabilité naturelle interne du climat qui influencent les températures au Canada sont l'oscillation décennale du Pacifique (ODP) et l'oscillation nord-atlantique (NAO) (voir le chapitre 2, encadré 2.5). Environ 0,5 °C du réchauffement observé sur le 1,7 °C pendant de la période de 1948 à 2012 peut être expliqué par une relation linéaire entre l'ODP et la NAO. Tenant compte que cela est complètement en raison de la variabilité naturelle du climat, environ 1,1 °C (plage probable de 0,6 °C à 1,5 °C) de l'augmentation de 1,7 °C dans la température moyenne annuelle au Canada pour la période de 1948 à 2012 peut être attribué à l'influence humaine (voir la figure 4.5; Wan et coll., 2018). Il y a 33 % de probabilité que l'influence anthropique augmente la température canadienne d'au moins 0,9 °C. Il est probable que plus de la moitié du réchauffement observé au Canada soit causé par l'influence humaine. Les effets de la variabilité naturelle interne du climat sur les tendances de la température canadienne varient entre les différentes parties du Canada, augmentant la tendance du réchauffement dans l'ouest du Canada et réduisant la tendance du réchauffement dans l'est du Canada au cours de la seconde moitié du XX^e siècle (Vincent et coll., 2015). La détection de l'influence anthropique sur la température canadienne est également confirmée par d'autres preuves indépendantes, y compris l'attribution des changements de la température de l'Arctique à l'influence des GES et des aérosols (Najafi et coll., 2015). La réduction de la couverture de neige au printemps et la réduction subséquente de l'écoulement fluvial estival en Colombie-Britannique ont été attribuées au changement climatique anthropique (Najafi et coll. 2017 a, 2017b; voir le chapitre 6, section 6.2.1). Le réchauffement anthropique a également augmenté le risque d'incendie en Alberta (Kirchmeier-Young et coll., 2017 a; voir section 4.4.1.2).

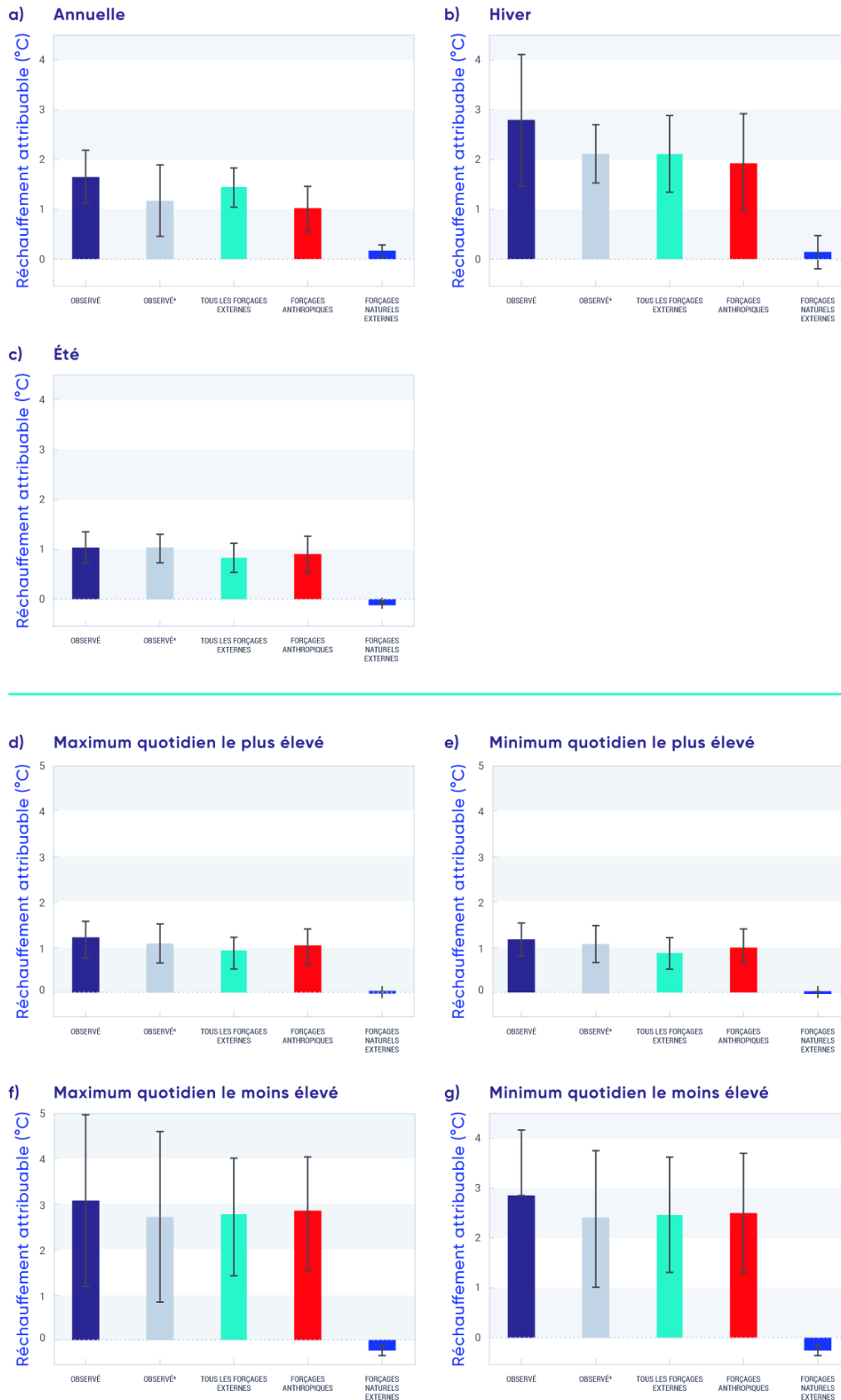


Figure 4.5 : Attribution des causes de changements de température au Canada pour la période de 1948 à 2012

Les changements dans les observations (Observé, bleu marin) et dans les données observées en éliminant les effets de l'oscillation décennale du Pacifique et de l'oscillation nord-atlantique (Observé*, gris), de même que la contribution estimée de tous les forçages externes, les forçages anthropiques et les forçages naturels externes (effets des activités solaires et volcaniques) aux changements observés dans les températures moyennes (a, b, c) et extrêmes (d, e, f, g) pour l'ensemble du Canada pendant la période de 1948 à 2012. Les panneaux du haut montrent les estimations de réchauffement attribuable pour les températures moyennes (a) annuelles, (b) hivernales et (c) estivales. Les panneaux du bas montrent les estimations du réchauffement attribuable pour les températures extrêmes, y compris (d) la température annuelle maximale quotidienne la plus élevée, (e) la température annuelle minimale quotidienne la plus élevée, (f) la température annuelle maximale la moins élevée et (g) la température annuelle minimale quotidienne la moins élevée. Les minces barres noires indiquent la plage d'incertitude de 5 % à 95 %.

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE LA FIGURE 7 DE WAN ET COLL., 2018

4.2.1.3: Changements projetés et incertitudes

Les modèles du système terrestre ou les modèles climatiques mondiaux fournissent des projections des futurs changements climatiques en se basant sur une gamme de scénarios futurs incorporant les GES, les aérosols et le changement dans l'utilisation des terres (voir chapitre 3, section 3.3.1). La cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5, voir le chapitre 3, encadré 3.1) était un effort de coordination internationale qui a produit un ensemble multimodèle de projections climatiques. Les résultats de cet ensemble spécifique au Canada ont été générés en utilisant les résultats de 29 modèles CMIP5 selon trois scénarios : un scénario de faibles émissions (RCP2.6), un scénario d'émissions moyennes (RCP4.5) et un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les résultats pour un quatrième scénario qui faisait partie du protocole de CMIP5 (RCP6.0) sont également disponibles, mais provenant d'un plus petit nombre de modèles. Ces résultats de multimodèles sont décrits par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC, 2016) et sont disponibles pour téléchargement sur le site Web de Données et scénarios climatiques canadiens (<<http://scenarios-climatiques.canada.ca/index.php?page=cmip5-intro>>).

Les projections multimodèles relatives aux changements climatiques pour les périodes de 2031 à 2050 et de 2081 à 2100 (par rapport à la période de référence de 1986 à 2005) sont illustrées pour le Canada pour un scénario de faibles émissions (RCP2.6) et un scénario d'émissions élevées (RCP8.5), couvrant l'éventail des scénarios possibles. Le scénario de faibles émissions assume des réductions des émissions rapides et importantes et presque aucune émission pour le siècle actuel, alors que le scénario d'émissions élevées présente une croissance continue des émissions au cours du siècle. Les deux périodes ont été choisies pour fournir de l'information pour le court terme (de 2031 à 2050), lorsque les différences dans les scénarios d'émissions sont limitées et pour la fin du siècle (de 2081 à 2100), lorsque les réponses climatiques aux scénarios de faibles émissions et d'émissions élevées auront divergé considérablement. La différence de cette dernière période illustre l'avantage climatique à long terme en lien avec des efforts d'atténuation agressifs. Le changement médian multimodèle est montré sous forme de carte, accompagné de séries chronologiques des moyennes provenant de modèles individuels, qui sont calculées pour toutes les régions terrestres canadiennes. Les encadrés et symboles de moustaches à la droite des séries chronologiques fournissent une indication de l'étendue entre les modèles pour la période de 2081 à 2100. Les valeurs pour les différentes régions au Canada sont fournies dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Changement projeté dans la température moyenne annuelle de l'air à la surface pour six régions et pour l'ensemble des terres canadiennes, par rapport à la période de 1986 à 2005^a

RÉGION ^b	SCÉNARIO; PÉRIODE; TEMPÉRATURE MÉDIANE (25E, 75E PERCENTILE), °C			
	RCP2.6		RCP8.5	
	2031–2050	2081–2100	2031–2050	2081–2100
Colombie-Britannique	1,3 (0,8, 1,9)	1,6 (1,1, 2,1)	1,9 (1,4, 2,5)	5,2 (4,3, 6,2)
Prairies	1,5 (1,1, 2,1)	1,9 (1,2, 2,2)	2,3 (1,7, 3,0)	6,5 (5,2, 7,0)
Ontario	1,5 (1,1, 2,1)	1,7 (1,0, 2,1)	2,3 (1,7, 2,9)	6,3 (5,3, 6,9)
Québec	1,5 (1,0, 2,1)	1,7 (1,0, 2,2)	2,3 (1,7, 2,9)	6,3 (5,3, 6,9)
Atlantique	1,3 (0,9, 1,8)	1,5 (0,9, 2,0)	1,9 (1,5, 2,4)	5,2 (4,5, 6,1)
Nord	1,8 (1,2, 2,5)	2,1 (1,3, 2,5)	2,7 (2,0, 3,5)	7,8 (6,2, 8,4)
Canada	1,5 (1,0, 2,1)	1,8 (1,1, 2,5)	2,3 (1,7, 2,9)	6,3 (5,6, 7,7)

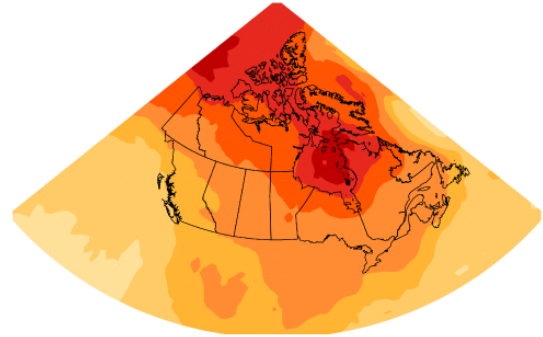
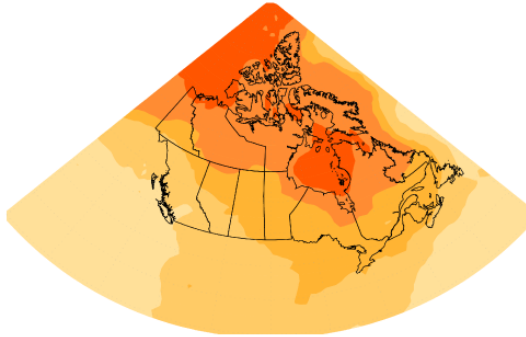
^a La médiane ou la valeur du 50e percentile est fondée sur l'ensemble des multimodèles du CMIP5. La valeur du 25e percentile indique que 25 % des projections du modèle CMIP5 ont des changements inférieurs à cette valeur. La valeur du 75e percentile indique que 25 % des projections du modèle CMIP5 ont des changements supérieurs à cette valeur.

^b La tendance linéaire à partir de 1948 (année où débute l'analyse des tendances climatiques pour l'ensemble du Canada selon des observations historiques) jusqu'à 1996 (le point milieu de la période 1986-2005) a été calculée à 1,2 °C.

^c Les régions sont définies par les frontières politiques; le « Nord » comprend les trois territoires (voir la figure 1.1).

Les changements de températures projetés pour l'hiver (moyenne de décembre à février), l'été (moyenne de juin à août) et la moyenne annuelle sont montrés dans les figures 4.6, 4.7 et 4.8 respectivement. L'augmentation du réchauffement aux latitudes plus élevées est évidente dans les moyennes hivernale et annuelle. Il s'agit d'un solide élément de projections du climat, à la fois pour le Canada et le monde entier, et est attribuable à une combinaison de facteurs, y compris les réductions de la neige et de la glace (et donc une réduction de l'albédo) et une augmentation du transport de la chaleur provenant des latitudes australes (voir le chapitre 3). Cette amplification dans les hautes latitudes n'est pas évidente sur les cartes estivales parce que, au-dessus de l'océan Arctique, les températures estivales demeurent près de 0 °C – la température de fonte de la neige et de la glace marine. À court terme (de 2031 à 2050), les différences dans les tendances et l'ampleur entre le scénario de faibles émissions (RCP2.6) et le scénario d'émissions élevées (RCP8.5) sont modestes (dans l'ordre de 0,5 °C à 1 °C). Cependant, pour la fin du siècle (de 2081 à 2100), les différences deviennent très importantes. Selon le scénario d'émissions élevées, les températures projetées augmentent environ de 4 °C plus haut que selon le scénario de faibles émissions pour la moyenne de l'ensemble du Canada. Les différences sont encore plus importantes dans le Nord du Canada et dans l'Arctique en hiver. Dans le Sud du Canada, le changement projeté des températures hivernales est plus important dans l'est que dans l'ouest, la Colombie-Britannique projetant de se réchauffer légèrement moins que le reste du Canada. Le changement projeté estival est plus uniforme dans l'ensemble du pays.

- a) **Changement de température RCP2.6 de 2031 à 2050** Décembre à février
b) **Changement de température RCP8.5 de 2031 à 2050** Décembre à février



- c) **Changement de température RCP2.6 de 2081 à 2100** Décembre à février
d) **Changement de température RCP8.5 de 2081 à 2100** Décembre à février

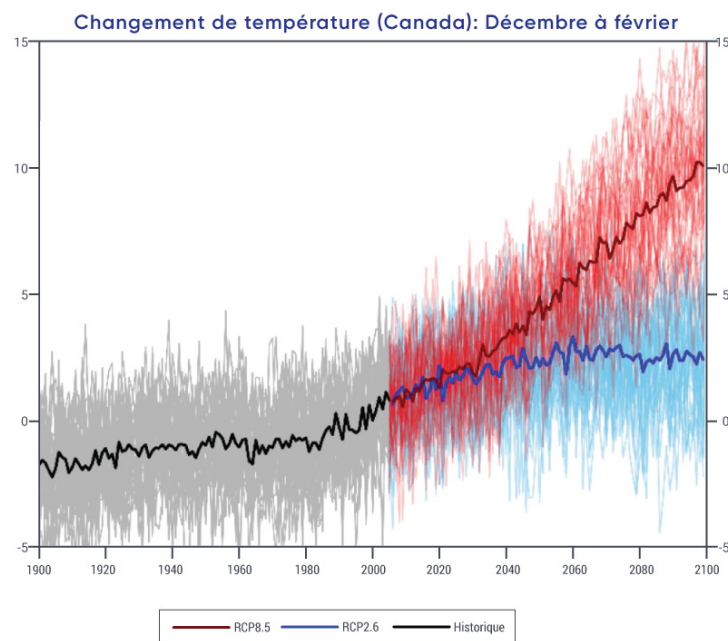
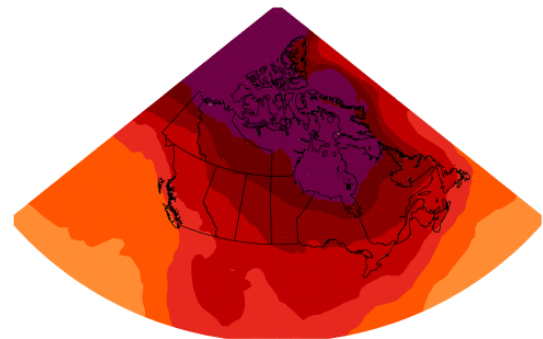
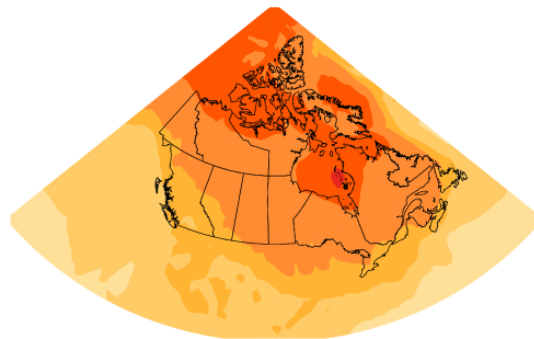


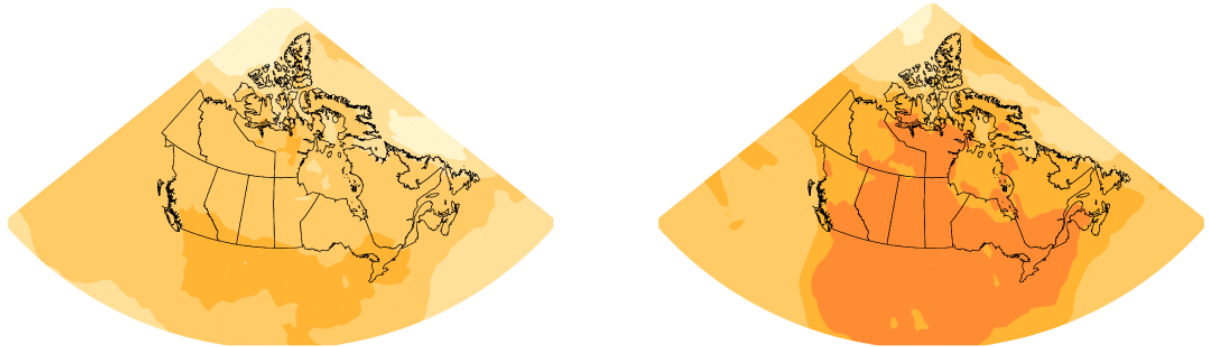
Figure 4.6: Les changements de températures projetés pour la saison hivernale



Des cartes et séries chronologiques du changement projeté de température (°C) pour décembre, janvier et février, représenté par la médiane de l'ensemble multimodèle CMIP5. Les changements sont relatifs à la période de 1986 à 2005. Les cartes supérieures montrent le changement de température pour la période de 2031 à 2050 et les cartes inférieures, pour la période de 2081 à 2100. Les cartes du côté gauche montrent les changements entraînés par le scénario de faibles émissions (RCP2.6) alors que les cartes du côté droit montrent les changements du scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les séries chronologiques dans le bas de la figure montrent le changement de température en moyenne pour les régions terrestres du Canada au cours de la période de 1900 à 2100. Les lignes minces montrent les résultats des modèles individuels du CMIP5 et la large ligne correspond à la moyenne multimodèle. L'écart entre les modèles, évident dans les lignes minces, est quantifié par les tracés de boîtes et moustaches à la droite de chaque panneau. Ils montrent, pour la période de 2081 à 2100, la valeur du 5^e, 25^e, 50^e (médiane), 75^e et 95^e percentile.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

- a) **Changement de température RCP2.6 de 2031 à 2050** Juin à août
Juin à août
- b) **Changement de température RCP8.5 de 2031 à 2050** Juin à août
Juin à août



- c) **Changement de température RCP2.6 de 2081 à 2100** Juin à août
Juin à août
- d) **Changement de température RCP8.5 de 2081 à 2100** Juin à août
Juin à août

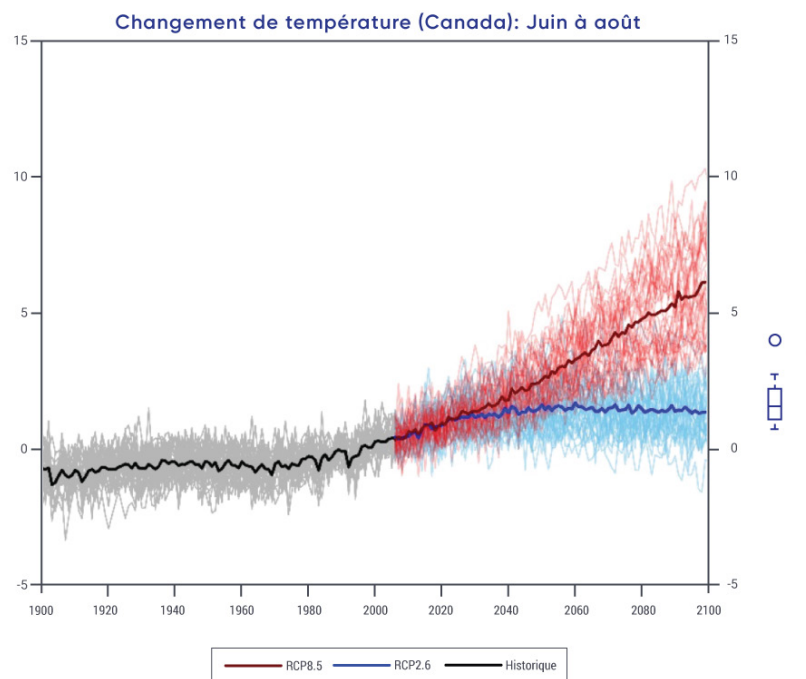
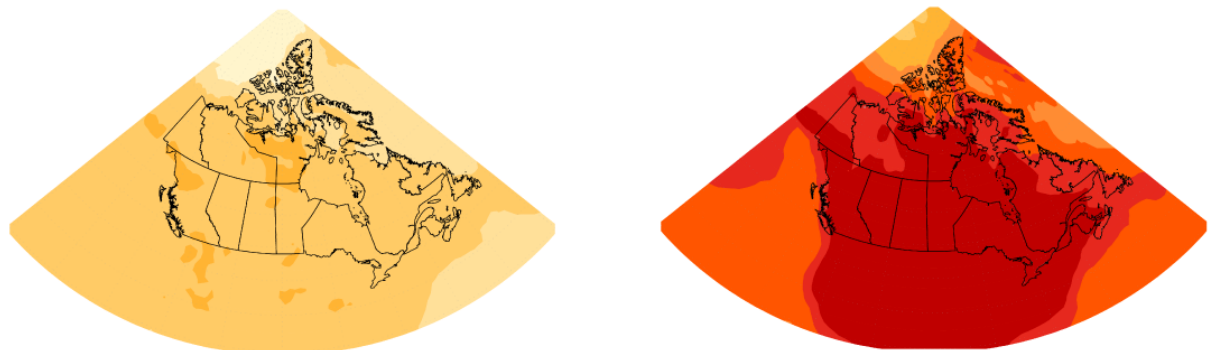
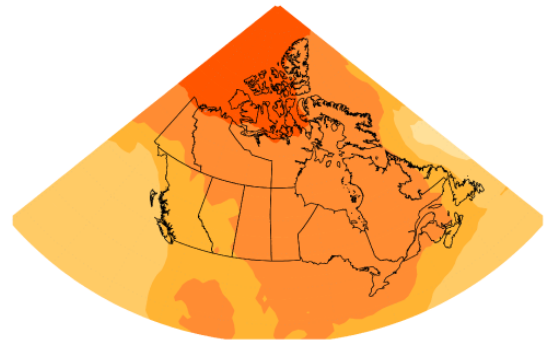
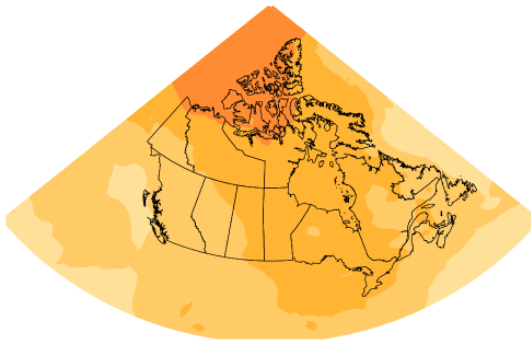


Figure 4.7 : Les changements de températures projetés pour la saison estivale

Des cartes et séries chronologiques du changement projeté de température (°C) pour juin, juillet et août représenté par la médiane de l'ensemble multimodèle CMIP5. Les changements sont relatifs à la période de 1986 à 2005. Les cartes supérieures montrent le changement de température pour la période de 2031 à 2050 et les cartes inférieures, pour la période de 2081 à 2100. Les cartes du côté gauche montrent les changements entraînés par le scénario de faibles émissions (RCP2.6) alors que les cartes du côté droit montrent les changements du scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les séries chronologiques dans le bas de la figure montrent le changement de température en moyenne pour les régions terrestres du Canada et au cours de la période de 1900 à 2100. Les lignes minces montrent les résultats des modèles individuels du CMIP5 et la large ligne correspond à la moyenne multimodèle. L'écart entre les modèles, évident dans les lignes minces, est quantifié par les tracés de boîtes et moustaches à la droite de chaque panneau. Ils montrent, pour la période de 2081 à 2100, la valeur du 5^e, 25^e, 50^e (médiane), 75^e et 95^e percentile.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

- a) **Changement de température RCP2.6 de 2031 à 2050** Annuel b) **Changement de température RCP8.5 de 2031 à 2050** Annuel



- c) **Changement de température RCP2.6 de 2081 à 2100** Annuel d) **Changement de température RCP8.5 de 2081 à 2100** Annuel

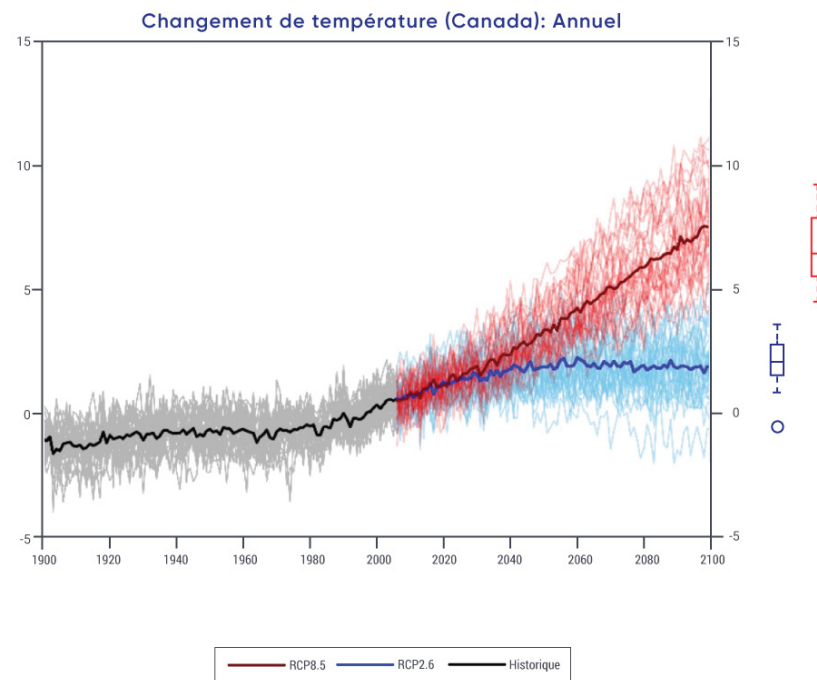
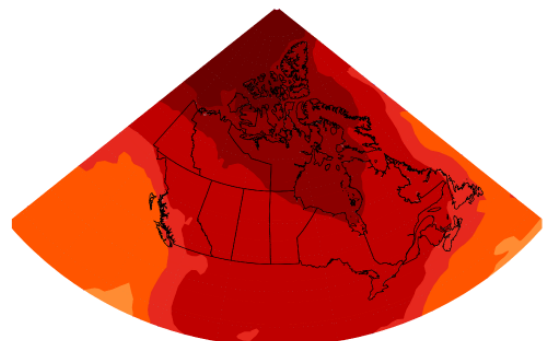
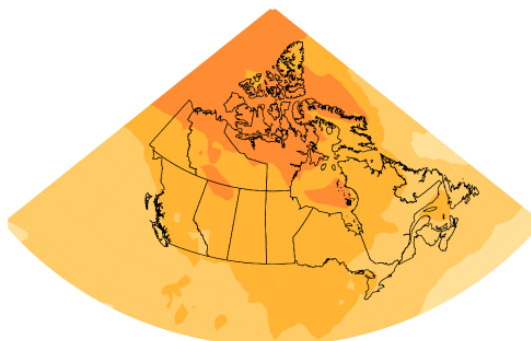


Figure 4.8 : Les changements de températures projetés annuels

Des cartes et séries chronologiques du changement projeté de la température (°C) moyenne annuelle, représenté par la médiane de l'ensemble multimodèle de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Les changements sont relatifs à la période de 1986 à 2005. Les cartes supérieures montrent le changement de température pour la période de 2031 à 2050 et les cartes inférieures, pour la période de 2081 à 2100. Les cartes du côté gauche montrent les changements entraînés par le scénario de faibles émissions (RCP2.6) alors que les cartes du côté droit montrent les changements du scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les séries chronologiques dans le bas de la figure montrent le changement de température en moyenne pour les régions terrestres du Canada et au cours de la période de 1900 à 2100. Les lignes minces montrent les résultats des modèles individuels de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) et la large ligne correspond à la moyenne multimodèle. L'écart entre les modèles, évident dans les lignes minces, est quantifié par les tracés de boîtes et moustaches à la droite de chaque panneau. Ils montrent, pour la période de 2081 à 2100, la valeur du 5^e, 25^e, 50^e (médiane), 75^e et 95^e percentile.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

Les cartes des figures 4.6, 4.7 et 4.8 illustrent la projection médiane de l'ensemble multimodèle CMIP5 – certains modèles projettent des changements plus importants et d'autres, de plus petits changements. La répartition entre les modèles offre une indication de l'incertitude de la projection discutée dans le chapitre 3, section 3.3.2. La répartition présente dans l'ensemble CMIP5 est seulement une mesure ponctuelle d'incertitude. L'incertitude réelle pourrait être plus importante parce que les modèles CMIP5 peuvent ne pas représenter la gamme complète des représentations possibles de tous les processus physiques pertinents (Kirtman et coll., 2013). La répartition entre les modèles comprend également la variabilité naturelle d'année en année, qui continue d'exister dans le futur autant qu'elle existait par le passé. Même lorsqu'on fait une moyenne pour une région aussi étendue que le Canada, les différences dans les températures projetées parmi les modèles sont de l'ordre de quelques degrés. Selon un scénario de faibles émissions (RCP2.6), le réchauffement moyen annuel au Canada se stabilise à environ 1,8 °C plus élevé en 2050 que la période de référence de 1986 à 2005 alors que, selon un scénario d'émissions élevées (RCP8.5), le réchauffement annuel continue tout au long du XXI^e siècle et au-delà, atteignant environ 6,3°C au-dessus de la période de référence d'ici 2100. Des valeurs supplémentaires pour l'ensemble du Canada et pour diverses régions sont présentées dans le tableau 4.2.

Le changement de température est l'un des indicateurs clés d'un climat changeant et bien d'autres variables climatiques sont directement ou indirectement liées à la température. Les changements dans la température moyenne sont la réponse projetée face aux émissions de GES et d'aérosols provenant d'activités humaines et la variabilité naturelle interne du climat continuera de se superposer sur ces changements forcés. La variabilité naturelle interne du climat est simulée par les modèles climatiques utilisés pour faire des projections de futurs changements climatiques et cela devient évident dans les séries chronologiques de la variabilité d'année en année de la température moyenne au Canada dans les figures 4.6, 4.7 et 4.8 (les lignes minces individuelles). En effet, cette variabilité d'année en année ressemble beaucoup à ce qui a été observé par le passé (voir la figure 4.2). En revanche, la réponse sous-jacente forcée (estimée par la moyenne multimodèle – la large ligne dans les figures) est une valeur changeante lentement et de façon monotone qui suit de près les émissions cumulatives de GES depuis l'ère préindustrielle (voir le chapitre 3, section 3.4.1). Dans l'évaluation des effets d'un réchauffement du climat, cette combinaison d'un lent changement forcé et de la variabilité naturelle interne est importante à garder à l'esprit – le futur continuera d'avoir des périodes de chaleur et de froid extrême superposées à un lent réchauffement forcé par les activités humaines.

Étant donné que les éléments du système climatique mondial sont étroitement reliés entre eux, le changement de température dans une région particulière, comme le Canada, est étroitement lié au changement de la moyenne mondiale. Cela est illustré dans le panneau gauche de la figure 4.9, qui montre le changement de la température moyenne au Canada par rapport au changement de la température moyenne mondiale. Comme indiqué précédemment, on prévoit que l'augmentation de la température moyenne canadienne sera environ deux fois plus importante que le taux moyen mondial, peu importe le scénario de forçage. Donc, la relation entre le changement de la température canadienne et mondiale demeure constante, comme le montre le fait que les résultats des différents scénarios sont tous alignés. Le lien entre le changement de la température moyenne mondiale et canadienne présente un moyen d'estimer les implications du changement mondial pour le Canada selon des scénarios de forçage alternatifs. Autrement dit, les effets estimés selon un scénario de forçage donné peuvent être échelonnés pour estimer les effets d'un autre scénario de forçage, puisque le rapport entre le changement de température canadien et le changement de température mondiale demeure à peu près constant. Bien sûr, cela suppose que les effets ont une corrélation directe avec la température (ce qui n'est pas toujours le cas).

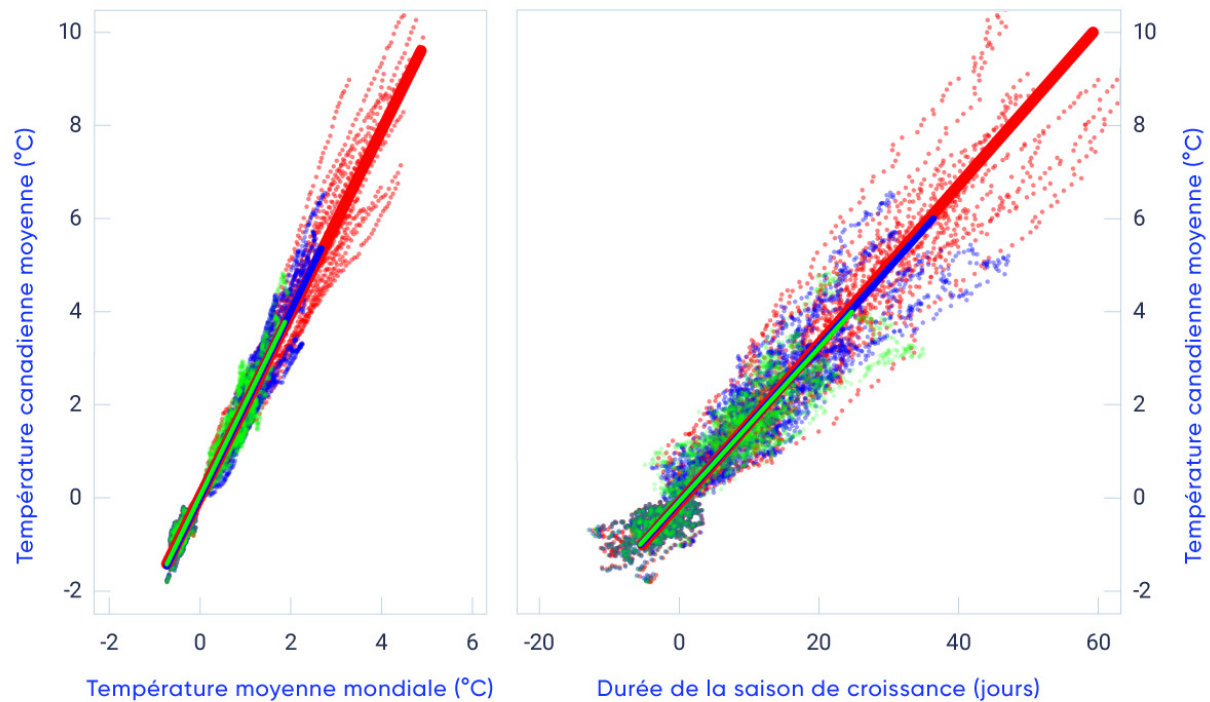


Figure 4.9 : Liens entre la température moyenne mondiale et le changement de la température moyenne au Canada et les changements dans la durée de la saison de croissance

Le panneau de gauche montre le changement de température moyenne canadienne tracé contre le changement de température moyenne mondiale (en °C pour les moyennes d'une période de 20 ans par rapport à la période de 1986 à 2005) des simulations des modèles de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) pour trois différents scénarios de forçage (vert : RCP2.6; bleu : RCP4.5; rouge : RCP8.5). Les larges lignes sont des ajustements linéaires des moindres carrés, alors que les lignes pointillées plus minces correspondent aux résultats des modèles individuels. Le panneau de droite montre la longueur changeante de la saison de croissance (en jours, voir le chapitre 1, section 1.2) pour les cultures de la saison chaude dans les Prairies canadiennes, en tant que fonction de changement dans la température moyenne canadienne.

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE LI ET COLL., 2018.

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC a conclu que « les températures moyennes mondiales continueront d'augmenter au cours du XXI^e siècle si les émissions de GES continuent à un rythme soutenu » (Collins et coll., 2013, p. 1031). En raison des liens entre les changements à la moyenne mondiale et à la température moyenne canadienne, il est quasiment certain que la température continuera également d'augmenter au Canada tant que les émissions de GES continueront.

4.2.2: Températures extrêmes et autres indices

Cette sous-section décrit les changements dans les extrêmes de température et les autres indices pertinents aux évaluations d'impact. Tous sont dérivés des données de température quotidienne. Certains indices, comme les températures annuelles les plus élevées et les plus basses du jour ou de la nuit, représentent les extrêmes de température et ont des applications étendues, la conception des bâtiments, par exemple. D'autres sont importants pour des utilisateurs particuliers. Par exemple, les degré-jours sont un indicateur couramment utilisé pour la demande de refroidissement ou de chauffage du bâtiment et de la quantité de chaleur disponible pour la croissance des cultures. Les degré-jours de chauffage (la somme annuelle de la température moyenne quotidienne en dessous de 18 °C) ou les degrés-jours de refroidissement (la somme annuelle de la température moyenne quotidienne au-dessus de 18 °C) sont utilisés pour la planification des services énergétiques, alors que les degré-jours de croissance (la somme de la température moyenne quotidienne au-dessus de 5 °C lors de la saison de croissance) sont un indice important pour l'agriculture. Certains indices, comme le nombre de jours où la température maximale quotidienne est au-dessus de 30 °C ou lorsque la température minimale quotidienne est au-dessus de 22 °C, ont d'importantes répercussions sur la santé (Casati et coll., 2013). Les changements observés dans les indices et extrêmes de température indiquent que les événements de chaleur deviennent plus intenses et plus fréquents, alors que les événements froids deviennent moins intenses et moins fréquents. Ceux-ci ont d'importantes répercussions; par exemple, les jours hivernaux d'extrême froid sont importants pour limiter la présence de certains indésirables forestiers (Goodsman et coll., 2018).

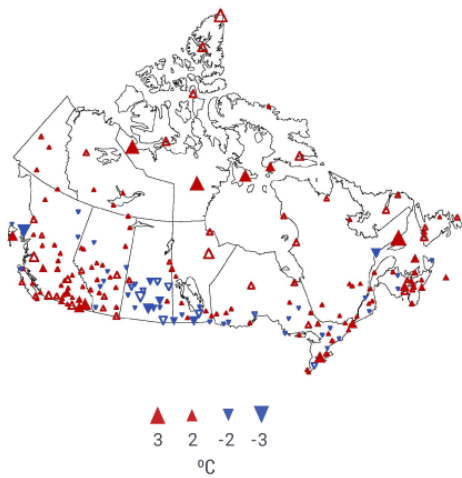
4.2.2.1: Changements observés

La température annuelle maximale quotidienne la plus élevée, la moyenne pour l'ensemble du pays, a augmenté de 0,61 °C entre 1948 et 2016 (mise à jour de Wan et coll., 2018). Les plus importantes augmentations étaient dans le Nord du Canada, alors que les diminutions étaient observées dans le sud des Prairies (voir la figure 4.10a). La température maximale quotidienne la plus élevée qui est enregistrée une fois en 20 ans, en moyenne, a également augmenté (Wang et coll., 2014). La température annuelle minimale quotidienne la moins élevée, la moyenne pour l'ensemble du pays, a augmenté de 3,3 °C entre 1948 et 2016, le plus intense réchauffement se produisant dans l'ouest (voir la figure 4.10 b) (mise à jour de Wan et coll., 2018). La température minimale quotidienne la moins élevée qui est enregistrée une fois en 20 ans, en moyenne, a augmenté plus fortement (Wang et coll., 2014). En général, les températures extrêmement froides augmentaient beaucoup plus rapidement que les températures extrêmement chaudes, une constatation cohérente avec un réchauffement plus important en hiver qu'en été, de même qu'un réchauffement plus important pendant la nuit que pendant le jour.

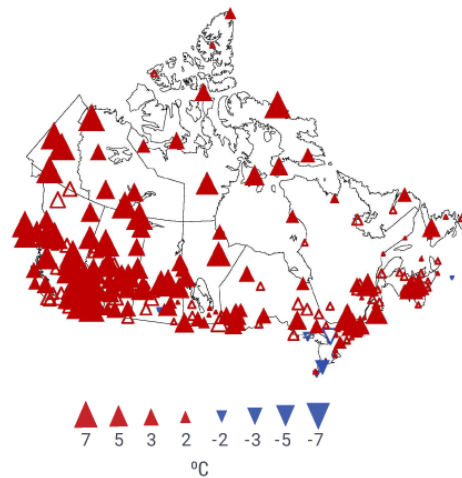
Les indices de haute température, comme les journées et les nuits chaudes, sont particulièrement pertinents en ce qui concerne la santé publique. Les journées chaudes, définies comme étant des journées avec une température maximale supérieure à 30 °C, sont rarement observées dans les régions au nord du 60^e degré de latitude nord. Dans le Sud du Canada, le nombre de journées chaudes a augmenté annuellement d'environ 1 à 3 jours à quelques stations au cours de la période de 1948 à 2016 (voir la figure 4.10c; voir également Vincent et coll., 2018). La plupart des endroits au Canada ne sont pas suffisamment chauds pour avoir des nuits chaudes, définies comme des nuits avec une température minimale quotidienne supérieure à 22 °C, et le nombre de nuits chaudes a significativement augmenté à seulement quelques stations dans le sud de l'Ontario et du Québec.

Le réchauffement en hiver et au printemps a entraîné une diminution significative dans le nombre de jour de gel (jours avec une température minimale quotidienne de 0 °C ou moins) et de jour de glace (jour avec une température maximale quotidienne de 0 °C ou moins) de même qu'un raccourcissement des saisons hivernales (Vincent et coll., 2018). En moyenne pour l'ensemble du pays, les jours de gel ont diminué de plus de 15 et les jours de glace de plus de 10 jours entre 1948 et 2016. Ces changements sont cohérents dans l'ensemble du pays. Par conséquent, la saison sans gel a été prolongée de 20 jours, commençant environ 10 jours plus tôt et finissant environ 10 jours plus tard. Les degré-jours de chauffage ont diminué alors que les degré-jours de refroidissement ont augmenté (voir la figure 4.10e et f). La durée des saisons de croissance (voir la figure 4.10d) et le nombre de degré-jours de croissance ont également augmenté. La saison de croissance, qui commence lorsqu'il y a six jours consécutifs avec une température moyenne quotidienne au-dessus de 5 °C au printemps ou à l'été et qui se termine lorsque cette condition n'est plus satisfaite vers la fin de l'année, commence plus tôt et se termine plus tard, entraînant une augmentation de la durée de la saison de croissance d'environ 15 jours pour la période de 1948 à 2016. Avec une saison de croissance plus longue, le nombre de degré-jours de croissance augmente.

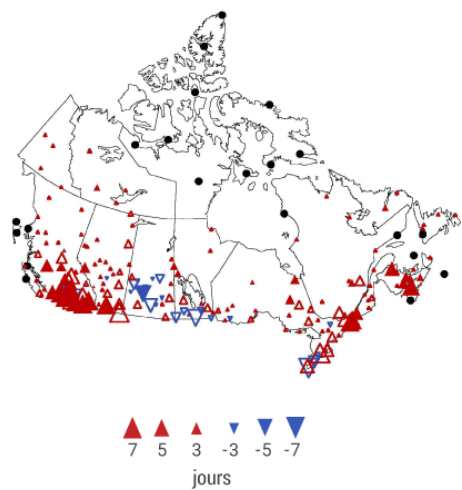
a) Maximum quotidien le plus élevé (°C)



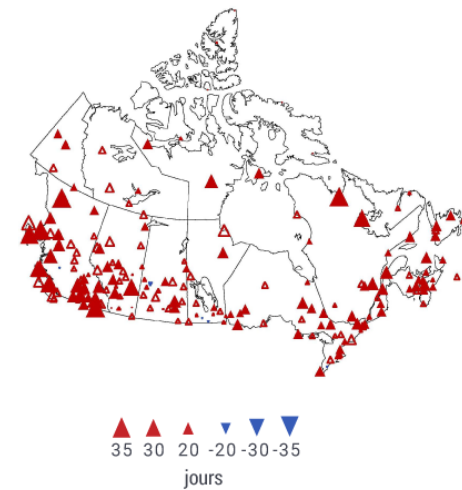
b) Minimum quotidien le moins élevé (°C)



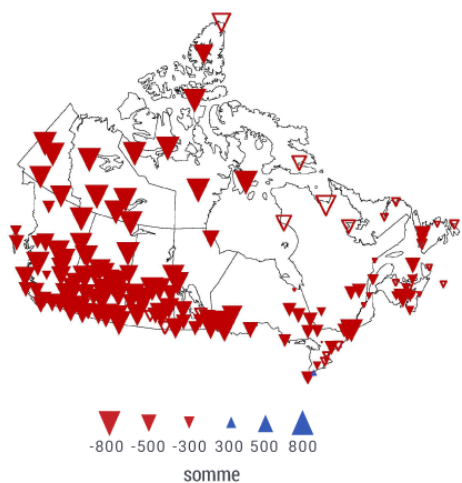
c) Nombre de journées chaudes (jours)



d) Durée de la saison de croissance (jours)



e) Degré-jours de chauffage (°C-jour)



f) Degré-jours de refroidissement (°C-jour)

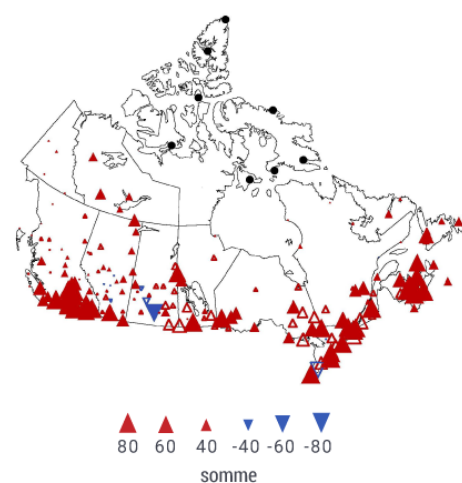


Figure 4.10 : Changement dans les indicateurs de température sélectionnés, de 1948 à 2016

Les changements observés dans : (a) la température annuelle maximale quotidienne la plus élevée, (b) la température annuelle minimale quotidienne la moins élevée, (c) le nombre annuel de journées chaudes (lorsque la température maximale quotidienne est supérieure à 30 °C), (d) la durée de la saison de croissance, (e) les degrés-jours de chauffage et (f) les degrés-jours de refroidissement. Les changements sont calculés selon les tendances linéaires lors de la période de 1948 à 2016. Les triangles solides indiquent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. Les points noirs sur (c) et (f) indiquent les stations où les journées chaudes ou la température moyenne quotidienne au-dessus de 18 °C ne se produisent habituellement pas. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure.

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE VINCENT ET COLL., 2018.

4.2.2.2: Causes des changements observés

Il est **très probable** que le forçage anthropique ait contribué aux changements observés dans la fréquence et l'intensité des extrêmes de température quotidienne à l'échelle mondiale depuis le milieu du XX^e siècle (Bindoff et coll., 2013; voir également le chapitre 2, section 2.3.4). Plusieurs études de détection ont montré que la température minimale quotidienne la moins élevée (Zwiers et coll., 2011; Min et coll., 2013; Kim et coll., 2015) et la température annuelle maximale quotidienne la plus élevée (Wang et coll., 2017) ont été influencées par les activités humaines dans trois sous-régions de l'Amérique du Nord. Au Canada, une augmentation de 3,2 °C dans la température annuelle minimale quotidienne la moins élevée a été observée de 1948 à 2016 (Wan et coll., 2018). Seulement une petite fraction (environ 0,5 °C) de cette augmentation peut être liée à la variabilité naturelle interne du climat et l'influence anthropique peut avoir contribué jusqu'à 2,8 °C d'augmentation (plage probable de 1,5 °C à 4,2 °C) pour le réchauffement (voir la figure 4.5). De plus, la majeure partie du réchauffement observé dans la température annuelle maximale quotidienne la plus élevée peut également être attribuée à l'influence anthropique. Dans l'ensemble, la plus grande partie de l'augmentation des températures quotidiennes la plus froide (probable) et la plus chaude (**degré de confiance élevé**) durant l'année au Canada de 1948 à 2012 peut être attribuée à l'influence anthropique.

Bien qu'il y ait un manque d'études attribuant directement les changements observés dans d'autres indices de température, il y a un **degré de confiance élevé** que la plus grande partie des changements observés dans ces indices de températures sont également attribuables à une influence anthropique. Il est plus difficile de détecter l'influence anthropique dans les valeurs comme la température minimale quotidienne la moins élevée, dont on prend la lecture qu'une fois par année, que parmi d'autres indices de température qui intègrent l'information provenant de plusieurs prises de données par année. Ces indices sont moins touchés par la variabilité naturelle interne, tout en maintenant les réponses climatiques face au forçage externe.

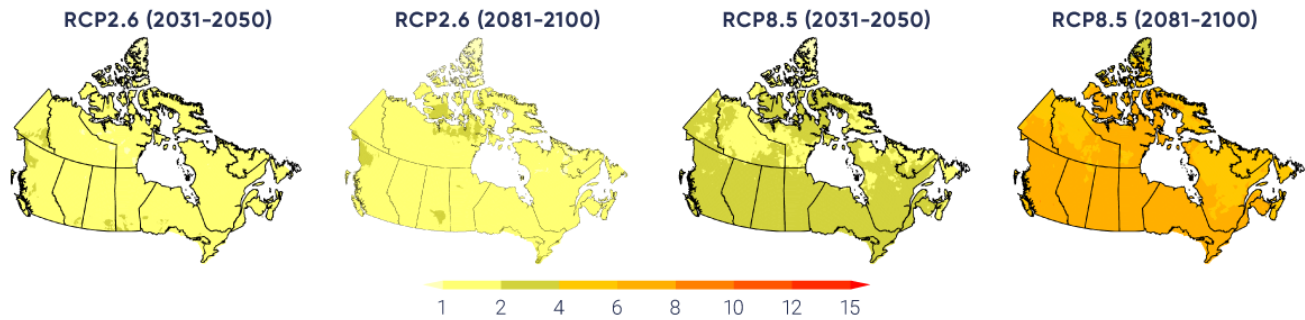
4.2.2.3: Changements projetés et incertitudes

Les modèles utilisés pour faire des projections futures du climat sont discutés dans le chapitre 3, section 3.3. Lorsqu'on utilise les projections des modèles climatiques pour les études d'impact, il est souvent important de tenir compte du fait que le climat actuel simulé par le modèle peut différer du climat observé – une réflexion sur le biais des modèles (Flato et coll., 2013). De nombreux indices de température sont reliés aux seuils absolus (comme la température de congélation), et donc, les biais

sur la moyenne peuvent considérablement altérer leur utilité. Par conséquent, lorsque les valeurs absolues sont importantes, une certaine forme de correction du biais est nécessaire. Il s'agit d'une méthode de correction des résultats du modèle afin d'éliminer, dans la mesure du possible, l'influence du biais du modèle. Les évaluations des changements projetés dans les indices de température dont il est question dans ce paragraphe sont, à moins d'indication contraire, fondées sur des données sur le plan statistique à échelle réduite et dont les biais ont été corrigés (Li et coll., 2018; Murdock et coll., 2014; Werner and Cannon, 2016; voir le chapitre 3, section 3.5).

Les températures quotidiennes extrêmes, chaudes et froides, sont projetés d'augmenter considérablement (voir la figure 4.11). La température annuelle maximale quotidienne la plus élevée est projetée de suivre les changements projetés pour la température moyenne estivale, mais à un taux légèrement plus élevé (la plus importante différence entre les deux est de moins de 0,5 °C, apparaissant lors de la période de 2081 à 2100 selon le scénario d'émissions élevées [RCP8.5]). La température minimale quotidienne la moins élevée est projetée de se réchauffer plus rapidement que la température moyenne hivernale pour la majorité du Canada, augmentant la température minimale extrême dans le Sud du Canada d'environ 3 °C d'ici la fin du siècle selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Le tableau 4.3 résume les changements projetés pour le Canada. Par exemple, en moyenne pour le pays, les températures annuelles maximales quotidiennes les plus élevées sont projetées d'augmenter de 1,4 °C au cours de la période de 2031 à 2050 selon le scénario de faibles émissions (RCP2.6) et de 2 °C pour la même période selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5) par rapport au climat actuel (de 1986 à 2005). L'augmentation projetée correspondante pour la période de 2081 à 2100 selon le scénario de faibles émissions (RCP2.6) est de 1,5 °C, seulement un peu plus élevé que l'augmentation de 2031 à 2050. Une augmentation beaucoup plus importante, d'environ 6 °C, est prévue pour la période de 2081 à 2100 selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5).

a) Température annuelle maximale quotidienne la plus élevée (°C)



b) Température annuelle minimale quotidienne la moins élevée (°C)

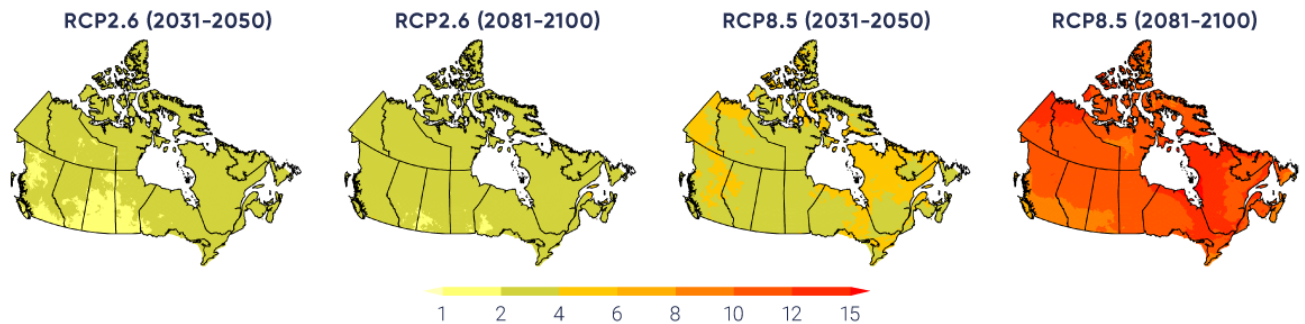


Figure 4.11 : Projections futures pour certains indices de température (extrêmes)

Médiane multimodèle des changements projetés pour (a) la température annuelle maximale quotidienne la plus élevée, (b) la température annuelle minimale quotidienne la moins élevée. Toutes les cartes sont basées sur des données sur le plan statistique à échelle réduite de température dont le biais a été corrigé provenant des simulations de 24 modèles du système terrestre. Les deux panneaux de gauche montrent les projections de 2031 à 2050 et de 2081 à 2100 selon le scénario de faibles émissions (RCP2.6), alors que les deux panneaux de droite montrent des projections de 2031 à 2050 et de 2081 à 2100 selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5), respectivement.

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE LI ET COLL., 2018.

Tableau 4.3: Changements multimodèles dans les indicateurs de température^a

RÉGION ^b	SCÉNARIO; PÉRIODE; MÉDIANE (25E, 75E PERCENTILE)			
	RCP2.6		RCP8.5	
	2031–2050	2081–2100	2031–2050	2081–2100
Température annuelle maximale quotidienne la plus élevée, °C				
Colombie-Britannique	1,7 (0,9, 2,4)	1,7 (1,2, 2,4)	2,3 (1,6, 3,2)	6,7 (4,9, 7,9)
Prairies	1,6 (0,9, 2,3)	1,6 (1,1, 2,4)	2,5 (1,8, 3,1)	6,9 (5,2, 8,2)
Ontario	1,6 (1,0, 2,4)	1,5 (0,8, 2,2)	2,5 (1,9, 3,0)	6,6 (5,2, 7,7)
Québec	1,4 (0,8, 2,2)	1,3 (0,7, 2,0)	2,1 (1,5, 2,7)	5,9 (4,7, 7,1)
Atlantique	1,4 (0,9, 1,9)	1,2 (0,6, 1,9)	1,9 (1,4, 2,4)	5,5 (4,6, 6,5)
Nord	1,3 (0,6, 2,2)	1,5 (0,7, 2,2)	1,8 (0,9, 2,7)	5,7 (3,6, 7,3)
Canada	1,4 (0,7, 2,3)	1,5 (0,8, 2,2)	2,0 (1,2, 2,8)	6,1 (4,2, 7,5)
Température annuelle minimale quotidienne la moins élevée, °C				
Colombie-Britannique	2,1 (1,1, 3,7)	2,7 (1,4, 4,2)	3,7 (2,4, 5,3)	10,1 (8,5, 11,7)
Prairies	2,1 (1,3, 3,3)	2,5 (1,6, 3,8)	3,5 (2,5, 4,9)	10,5 (9,3, 12,8)
Ontario	2,6 (1,9, 3,5)	2,7 (2,0, 3,8)	3,9 (2,9, 4,7)	11,7 (10, 13,8)
Québec	2,8 (1,9, 3,9)	3,2 (2,0, 4,4)	4,2 (3,2, 5,3)	12,6 (10,7, 15,7)
Atlantique	2,8 (1,8, 3,8)	3,0 (1,8, 4,5)	3,8 (2,8, 4,9)	11,2 (9,6, 13,6)
Nord	2,6 (1,8, 3,4)	2,9 (1,9, 4,0)	3,9 (3,0, 4,8)	11,1 (9,4, 14,0)
Canada	2,5 (1,7, 3,5)	2,8 (1,8, 4,1)	3,8 (2,9, 4,9)	11,2 (9,5, 13,8)
Nombre annuel de journées chaudes, jours				
Colombie-Britannique	1,6 (0,7, 2,5)	1,5 (0,8, 2,5)	2,5 (1,7, 3,6)	16,0 (9,0, 20,0)
Prairies	4,5 (2,5, 6,7)	4,6 (2,6, 6,8)	7,2 (5,2, 9,4)	34,3 (22,8, 40,1)
Ontario	5,4 (3,6, 7,1)	4,7 (2,8, 6,8)	8,8 (6,8, 10,8)	38,0 (28,1, 44,5)
Québec	1,7 (1,0, 2,3)	1,4 (0,8, 2,1)	2,7 (1,9, 3,4)	14,5 (10,1, 17,3)
Atlantique	1,4 (0,9, 2,0)	1,2 (0,6, 1,8)	2,1 (1,5, 2,8)	12,1 (9,3, 16,7)
Nord	0,3 (0,1, 0,5)	0,3 (0,1, 0,5)	0,5 (0,3, 0,7)	3,5 (2,0, 5,1)
Canada	1,6 (0,9, 2,3)	1,5 (0,9, 2,3)	2,6 (1,8, 3,3)	13,2 (8,8, 16,2)
Durée de saison de croissance pour les cultures de la saison chaude, jours				
Colombie-Britannique	17,6 (12, 23,5)	22 (14,3, 28,5)	23,3 (17,7, 29,3)	61,1 (48,1, 70,5)
Prairies	11,5 (6,4, 16,0)	13,5 (9,1, 18,3)	15,5 (11,0, 20,5)	43,6 (35,6, 50,8)
Ontario	11,8 (6,9, 17,5)	13,0 (8,0, 19,1)	17,0 (11,8, 22,8)	44,4 (36,9, 53,7)
Québec	13,6 (8,7, 18,7)	14,0 (7,7, 20,2)	19,3 (13,2, 24,8)	50,1 (40,2, 62,1)
Atlantique	13,7 (8,6, 18,2)	14,3 (8,9, 19,6)	18,6 (13,7, 25,2)	51,1 (42,5, 63,8)
Nord	8,8 (4,7, 13,4)	10,2 (5,0, 15,3)	12,9 (7,3, 18,4)	37,8 (25,5, 49,9)
Canada	10,8 (6,3, 15,6)	12,4 (7,0, 17,7)	15,3 (9,9, 20,9)	42,8 (31,9, 53,8)

Tableau 4.3: Changements multimodèles dans les indicateurs de température^a

	Degré-jours de refroidissement, °C-jour			
Colombie-Britannique	16 (9, 22)	16 (10, 25)	26 (19, 34)	168 (97, 211)
Prairies	52 (32, 74)	55 (32, 79)	85 (66, 108)	386 (260, 461)
Ontario	67 (44, 90)	58 (44, 89)	108 (88, 125)	408 (306, 491)
Québec	25 (18, 37)	23 (16, 32)	42 (33, 49)	183 (136, 236)
Atlantique	28 (19, 40)	29 (18, 37)	42 (33, 54)	187 (150, 268)
Nord	6 (4, 10)	7 (4, 10)	10 (7, 13)	58 (34, 83)
Canada	21 (14, 30)	21 (14, 31)	35 (27, 43)	160 (109, 204)
	Degré-jours de chauffage, °C-jour			
Colombie-Britannique	-497 (-651, -408)	-651 (-829, -502)	-731 (-907, -585)	-1873 (-2115, -1621)
Prairies	-545 (-654, -435)	-648 (-809, -508)	-781 (-957, -635)	-2036 (-2262, -1779)
Ontario	-550 (-681, -448)	-607 (-752, -448)	-770 (-948, -655)	-1990 (-2337, -1749)
Québec	-596 (-796, -477)	-646 (-913, -480)	-869 (-1061, -690)	-2257 (-2759, -1916)
Atlantique	-524 (-679, -418)	-573 (-839, -428)	-730 (-897, -592)	-1895 (-2372, -1662)
Nord	-744 (-977, -593)	-884 (-1174, -563)	-1057 (-1352, -877)	-2880 (-3568, -2447)
Canada	-656 (-850, -525)	-772 (-1020, -527)	-936 (-1178, -770)	-2503 (-3033, -2142)

^a Basé sur la température statistiquement réduite provenant des simulations de 24 modèles du système terrestre (adapté de Li et coll., 2018).

^b Les régions sont définies par les frontières politiques; le « Nord » comprend les trois territoires (voir la figure 1.1).

En plus des changements de l'ampleur, on prévoit également des changements dans la fréquence de certains extrêmes de température. On prévoit que les températures extrêmement chaudes deviendront plus fréquentes, alors que les températures extrêmement froides seront moins fréquentes. Par exemple, selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5), la température annuelle quotidienne la plus élevée qui serait actuellement atteinte une fois tous les 10 ans, en moyenne, deviendra un événement se produisant une fois tous les deux ans d'ici 2050 – cinq fois plus fréquemment. La température annuelle quotidienne la plus élevée qui survient une fois tous les 50 ans dans le climat actuel est projetée de devenir un événement se produisant une fois tous les cinq ans d'ici 2050 – dix fois plus fréquemment (voir la figure 4.12). Ces changements projetés indiquent non seulement des extrêmes de température chaude plus fréquents, mais également des augmentations relativement importantes de la fréquence pour les événements plus rares (p. ex. un extrême par 10 ans plutôt qu'une fois par 50 ans; voir également Kharin et coll., 2018).

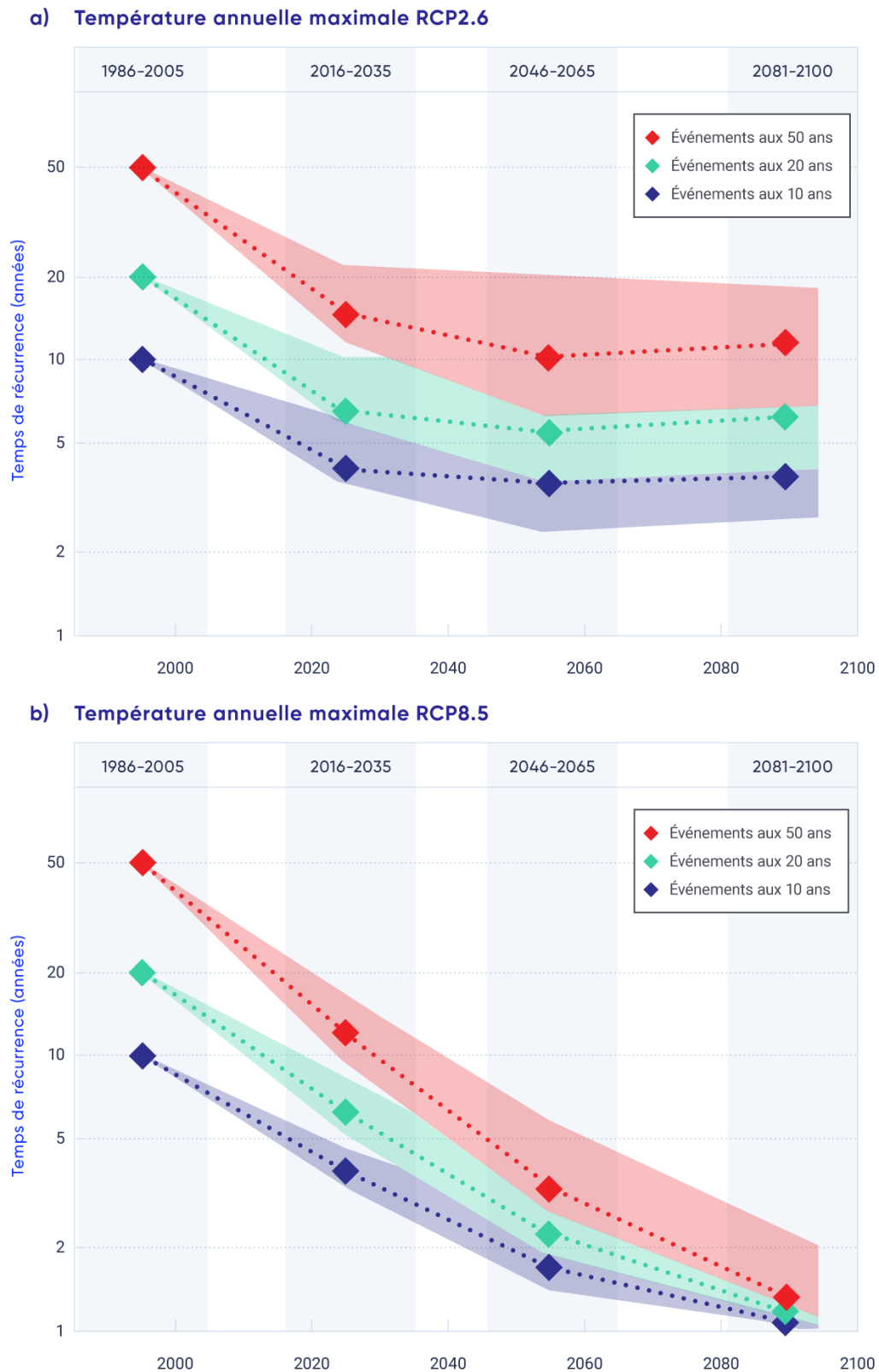


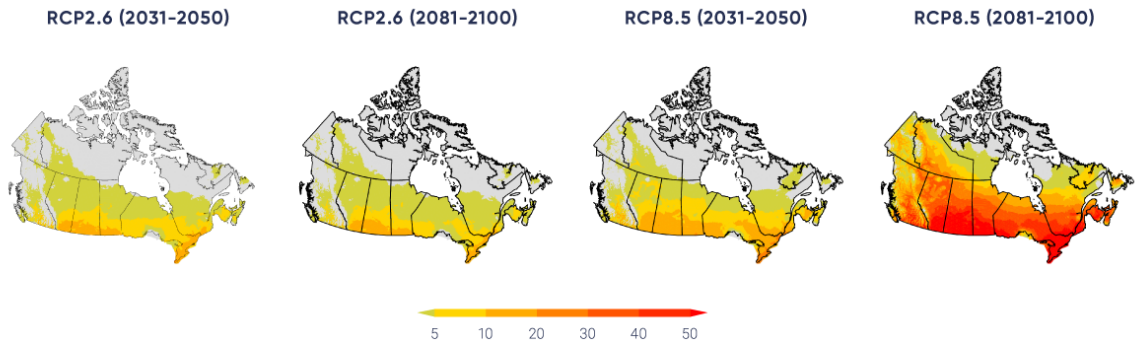
Figure 4.12: Les changements dans le temps de récurrence pour les températures extrêmes

Les changements projetés dans le temps de récurrence (en années) pour les températures annuelles les plus élevées qui se produisent, en moyenne, une fois tous les 10, 20 et 50 ans vers la fin du XX^e siècle partout au Canada, comme l'ont simulé les modèles du système terrestre contribuant à la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) selon le scénario de faibles émissions RCP2.6 (en haut) et le scénario de faibles émissions RCP8.5 (en bas). Les nuances de couleur indiquent la portée du 25^e au 75^e percentile.

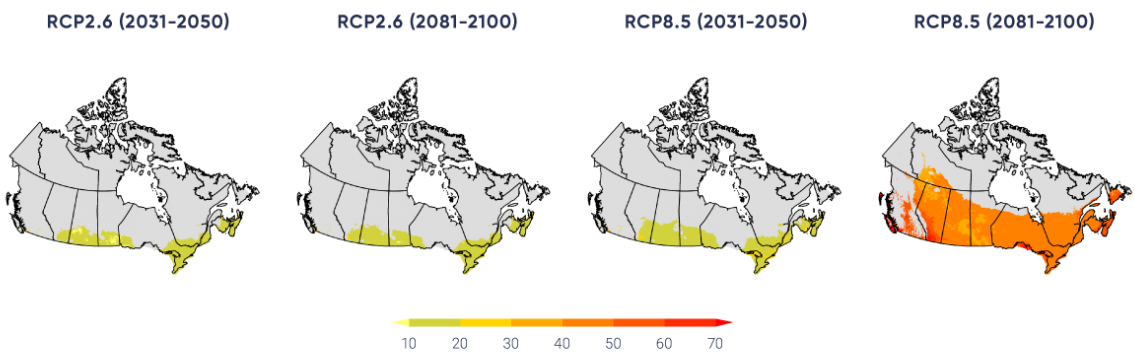
SOURCE DE LA FIGURE : LES VALEURS SONT CALCULÉES SELON KHARIN ET COLL., 2013, ADAPTÉES D'ECCC, 2013.

L'augmentation projetée dans le nombre de journées chaudes est considérable. Dans les régions qui vivent actuellement des journées chaudes, l'augmentation peut être de plus de 50 jours d'ici la fin du siècle selon un RCP8.5 (voir la figure 4.13a). Les régions avec des journées chaudes s'étendront progressivement vers le nord, selon le niveau de réchauffement planétaire. On prévoit la diminution du nombre de jour de gel et de jours de glace, avec des projections allant d'environ 10 jours de moins de 2031 à 2050 selon le scénario de faibles émissions (RCP2.6) à plus de 40 jours de moins de 2081 à 2100 dans le cas du scénario de fortes émissions (RCP8.5) (voir le tableau 4.3). On prévoit l'augmentation de la durée de la saison de croissance (voir la figure 4.13 b) et du nombre de degré-jour de refroidissement (voir la figure 4.13c), alors que le nombre de degré-jours de chauffage (voir la figure 4.13d) devrait diminuer (voir le tableau 4.3).

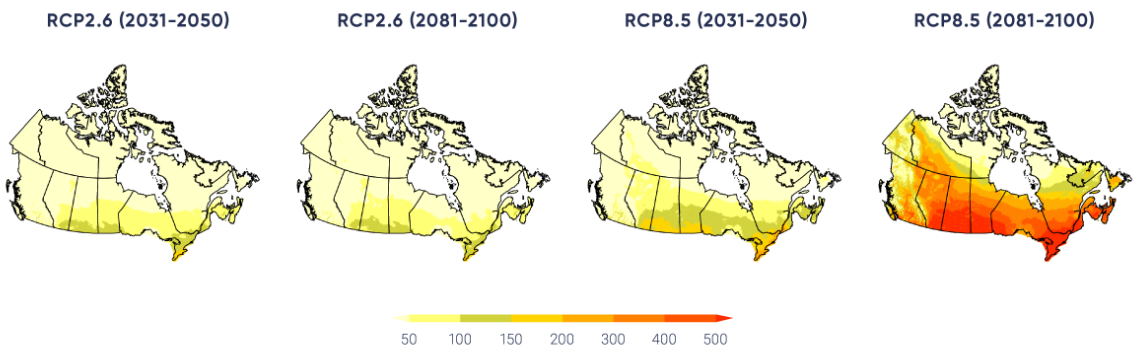
a) Nombre annuel de journées chaudes (en jours) lorsque la température maximale quotidienne est supérieure à 30°C (TX30)



b) La durée de la saison de croissance (DSC) pour les cultures de saison chaude (en jours)



c) Les degrés-jours de refroidissement (DJR, °C-jour)



d) Les degrés-jours de chauffage (DJC, °C-jour)

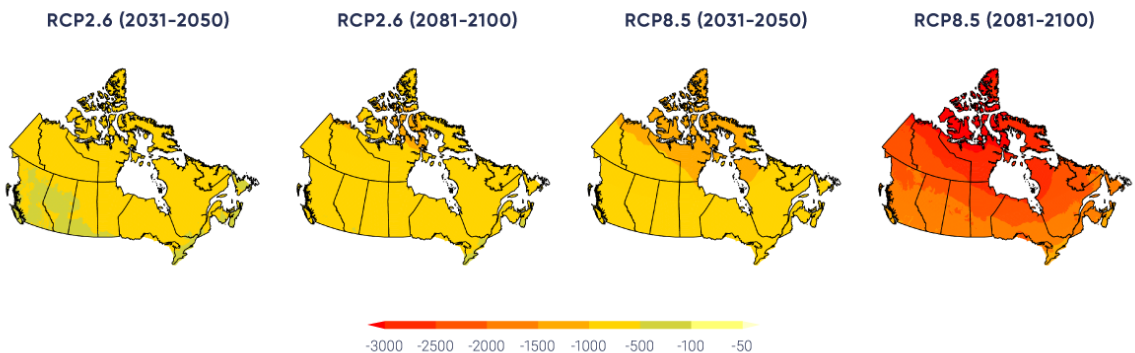


Figure 4.13 : Les projections futures pour certains indices de mesure de la température (degré-jours)

Les changements à la médiane multimodèle projetée pour (a) le nombre annuel de journées chaudes (en jours) lorsque la température maximale quotidienne est supérieure à 30 °C (TX30), (b) la durée de la saison de croissance (DSC) pour les cultures de saison chaude (en jours), (c) les degrés-jours de refroidissement (DJR, °C-jours) et (d) les degrés-jours de chauffage (DJC, °C-jours). Toutes les cartes sont basées sur des données sur le plan statistique à échelle réduite de température provenant des simulations de 24 modèles du système terrestre. Les deux panneaux de gauche montrent les projections de 2031 à 2050 et de 2081 à 2100 selon le scénario de faibles émissions (RCP2.6), alors que les deux panneaux de droite affichent des projections de 2031 à 2050 et de 2081 à 2100 selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5), respectivement. Les zones ayant en moyenne moins d'une journée chaude par année sont indiquées en gris dans le panneau (a), et les zones ayant une chaleur cumulative insuffisante lors de la saison de croissance pour appuyer la croissance des cultures de saison chaude comme le maïs et le soja sont indiquées en gris dans le panneau (b).

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE LI ET COLL., 2018.

Les changements dans les indices et les extrêmes de température sont étroitement reliés aux changements dans la température moyenne. La relation linéaire entre le changement dans la durée de la saison de croissance et la température moyenne canadienne (le côté droit de la figure 4.9; Li et coll., 2018) est un exemple de la façon dont les effets (dans le cas présent, liés à la productivité agricole ou à la croissance des forêts) peuvent être liés à des changements de température, quelle que soit la voie des futures émissions de GES. De telles relations aident non seulement les évaluations d'impacts, mais aident aussi la communication en langage clair et simple concernant les efforts mondiaux d'atténuation ainsi que leurs effets sur les impacts du climat régional. Un deuxième exemple est les degrés-jours de gel, une mesure de la rigueur de l'hiver (p. ex. Assel, 1980) qui est la somme annuelle de degré au-dessous de zéro pour chaque jour, exprimé en unité de °C-jours. Une réduction de plusieurs centaines de °C-jours est projetée dans l'ensemble du Sud du Canada vers la fin du siècle, avec des changements de 1000 °C-jours ou plus projetés pour le Nord (voir la figure 4.14). Pour le contexte, la valeur historique de degrés-jours de gel à Whitehorse est à peu près 1800 °C-jours; environ 1400 °C-jours à Edmonton; et environ 375 °C-jours à Toronto (selon les données de 1981 à 2010 http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/index_f.html)

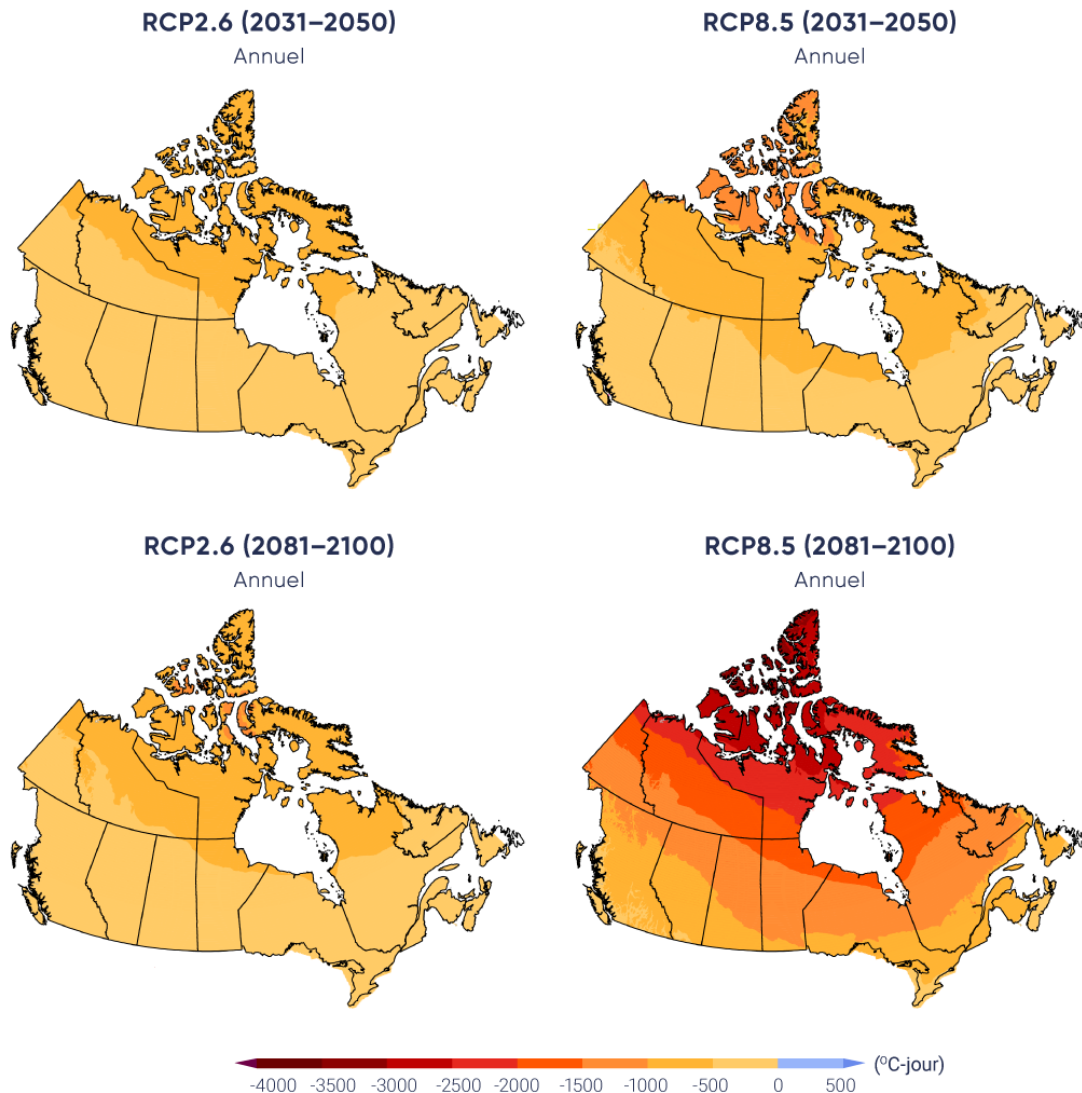


Figure 4.14 : Projections futures pour les degrés-jours de gel

Les changements projetés dans les degrés-jours de gel (°C-jours) pour la période de 2031 à 2050 (panneaux supérieurs) et de 2081 à 2100 (panneaux inférieurs) par rapport à la moyenne de 1986 à 2005, calculés à partir des températures quotidiennes sur le plan statistique à échelle réduite et fondées sur des simulations de 24 modèles de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) (Li et coll., 2018). Les panneaux de gauche montrent les résultats pour un scénario de faibles émissions (RCP2.6) et les panneaux de droite montrent les résultats pour un scénario d'émissions élevées (RCP8.5).

SOURCE DE LA FIGURE : LI ET COLL., 2018.

Pour les indices et extrêmes de température, les projections par différents modèles pour le court terme (de 2031 à 2050) selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5) est d'accord sur l'orientation (augmentation ou diminution) des changements pour presque toutes les régions. Les projections des modèles pour la fin du siècle (de 2081 à 2100) sont également d'accord sur l'orientation des changements pour tous les extrêmes et les indices de température pour chaque région selon le scénario

d'émissions élevées (RCP8.5). Cela indique la solidité des changements projetés pour les indices de température pour le futur.

Il est **quasiment certain** que, dans la plupart des endroits dans le monde, il y aura plus d'extrêmes chauds et moins d'extrêmes froids au fur et à mesure que la température moyenne mondiale augmente (Collins et coll., 2013). Cela sera également le cas pour le Canada.

Résumé de la section

Pour résumer, il est **quasiment certain** que le climat canadien s'est réchauffé et qu'il se réchauffera davantage dans le futur, comme des émissions supplémentaires de GES sont inévitables. À ce jour, le réchauffement a été plus intense en hiver que dans les autres saisons. Des changements à grande échelle dans les indices de température et les extrêmes associés au réchauffement ont été observés. Les activités humaines et la variation naturelle du climat ont contribué à ce réchauffement, le facteur humain étant dominant. L'ampleur du futur réchauffement sera déterminée par la portée des futures mesures d'atténuation des GES. Les indices et les extrêmes de température continueront de changer alors que le Canada continuera de se réchauffer, influençant les systèmes naturels, sociaux et économiques du Canada. Des changements importants sont projetés pour les extrêmes de température. Il y aura plus d'extrêmes chauds et moins d'extrêmes froids. L'augmentation dans la température moyenne canadienne est d'environ le double de celle de la température moyenne mondiale. C'est le cas dans les dossiers historiques et s'applique également aux futurs changements, peu importe le profil d'évolution d'émissions que la terre suivra. Alors que les changements dans les indices et extrêmes de température sont étroitement liés aux changements dans la température moyenne, les changements dans le climat canadien et leurs effets sont étroitement liés aux changements dans la température moyenne mondiale et, ultimement, aux futures émissions de GES.

4.3: Précipitations

Message clé

Il y a un **degré de confiance moyen** que les précipitations moyennes annuelles ont augmenté, en moyenne, au Canada, avec un pourcentage d'augmentation plus élevé pour le Nord du Canada. Ces augmentations sont cohérentes avec les simulations des modèles de changement climatique anthropique.

Message clé

On prévoit que les précipitations annuelles et hivernales augmenteront partout au Canada au cours du XXI^e siècle, avec un pourcentage de changements plus important dans le Nord du Canada. On prévoit que les précipitations estivales diminueront dans le Sud du Canada dans un scénario d'émissions élevées vers la fin du XXI^e siècle, mais seulement de petits changements sont projetés dans un scénario de faibles émissions.

Message clé

Pour l'ensemble du Canada, il n'y a pas de preuves d'observations disponibles des changements dans les quantités de précipitation extrêmes, accumulées sur une période d'un jour ou moins. Cependant, dans l'avenir, les précipitations extrêmes quotidiennes sont projetées d'augmenter (*degré de confiance élevé*).

Les précipitations, en tant que source d'eau ultime pour nos terres, lacs et rivières, jouent un rôle important dans la société humaine et dans la formation et le maintien des écosystèmes. La société humaine et les systèmes naturels ont évolué et se sont adaptés aux précipitations variables par le passé. Cependant, les changements dans les précipitations au-delà de sa plage de variabilité historique pourraient avoir de profondes répercussions.

La quantité de précipitation varie grandement dans l'ensemble du Canada. La côte du Pacifique et les montagnes Rocheuses de l'ouest du Canada bloquent la majorité de l'humidité apportée par les vents d'ouest venant du Pacifique. Par conséquent, certains endroits sur la côte Ouest reçoivent en moyenne 3000 mm de précipitations ou plus par année. Au contraire, les précipitations moyennes annuelles peuvent être aussi peu que 300 mm dans certaines parties des Prairies. Étant donné que l'air chaud peut retenir plus d'humidité, la quantité de précipitations diminue du sud vers le Nord, les précipitations annuelles étant d'environ 200 mm dans le Grand Nord (Environnement Canada, 1995).

Les enregistrements de précipitations de certains endroits au Canada remontent jusqu'à plus d'un siècle. Bien que le Service météorologique du Canada ait de nombreuses stations d'observation en tout temps, y compris plus de 2500 stations actuellement actives, seulement quelques centaines de stations ont des dossiers continus à long terme. Comme avec les observations de température, il y a eu des changements significatifs dans les instruments et les procédures d'observation, y compris de nombreuses stations habitées qui ont été remplacées par des systèmes d'observation automatisés. Intégrer les données des observations humaines et automatisées en une série continue est difficile, puisque cela requiert l'accumulation de suffisamment de données provenant des nouveaux systèmes afin de comprendre leurs caractéristiques de façon compréhensive (Milewska et Hogg, 2002). La mesure des précipitations présente des défis supplémentaires lorsqu'on la compare à la mesure de la température, puisqu'elle est influencée par les conditions météorologiques au moment de l'observation. C'est parce que les thermomètres sont placés dans des abris bien protégés, tandis que les jauges de précipitations sont à l'air libre. En général, les jauges de précipitations captent seulement une portion des précipitations si les conditions sont venteuses et ils deviennent de moins en moins efficaces à mesure que la vitesse du vent augmente (Mekis et Vincent, 2011; Milewska et al., 2018). De plus, une petite quantité des précipitations est perdue en raison de l'évaporation et du mouillage de l'intérieur de la jauge. Les précipitations sous forme de neige sont particulièrement difficiles à observer. Une jauge peut capter seulement une petite fraction de la chute de neige totale; la poudrerie complique davantage la mesure de la quantité de chutes de neige. L'introduction, au fil du temps, de nouvelles jauges de précipitation a involontairement introduit une inhomogénéité des données dans les dossiers. L'effet des conditions météorologiques et l'utilisation de différentes jauges pour les données d'observation doivent être soigneusement ajustés afin de refléter la quantité réelle de précipitations à un site particulier.

Surveiller les précipitations pour une région est difficile parce que la mesure de la jauge est un point d'observation et donc peut ne pas représenter les conditions des précipitations sur un vaste territoire. Comme les précipitations sont sporadiques dans le temps et l'espace, les points d'observation de la quantité de précipitations dans une journée peut représenter seulement un petit territoire entourant le site d'observation. Cependant, les stations d'observation de la quantité de précipitations accumulées sur de plus longues périodes (un mois ou une année) peuvent représenter de plus grands territoires. Par exemple, le total de

précipitation pour une saison peut être interpolé pour un endroit sans observations avec une exactitude raisonnable, si l'endroit se situe entre 20 et 120 km de distance des sites d'observation, selon la saison (Milewska et Hogg, 2001). Les facteurs comme la topographie, la saison et les systèmes météorologiques dominants ont tous une influence sur la représentation spatiale des points d'observation des précipitations.

En général, la densité des stations est suffisante au Canada pour calculer la moyenne nationale de précipitations avec une exactitude souhaitable; il y a donc un **degré de confiance faible** dans la quantification régionale ou nationale de la quantité totale de précipitations. C'est parce que la distance entre les stations d'observation ayant des dossiers à long terme (voir la figure 4.1) est généralement plus importante que 120 km et parce qu'il y a une importante variation spatiale dans les précipitations. Dans le Nord du Canada, la distance entre les stations est souvent de plus de 1 000 km. Les précipitations localement normalisées (la quantité de précipitations divisée par sa moyenne à long terme) ont été utilisées dans le passé comme une solution de rechange. Cette mesure est moins variable sur le plan spatial que la quantité de précipitations. Par conséquent, sa valeur à un emplacement donné peut représenter la moyenne sur un plus grand territoire. Les stations ayant des dossiers à long terme peuvent fournir des moyennes régionales pour les précipitations normalisées dans l'ensemble du Sud du Canada avec une exactitude raisonnable, même si ce n'est pas le cas pour le Nord du Canada (Milewska and Hogg, 2001). Donc, une grande partie de l'évaluation des changements régionaux ou nationaux des précipitations est fondée sur les précipitations localement normalisées, exprimées en pourcentage. Bien que cela permet de calculer certaines formes de moyennes nationales ou régionales, ces moyennes ne devraient pas être interprétées comme des moyennes normalisées spatiales de précipitations. Le facteur local de normalisation n'est pas constant sur le plan spatial.

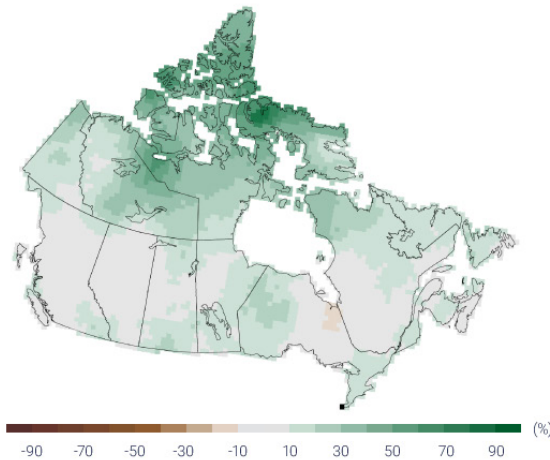
4.3.1: Précipitations moyennes

4.3.1.1: Changements observés

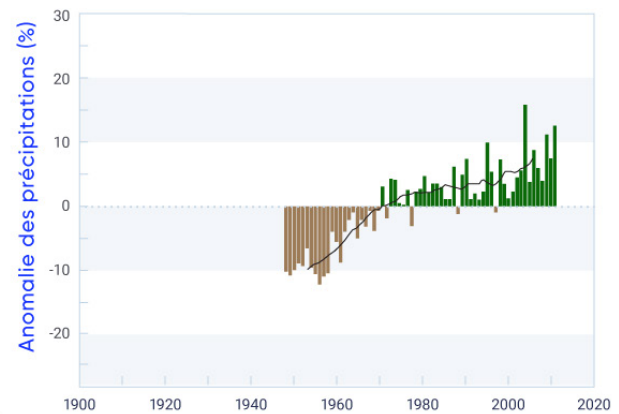
En moyenne pour le pays, les précipitations normalisées ont augmenté d'environ 20 % de 1948 à 2012 (Vincent et coll., 2015; la figure 4.15 et le tableau 4.4). L'augmentation en pourcentage était plus importante dans le Nord du Canada – y compris le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest, le Nunavut et le Nord-du-Québec – que dans le Sud du Canada. Néanmoins, il y avait des augmentations significatives dans certaines parties du Sud du Canada, y compris l'est du Manitoba, l'ouest et le sud de l'Ontario ainsi que dans la région de l'Atlantique. Étant donné que les précipitations moyennes sont habituellement plus élevées dans le Sud du Canada, l'augmentation de la quantité absolue des précipitations est plus élevée dans le sud, même si l'augmentation des précipitations normalisées est moins importante dans la région. La moyenne régionale des précipitations normalisées fondée sur les quelques données à long terme disponibles provenant des stations du Nord du Canada montre une augmentation d'environ 30 % de 1948 à 2012 (Vincent et coll., 2015); cependant, le **degré de confiance** dans la moyenne régionale demeure **faible**. Comme les tendances des endroits particuliers dans le Nord du Canada sont toutes à la hausse, il y a un **degré de confiance moyen** que les précipitations annuelles moyennes aient augmenté dans cette région. Dans l'ensemble, il y a un **degré de confiance moyen** que les précipitations annuelles ont augmenté pour l'ensemble du Canada. De plus, l'augmentation en pourcentage des précipitations normalisées est supérieure à ce que l'on pourrait s'attendre de l'augmentation causée par le réchauffement dans les capacités de rétention d'eau de l'atmosphère, menant à un doute sur l'ampleur des tendances historiques. Il y a un **degré de confiance faible** dans l'estimation de l'ampleur de la tendance.

Les précipitations ont augmenté pour toutes les saisons dans le Nord du Canada. Dans le Sud du Canada, les précipitations ont également augmenté dans la plupart des saisons, mais l'augmentation n'est pas significative sur le plan statistique, en général. Cependant, une diminution significative dans les précipitations hivernales a été observée en Colombie-Britannique, en Alberta et en Saskatchewan (Vincent et coll., 2015; la figure 4.16 et le tableau 4.4).

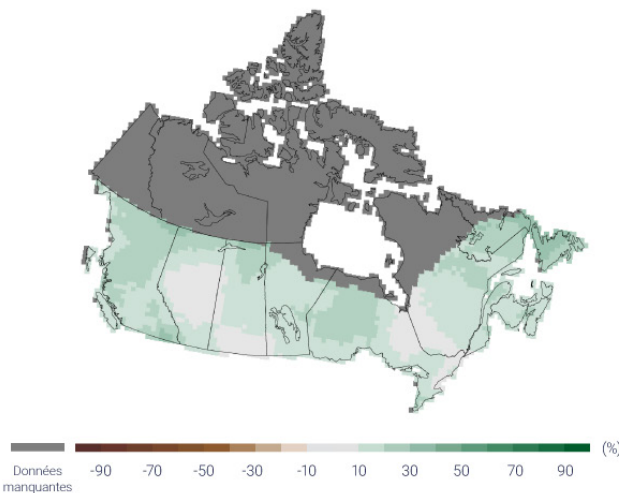
a) 1948–2012



b) 1948–2012



c) 1900–2012



d) 1900–2012

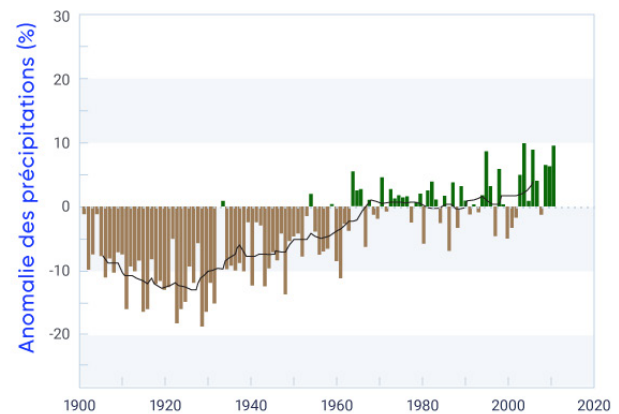


Figure 4.15 : Changements dans les précipitations annuelles, de 1948 à 2012 et de 1900 à 2012

Les changements observés dans les précipitations annuelles localement normalisées (%), pour les périodes de (a) 1948 à 2012 et de (c) 1900 à 2012; les changements sont calculés selon les tendances linéaires au cours de leur période respective. La moyenne des précipitations normalisées par rapport à la moyenne de la période de 1961 à 1990 (b) dans l'ensemble du Canada et (d) dans le Sud du Canada (sud du 60° degré de latitude nord); les lignes noires sont la moyenne continue sur 11 ans. Des estimations sont dérivées des données interpolées des stations. Il y a un manque de données pour le Nord du Canada (voir la figure 4.1).

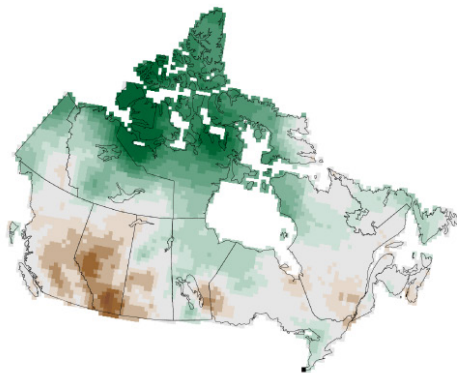
SOURCE DE LA FIGURE : MISE À JOUR DE LA FIGURE 4 DE VINCENT ET COLL., 2015.

Tableau 4.4: Changements observés dans les précipitations annuelles et saisonnières normalisées de 1948 à 2012 pour six régions et pour l'ensemble des terres canadiennes^a

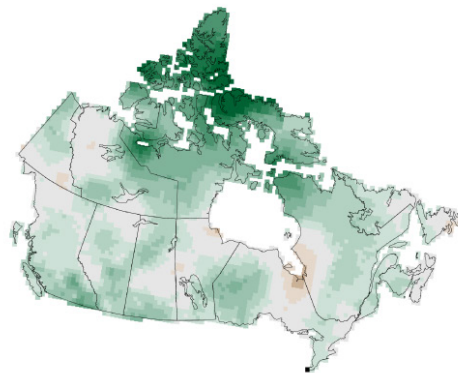
RÉGION	CHANGEMENTS DANS LES PRÉCIPITATIONS, %				
	Annuel	Hiver	Printemps	Été	Automne
Colombie-Britannique	5,0	-9,0	18,2	7,9	11,5
Prairies	7,0	-5,9	13,6	8,4	5,8
Ontario	9,7	5,2	12,5	8,6	17,8
Québec	10,5	5,3	20,9	6,6	20,0
Atlantique	11,3	5,1	5,7	11,2	18,2
Nord du Canada	32,5	54,0	42,2	18,1	32,1
Canada	18,3	20,1	25,3	12,7	19,0

^a Les changements sont représentés par des tendances linéaires tout au long de la période. Des estimations sont dérivées des données interpolées des stations. Il y a un manque de données pour le Nord du Canada (voir la figure 4.1 pour l'emplacement des stations), ce qui réduit la confiance dans l'estimation.

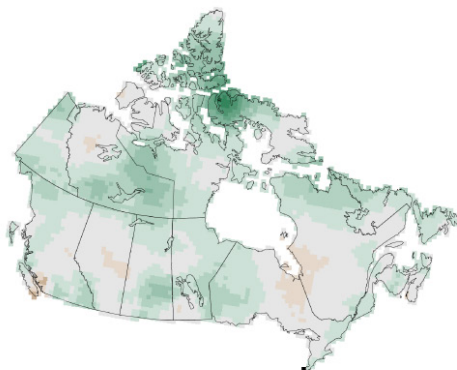
a) Hiver



b) Printemps



c) Été



d) Automne

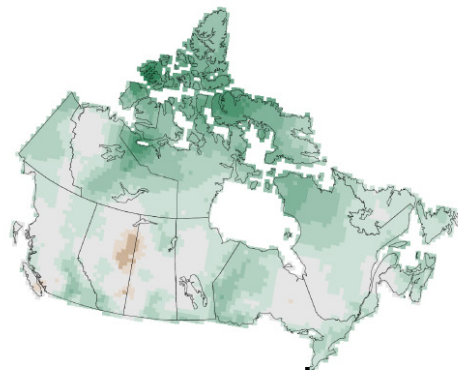


Figure 4.16: Changements dans les précipitations saisonnières, de 1948 à 2012

Les changements observés dans les précipitations saisonnières normalisées (%), pour la période de 1948 à 2012 pour les quatre saisons; les changements sont calculés selon les tendances linéaires au cours de leur période respective. Des estimations sont dérivées des données interpolées des stations. Il y a un manque de données pour le Nord du Canada (voir la figure 4.1).

SOURCE DE LA FIGURE : LA FIGURE 5 DE VINCENT ET COLL., 2015.

Pour les tendances à long terme observées, à l'échelle du siècle, les changements dans les précipitations peuvent être évalués seulement pour le Sud du Canada, en raison du manque de données pour le Nord du Canada. Une augmentation a été observée dans toutes les régions du Sud du Canada depuis 1900 et elle est significative sur le plan statistique sur l'échelle spatiale au seuil de 5 %. Le réchauffement a causé une diminution régulière et significative de la proportion de la quantité de précipitations tombant sous forme de neige (c.-à-d. le ratio de chute de neige par rapport au total de précipitations) dans le Sud du Canada, surtout lors du printemps et de l'automne (Vincent et coll., 2015). C'est également le cas pour la région de l'Arctique. Il y a une baisse prononcée de chute de neige en été au-dessus de l'océan Arctique et de l'archipel Arctique canadien et cette baisse est presque entièrement causée par le remplacement des chutes de neige par de la pluie (Screen et Simmonds, 2012). Un tel changement dans la forme des précipitations, de la neige à la pluie, a des répercussions profondes sur les autres éléments de l'environnement physique, comme le débit des cours d'eau, la crue printanière arrivant beaucoup plus tôt (Vincent et coll., 2015; voir le chapitre 6, section 6.2).

4.3.1.2: Causes des changements observés

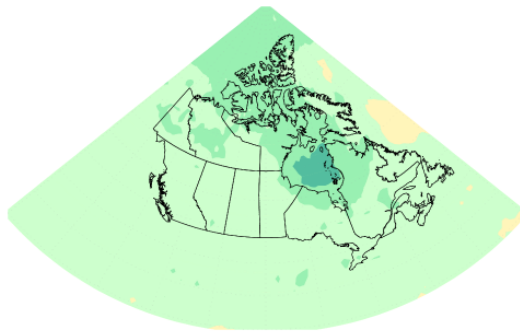
Il y a un **degré de confiance moyen** qu'il y a une contribution humaine dans les changements observés à l'échelle mondiale pour les précipitations au-dessus des terres depuis 1950 (Bindoff et coll., 2013). La plupart des preuves de l'influence humaine sur les précipitations à l'échelle mondiale viennent de l'augmentation des précipitations dans les latitudes moyennes à élevées du Nord (Min et coll., 2008; Marvel et Bonfils, 2013; Wan et coll., 2014). Cette tendance à la hausse est claire dans les simulations des modèles climatiques avec du forçage historique (p. ex. Min et coll., 2008) et dans les projections futures (Collins et coll., 2013). Les précipitations observées dans les latitudes élevées de l'hémisphère nord, y compris au Canada, ont augmenté et peuvent être attribuées – du moins en partie – au forçage externe (Min et coll., 2008; Wan et coll., 2014). L'humidité atmosphérique augmente avec le réchauffement dans les observations et les simulations des modèles. La variabilité naturelle interne du climat d'une décennie à l'autre contribue peu aux changements observés (Vincent et coll., 2015). Ces données probantes, lorsque combinées, nous mène à conclure qu'il y a un **degré de confiance moyen** que l'augmentation observée dans les précipitations canadiennes est au moins en partie causée par l'influence humaine.

4.3.1.3: Changements projetés et incertitudes

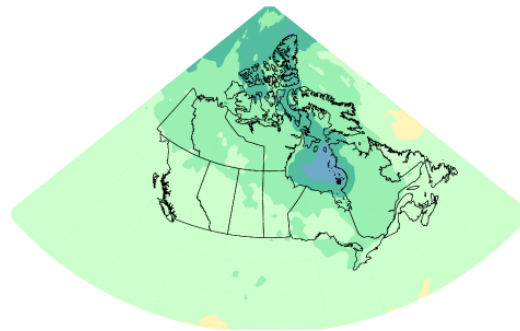
Les projections multimodèles de changements en pourcentage (par rapport à la période de 1986 à 2005) en hiver, en été et pour les précipitations annuelles au Canada sont montrées dans les figures 4.17, 4.18 et 4.19. Les figures comprennent des cartes des changements pour le scénario de faibles émissions (RCP2.6) et d'émissions élevées (RCP8.5) pour le court terme (de 2031 à 2050) et la fin du siècle (de 2081 à 2100), ainsi que des séries chronologiques de moyennes nationales des changements locaux normalisés pour l'ensemble du Canada pour la période de 1900 à 2100. Contrairement à la température, qui est projetée d'augmenter partout dans toutes les saisons, les précipitations ont des tendances d'augmentation et de diminution. Dans le court terme, une petite (généralement moins de 10 %) augmentation des précipitations est projetée dans toutes les saisons, avec des valeurs légèrement plus importantes dans le nord-est du Canada. Vers la fin du siècle (de 2081 à 2100), selon le scénario d'émissions élevées, les changements sont beaucoup plus importants, avec de grands territoires ayant une augmentation des précipitations dans le Nord du Canada (plus de 30 % de la moyenne annuelle dans l'Extrême Arctique). Comme les précipitations annuelles moyennes sont faibles dans l'Arctique, même des changements modestes dans la quantité absolue se traduisent par un important changement dans le pourcentage. Par contre, on prévoit que de grandes régions du Sud du Canada verront une réduction dans les précipitations en été selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5); par exemple, une réduction de la médiane de plus de 30 % est projetée pour le sud-ouest de la Colombie-Britannique (voir la figure 4.18). La diminution projetée dans les précipitations estivales (également projetée dans d'autres parties du monde) est une conséquence du séchage de surface global et des changements dans la circulation atmosphérique (Collins et coll., 2013).

Comme c'était le cas avec la température, les séries chronologiques des moyennes nationales pour les précipitations dans les panneaux inférieurs des trois figures montrent des différences relativement petites entre le scénario de faibles émissions (RCP2.6) et celui d'émissions élevées (RCP8.5) pour le court terme (de 2031 à 2050). Les changements des précipitations hivernales projetés selon les deux scénarios divergent quelque peu vers la fin du siècle, alors que les changements estivaux sont près de zéro pour la totalité du siècle, peu importe le scénario d'émissions. Ce petit changement dans la moyenne nationale des précipitations localement normalisées cache le fait que les changements des précipitations estivales sont projetés d'être important (et donc, ayant des répercussions) dans bien des régions du Canada. Les importantes augmentations en pourcentage dans le Nord du Canada sont généralement compensées par les importantes diminutions du pourcentage dans le Sud du Canada, alors la moyenne des changements en pourcentage pour l'ensemble du Canada dans les points des séries chronologiques montre peu de changement global dans les précipitations estivales. Comme les précipitations moyennes sont beaucoup plus importantes dans le Sud du Canada que dans le Nord du Canada, la diminution de la quantité absolue des précipitations dans le Sud du Canada est supérieure à la valeur absolue de l'augmentation des précipitations dans le Nord du Canada. Les différences régionales sont clairement importantes pour les études d'impact et l'information quantitative à l'échelle régionale est fournie dans le tableau 4.5. En général, les changements dans les précipitations montrent plus de variations temporelles et régionales que les changements de température, et donc, les résultats des projections pour les précipitations ont moins de confiance que les résultats de projections pour la température.

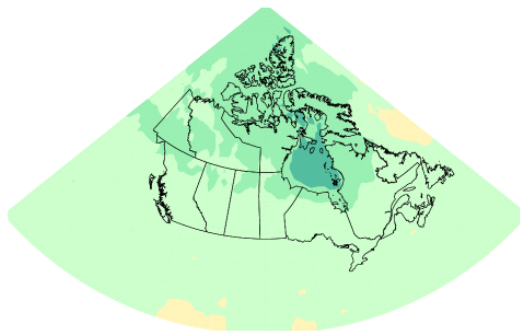
Changement des précipitations RCP2.6 (2031 à 2050)
décembre à février



Changement des précipitations RCP8.5 (2031 à 2050)
décembre à février



Changement des précipitations RCP2.6 (2081 à 2100)
décembre à février



Changement des précipitations RCP8.5 (2081 à 2100)
décembre à février

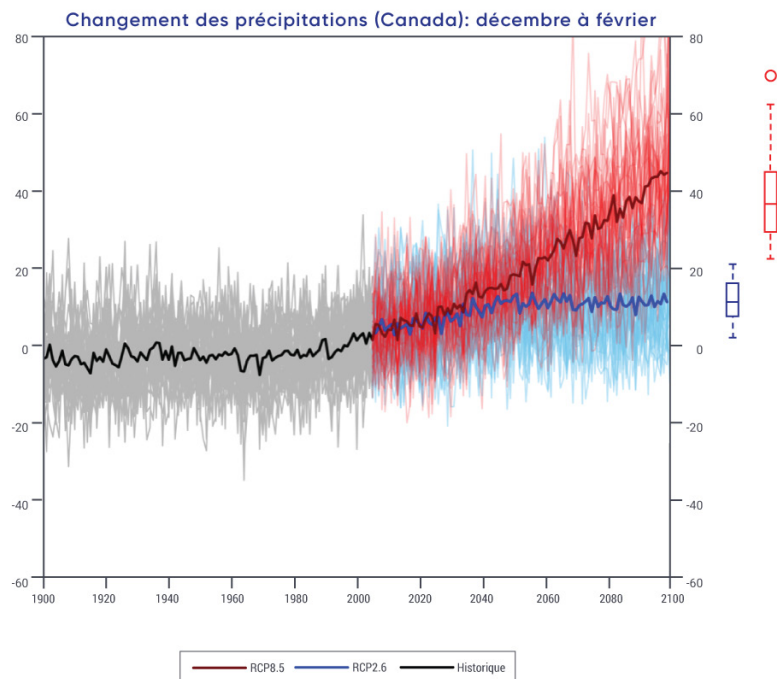
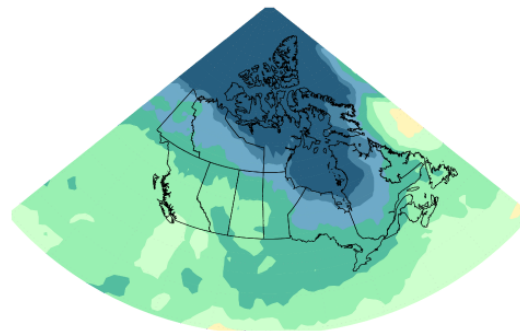


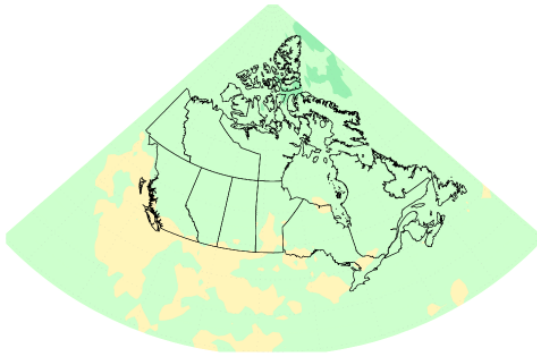
Figure 4.17 : Les changements dans les précipitations projetés pour la saison hivernale

Des cartes et séries chronologiques du changement projeté des précipitations (%) pour décembre, janvier et février, représenté par la médiane de l'ensemble multimodèle de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Les changements sont relatifs à la période de 1986 à 2005. Les cartes supérieures montrent le changement dans les précipitations pour la période de 2031 à 2050 et les cartes inférieures, pour la période de 2081 à 2100. Les cartes du côté gauche montrent les changements entraînés par le scénario de faibles émissions (RCP2.6) alors que les cartes du côté droit montrent les changements du scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les séries chronologiques dans le bas de la figure montrent le changement en moyenne dans l'ensemble des terres canadiennes et tout au long de la période de 1900 à 2100. Les lignes minces montrent les résultats des modèles individuels du CMIP5 et la large ligne correspond à la moyenne multimodèle. L'écart entre les modèles, évident dans les lignes minces, est quantifié par les tracés de boîtes et moustaches à la droite de chaque panneau. Ils montrent, pour la période de 2081 à 2100, la valeur du 5^e, 25^e, 50^e (médiane), 75^e et 95^e percentile.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

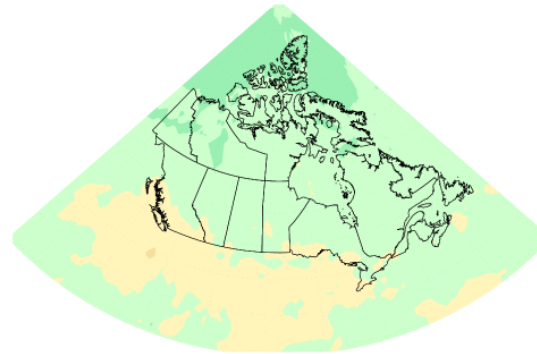
Changement des précipitations RCP2.6 (2031 à 2050)

juin à août



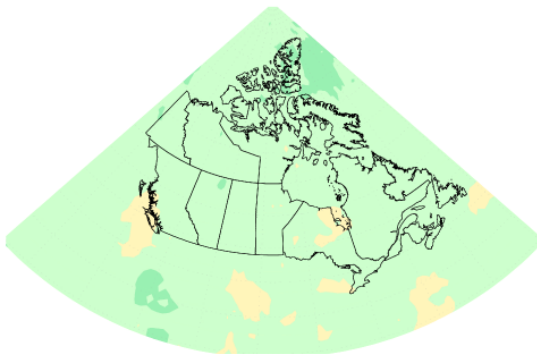
Changement des précipitations RCP8.5 (2031 à 2050)

juin à août



Changement des précipitations RCP2.6 (2081 à 2100)

juin à août



Changement des précipitations RCP8.5 (2081 à 2100)

juin à août

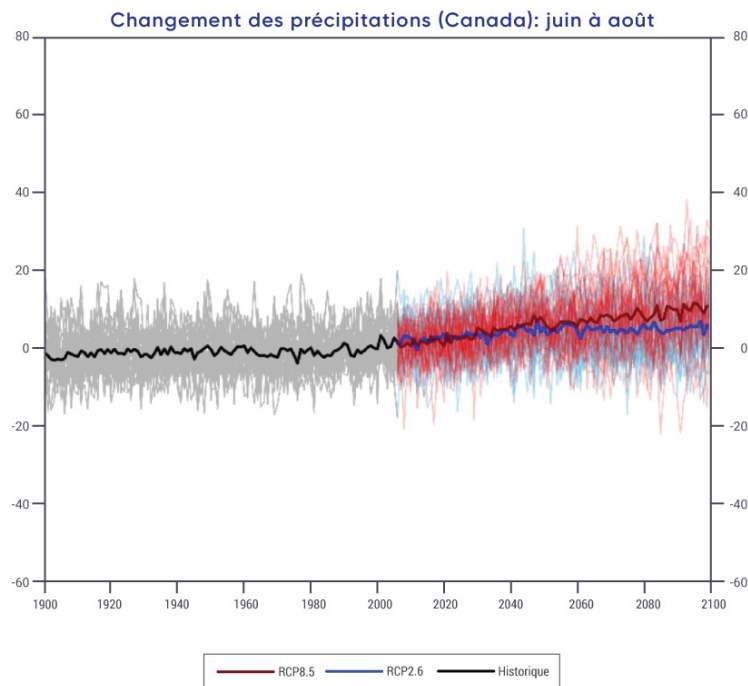
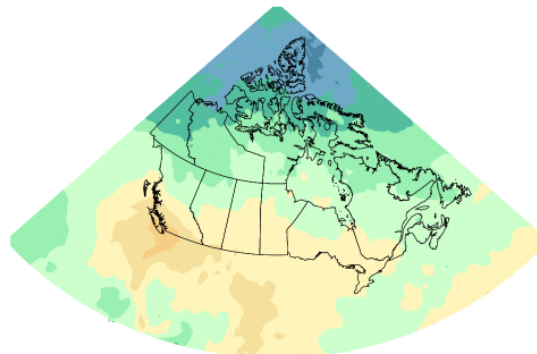


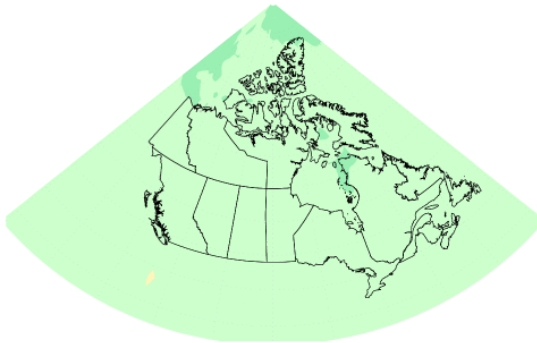
Figure 4.18: Les changements dans les précipitations projetés pour la saison estivale

Des cartes et séries chronologiques du changement projeté des précipitations (%) pour juin, juillet et août, représenté par la médiane de l'ensemble multimodèle de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Les changements sont relatifs à la période de 1986 à 2005. Les cartes supérieures montrent le changement dans les précipitations pour la période de 2031 à 2050 et les cartes inférieures, pour la période de 2081 à 2100. Les cartes du côté gauche montrent les changements entraînés par le scénario de faibles émissions (RCP2.6) alors que les cartes du côté droit montrent les changements du scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les séries chronologiques dans le bas de la figure montrent le changement en moyenne dans l'ensemble des terres canadiennes et au cours de la période de 1900 à 2100. Les lignes minces montrent les résultats des modèles individuels du CMIP5 et la large ligne correspond à la moyenne multimodèle. L'écart entre les modèles, évident dans les lignes minces, est quantifié par les tracés de boîtes et moustaches à la droite de chaque panneau. Ils montrent, pour la période de 2081 à 2100, la valeur du 5^e, 25^e, 50^e (médiane), 75^e et 95^e percentile.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

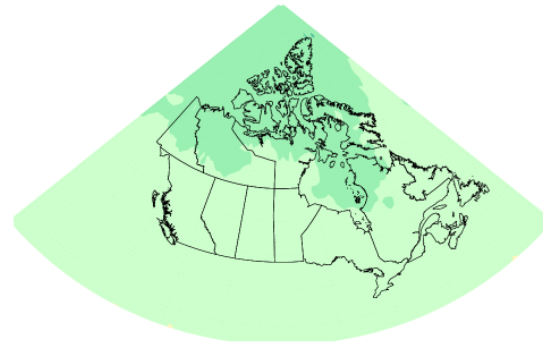
Changement des précipitations RCP2.6 (2031 à 2050)

Annuel



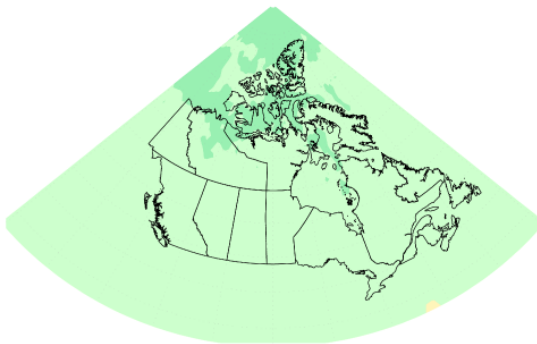
Changement des précipitations RCP8.5 (2031 à 2050)

Annuel



Changement des précipitations RCP2.6 (2081 à 2100)

Annuel



Changement des précipitations RCP8.5 (2081 à 2100)

Annuel

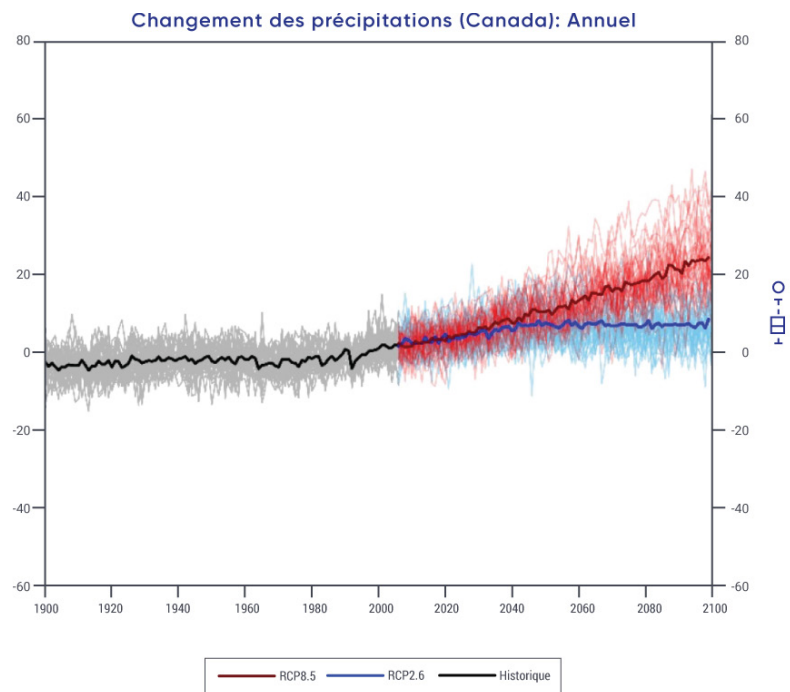
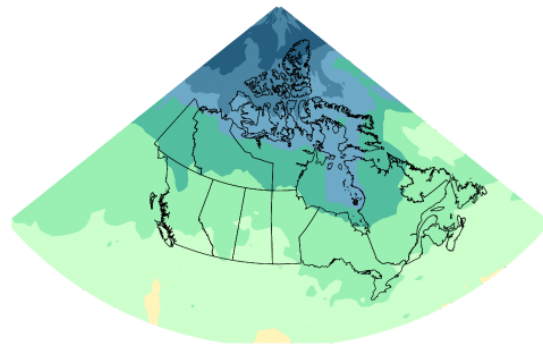


Figure 4.19: Les changements projetés annuels des précipitations

Des cartes et séries chronologiques du changement projeté des précipitations (%) moyenne annuelle, représentée par la médiane de l'ensemble multimodèle de la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Les changements sont relatifs à la période de 1986 à 2005. Les cartes supérieures montrent le changement dans les précipitations pour la période de 2031 à 2050 et les cartes inférieures, pour la période de 2081 à 2100. Les cartes du côté gauche montrent les changements entraînés par le scénario de faibles émissions (RCP2.6) alors que les cartes du côté droit montrent les changements du scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les séries chronologiques dans le bas de la figure montrent le changement en moyenne dans l'ensemble des terres canadiennes et au cours de la période de 1900 à 2100. Les lignes minces montrent les résultats des modèles individuels du CMIP5 et la large ligne correspond à la moyenne multimodèle. L'écart entre les modèles, évident dans les lignes minces, est quantifié par les tracés de boîtes et moustaches à la droite de chaque panneau. Ils montrent, pour la période de 2081 à 2100, la valeur du 5^e, 25^e, 50^e (médiane), 75^e et 95^e percentile.

SOURCE DE LA FIGURE : DIVISION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

Tableau 4.5: Changement projeté dans les pourcentages des précipitations annuelles moyennes pour six régions et pour l'ensemble des terres canadiennes, par rapport à la période de 1986 à 2005^a

RÉGION ^b	SCÉNARIO; PÉRIODE; MÉDIANE (25E, 75E PERCENTILE), %			
	RCP2.6		RCP8.5	
	2031–2050	2081–2100	2031–2050	2081–2100
Colombie-Britannique	4,3 (-0,4, 9,8)	5,8 (0,4, 11,9)	5,7 (0,0, 11,4)	13,8 (5,7, 22,4)
Prairies	5,0 (-0,7, 10,8)	5,9 (-0,2, 12,1)	6,5 (0,4, 13,1)	15,3 (6,3, 24,9)
Ontario	5,5 (0,4, 11,1)	5,3 (-0,1, 10,8)	6,6 (1,8, 12,4)	17,3 (8,5, 26,1)
Québec	7,1 (2,0, 12,2)	7,2 (2,2, 13,0)	9,4 (4,5, 14,7)	22,5 (14,8, 32,0)
Atlantique	3,8 (-0,8, 9,1)	4,7 (0,3, 9,0)	5,0 (0,6, 9,9)	12,0 (5,7, 19,3)
Nord	8,2 (2,1, 14,6)	9,4 (2,8, 16,7)	11,3 (5,4, 18,1)	33,3 (22,1, 46,4)
Canada	5,5 (0,2, 11,2)	6,8 (0,4, 14,4)	7,3 (2,0, 13,2)	24,2 (13,7, 36,2)

^a La médiane ou la valeur du 50e percentile est fondée sur l'ensemble des multimodèles du CMIP5. La valeur du 25e percentile indique que 25 % des projections du modèle CMIP5 ont des changements inférieurs à cette valeur. La valeur du 75e percentile indique que 25 % des projections du modèle CMIP5 ont des changements supérieurs à cette valeur.

^b Les régions sont définies par les frontières politiques; le « Nord » comprend les trois territoires (voir la figure 1.1).

Alors que le climat se réchauffe, particulièrement dans le Nord du Canada, il y aura inévitablement une probabilité accrue de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige. Cela est cohérent avec les changements observés dans la proportion de chutes de neige remarquée précédemment. Bien qu'il n'y ait pas une analyse systématique pour le Canada, une analyse prévoit une diminution de la proportion des précipitations tombant sous forme de neige, surtout en automne et au printemps, pour le Sud de l'Alaska et l'est du Québec (Krasting et coll., 2013). De plus, les projections des modèles climatiques régionaux montrent une augmentation générale des événements de pluie sur neige au cours du siècle à venir (Jeong et Sushama, 2017).

Ces résultats pour les changements dans les précipitations moyennes sont cohérents avec la cinquième évaluation du GIEC, en ce sens que les latitudes élevées devraient connaître une forte augmentation des précipitations annuelles moyennes vers la fin du siècle selon le scénario d'émissions élevées (RCP8.5). L'augmentation projetée dans les précipitations annuelles moyennes pour les latitudes élevées est une caractéristique commune des générations de modèles climatiques. Cela peut être expliqué par l'importante augmentation de vapeur d'eau atmosphérique causée par le réchauffement (Collins et coll., 2013). Au cours de la période historique, une augmentation des précipitations annuelles totales dans les latitudes élevées a été détectée et peut être attribuée à l'influence humaine (Min et coll., 2008; Wan et coll., 2014). Il y a un **degré de confiance élevé** dans l'augmentation projetée pour les précipitations annuelles moyennes. La confiance dans les changements projetés pour les précipitations saisonnières moyennes est plus faible. Il devrait être noté que les modèles projettent généralement moins de précipitations estivales pour le Sud du Canada dans le cas d'un scénario d'émissions élevées.

4.3.2: Précipitations extrêmes

Les précipitations moyennes pendant une journée ou moins peuvent causer des dommages localisés aux infrastructures, comme les routes et les bâtiments, alors que des épisodes de fortes précipitations sur plusieurs jours peuvent produire des inondations sur un large territoire. Cette section évalue seulement les changements dans les précipitations extrêmes de courte durée (un jour ou moins), pour lesquelles il y a relativement plus de données et de recherche que pour les extrêmes de plus longue durée.

4.3.2.1: Changements observés

Il ne semble pas avoir de tendance détectable pour les précipitations extrêmes de courte durée pour l'ensemble du Canada selon les données disponibles des stations. Plus de stations ont enregistré une hausse qu'une diminution dans les plus grandes quantités de pluie tombée en une journée chaque année, mais la direction des tendances est plutôt aléatoire dans l'espace. Certaines stations montrent des tendances significatives, mais le nombre de sites qui ont des tendances significatives n'est pas plus élevé que ce à quoi on pourrait s'attendre de la chance (Shephard et coll., 2014; Mekis et coll., 2015; Vincent et coll., 2018). Cela semble être incohérent avec les résultats mondiaux (Westra et coll., 2013) et les résultats pour la région adjacente des États-Unis (Barbero et coll., 2017). Le nombre de jours avec de fortes précipitations¹⁸ a augmenté de seulement 2 ou 3 jours depuis 1948 à quelques endroits dans le Sud de la Colombie-Britannique, de l'Ontario, du Québec et des provinces de l'Atlantique (Vincent et coll., 2018). Le nombre de jours avec des précipitations totales supérieures à 10 mm par heure, des précipitations totales supérieures à 25 mm pour 24 heures ou des précipitations totales supérieures à 50 mm pour 48 heures n'a pas non plus montré de changement constant dans l'ensemble du pays (Mekis et coll., 2015). Les journées avec de fortes chutes de neige¹⁹ ont diminué de quelques jours à de nombreux endroits dans l'Ouest du Canada (de la Colombie-Britannique au Manitoba), alors que le nombre a augmenté à plusieurs endroits dans le Nord (Yukon, Territoires du Nord-Ouest, et l'ouest du Nunavut). La quantité de chutes de neige la plus élevée a diminué de plusieurs millimètres (équivalent en eau de la neige) à plusieurs endroits dans la région sud de la Colombie-Britannique et de l'Alberta (Mekis et coll., 2015; Vincent et coll., 2018).

Le manque d'un changement détectable dans les précipitations extrêmes au Canada n'est pas nécessairement une preuve d'un manque de changement. D'un côté, c'est incohérent avec les augmentations observées dans les précipitations moyennes. Comme la variance des précipitations est proportionnelle à la moyenne et qu'il y a une augmentation significative dans les précipitations moyennes, on peut s'attendre à voir une augmentation dans les précipitations extrêmes. D'un autre côté, les changements attendus en réponse au réchauffement peuvent bien être petits lorsqu'on les compare à la variabilité naturelle interne. Le réchauffement a entraîné une augmentation dans l'humidité atmosphérique, ce qui devrait mener à une augmentation des précipitations extrêmes si d'autres conditions, comme la circulation atmosphérique, ne changent pas. À l'échelle mondiale, les observations indiquent une augmentation dans les précipitations extrêmes associées au réchauffement. De plus, l'augmentation peut être attribuée à l'influence humaine (Min et coll., 2011; Zhang et coll., 2013). L'augmentation de la médiane dans les précipitations extrêmes est d'environ 7 % pour une augmentation de 1 °C dans la température moyenne mondiale, cohérent avec l'augmentation de la capacité de rétention de l'eau de l'atmosphère en raison du réchauffement (Westra et coll., 2013). Par rapport à la variabilité naturelle interne des précipitations, une augmentation de cette quantité serait trop petite pour être détectable à des endroits particuliers. Seulement environ 8,5 % de toutes les stations des régions

18 De fortes précipitations se définissent comme des précipitations plus importantes que le 90^e percentile annuel de tous les événements de précipitations de plus de 1 mm par jour.

19 De fortes chutes de neige se définissent comme des chutes de neige plus importantes que le 90^e percentile annuel de tous les événements de précipitations de plus de 1 mm par jour.

terrestres globales avec plus de 30 ans de données montrent une augmentation des précipitations extrêmes au seuil significatif de 5 %, ce qui est légèrement plus élevé que le taux de stations montrant une augmentation (5 %) dont on pourrait s'attendre du hasard (Westra et coll., 2013). La détection de l'intensité croissante des précipitations extrêmes au-dessus des régions terrestres du monde est possible en raison de la vaste quantité de données disponibles. À l'échelle régionale, il y a beaucoup moins de renseignements, ce qui est le cas pour le Canada, où les observations à long terme sont très limitées et la détection devient beaucoup plus difficile.

4.3.2.2: Changements projetés et incertitudes

Dans l'avenir, les précipitations extrêmes sont projetées d'augmenter au Canada. En moyenne au Canada, les précipitations extrêmes ayant une période de récurrence²⁰ de 20 ans dans le climat de la fin du siècle sont projetées de devenir des événements ayant une récurrence d'environ 15 ans, dans le cas d'un scénario de faibles émissions (RCP2.6) et des événements ayant une récurrence d'environ 10 ans dans la période de 2031 à 2050 dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (voir la figure 4.20). Au-delà du milieu du siècle, on prévoit que ces changements se stabiliseront dans le cas d'un scénario de faibles émissions (RCP2.6), mais ils continueront dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Un événement extrême qui se produit actuellement une fois tous les 20 ans est projeté de se produire tous les cinq ans d'ici la fin de siècle dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). En d'autres mots, les précipitations extrêmes d'une certaine ampleur devraient devenir plus fréquentes. De plus, le changement relatif dans la fréquence d'un événement est plus important pour les événements plus extrêmes et plus rares. Par exemple, un événement qui se produit actuellement une fois tous les 50 ans est projeté de se produire une fois tous les 10 ans d'ici la fin du XXI^e siècle dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). La quantité de précipitations ayant une certaine récurrence est projetée d'augmenter. La quantité de précipitations extrêmes pour 24 heures qui se produit une fois tous les 20 ans en moyenne est projetée d'augmenter d'environ 5 % dans le cas d'un scénario de faibles émissions (RCP2.6) et de 12 % dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5) pour la période de 2031 à 2050 et d'augmenter jusqu'à 25 % pour la période de 2081 à 2100 dans le cas d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les différences dans les changements projetés de pourcentage dans les précipitations annuelles maximales en 24 heures parmi les régions du Canada pour le même scénario d'émissions et la même période sont notamment petites. La valeur médiane pour chaque région est en général dans la plage du 25^e au 75^e percentile des autres régions, sauf dans le cas d'un scénario d'émissions élevées vers la fin du siècle (voir le tableau 4.6).

20 Une période de récurrence décrit la fréquence d'un événement. Par exemple, une période de récurrence de 20 ans signifie que l'événement a une probabilité de 1 sur 20 de se produire chaque année. Donc, on s'attend à ce qu'un événement sur 20 ans se produise une fois tous les 20 ans, en moyenne.



Figure 4.20: Les changements dans le temps de récurrence pour les précipitations extrêmes

Les changements projetés dans les périodes de récurrence pour les précipitations annuelles maximales en 24 heures qui se produisent, en moyenne, une fois tous les 10, 20 et 50 ans vers la fin du siècle pour l'ensemble du Canada, comme l'ont simulé les modèles du système terrestre contribuant à la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) dans le cas d'un scénario de faibles émissions (RCP2.6; en haut) et le scénario de fortes émissions (RCP8.5; en bas). Les projections correspondent à la résolution du modèle climatique mondial et les processus qui produisent des précipitations extrêmes en 24 heures à l'échelle locale ne sont pas bien représentés. Par conséquent, les projections devraient être interprétées avec précaution. Les nuances de couleur indiquent la portée du 25^e au 75^e percentile.

Tableau 4.6: Les changements projetés pour les précipitations annuelles maximales en 24 heures qui se produisent en moyenne, une fois tous les 10, 20 et 50 ans, comme l'ont simulé les modèles du système terrestre contribuant à la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5)^a

RÉGION ^b	SCÉNARIO; PÉRIODE; MÉDIANE (25E, 75E PERCENTILE), %			
	RCP2.6		RCP8.5	
	2031–2050	2081–2100	2031–2050	2081–2100
Valeur de récurrence de 10 ans				
Colombie-Britannique	5,9 (3,8, 9,3)	8,0 (4,5, 13,3)	9,8 (7,4, 12,7)	26,1 (20,4, 31,3)
Prairies	5,5 (2,3, 9,2)	5,1 (2,2, 8,9)	7,8 (4,5, 10,1)	17,5 (12,6, 23,8)
Ontario	6,0 (1,4, 8,4)	5,3 (2,1, 10,9)	8,5 (3,6, 11,4)	20,5 (15,4, 26,7)
Québec	6,8 (2,7, 10,6)	7,2 (4,6, 10,2)	10,0 (6,2, 15,6)	26,0 (17,8, 30,2)
Atlantique	6,8 (3,4, 10,2)	8,5 (6,1, 11,1)	13,5 (7,8, 18,2)	30,2 (22,9, 38,3)
Nord	7,1 (4,1, 8,7)	7,8 (4,7, 10,8)	10,8 (8,2, 13,5)	29,8 (23,2, 36,2)
Canada	6,1 (4,0, 8,5)	6,7 (4,1, 9,5)	8,4 (6,9, 11,4)	22,9 (18,8, 26,9)
Valeur de récurrence de 20 ans				
Colombie-Britannique	6,3 (3,6, 9,9)	6,7 (4,1, 14,1)	9,8 (7,4, 13,6)	25,8 (21,8, 30,8)
Prairies	5,6 (2,6, 10,2)	6,0 (2,6, 10,3)	8,8 (4,7, 10,8)	19,1 (14,1, 25,3)
Ontario	5,7 (0,8, 7,8)	5,1 (2,3, 10,7)	8,2 (2,4, 12,2)	20,1 (16,1, 25,6)
Québec	6,0 (2,2, 10,8)	8,6 (3,8, 9,9)	10,2 (5,1, 15,8)	25,8 (18,3, 32,0)
Atlantique	7,9 (3,6, 11,9)	9,5 (6,7, 11,8)	13,7 (7,9, 19,2)	30,9 (24,1, 39,1)
Nord	6,8 (3,6, 9,4)	7,4 (3,1, 11,4)	10,7 (7,9, 13,3)	30,0 (22,9, 35,1)
Canada	6,1 (3,7, 8,7)	6,9 (4,5, 10,0)	8,8 (6,6, 11,6)	24,2 (19,2, 27,8)
Valeur de récurrence de 50 ans				
Colombie-Britannique	7,0 (3,0, 10,5)	9,2 (5,1, 16,0)	10,1 (7,5, 15,5)	28,7 (21,9, 33,5)
Prairies	6,1 (2,3, 10,5)	6,5 (2,0, 11,3)	10,0 (6,2, 12,1)	21,3 (14,8, 26,8)
Ontario	4,9 (0,9, 8,4)	7,6 (0,8, 11,0)	8,5 (2,8, 13,0)	20,1 (13,3, 28,0)
Québec	6,3 (0,9, 9,9)	7,7 (3,3, 11,9)	10,8 (4,7, 17,1)	26,5 (17,9, 33,8)
Atlantique	7,7 (3,5, 12,8)	9,2 (6,6, 14,3)	14,3 (7,9, 21,2)	32,4 (24,9, 42,6)
Nord	4,9 (2,4, 9,0)	6,4 (1,7, 10,2)	10,8 (7,8, 13,0)	30,1 (24,9, 33,8)
Canada	6,2 (3,8, 9,2)	7,4 (5,0, 10,4)	9,2 (7,0, 11,9)	24,7 (19,6, 29,7)

^a La médiane ou la valeur du 50e percentile est fondée sur l'ensemble des multimodèles du CMIP5. La valeur du 25e percentile indique que 25 % des projections du modèle CMIP5 ont des changements inférieurs à cette valeur. La valeur du 75e percentile indique que 25 % des projections du modèle CMIP5 ont des changements supérieurs à cette valeur.

^b Les régions sont définies par les frontières politiques; le « Nord » comprend les trois territoires (voir la figure 1.1).

Bien que les résultats des projections des modèles climatiques mondiaux (comme ceux ci-dessus) soient utiles pour les évaluations d'impact et la planification d'adaptation, il y a une importante mise en garde, particulièrement pour les précipitations extrêmes. Il est difficile d'interpréter ces projections à l'échelle locale. La résolution spatiale des modèles climatiques mondiaux est grossière (typiquement de 100 à 250 km). Les précipitations extrêmes dans un modèle représentent donc des moyennes couvrant une région de plusieurs milliers de kilomètres carrés, transmettant ainsi une information différente que ce qui pourrait être requis pour les applications pratiques. Plus important encore, les modèles climatiques peuvent ne pas comprendre tous les processus physiques que produisent des orages locaux intenses. Cela influe sur le degré de confiance que nous avons dans les produits de réduction d'échelle statistique qui transforment les précipitations des modèles à résolution grossière en des régions plus petites. Même si les modèles climatiques régionaux peuvent fonctionner à des échelles beaucoup plus petites, les modèles climatiques régionaux conventionnels qui sont utilisés pour effectuer la majorité de la réduction d'échelle dynamique ne simulent pas précisément les processus importants comme la convection. On doit tenir compte de ces limites lors de l'utilisation de projections dans l'objectif d'adaptation locale et régionale; en particulier, les valeurs projetées données par ces modèles climatiques régionaux ou mondiaux ne devraient pas être interprétées littéralement comme une quantité mesurée de précipitations à un endroit précis.

Estimer les changements dans les précipitations extrêmes de courte durée à un endroit précis est complexe en raison du manque d'observations à beaucoup d'endroits et de la nature discontinue des précipitations à petite échelle. Prévoir de telles précipitations extrêmes est également difficile en raison du manque de simulations par des modèles ayant une très haute résolution qui résout les processus physiques qui produisent ces événements extrêmes (Zhang et coll., 2017). Néanmoins, plusieurs sources appuient le **degré de confiance élevé** dans la projection d'une augmentation dans les précipitations extrêmes à l'échelle mondiale. Ces sources comprennent l'attribution d'une augmentation observée dans les précipitations totales des latitudes élevées à l'influence humaine, une cohérence dans les augmentations projetées futures dans les précipitations extrêmes selon plusieurs modèles et la compréhension physique que le réchauffement entraînera une augmentation de l'humidité atmosphérique. Il est probable que les précipitations extrêmes augmenteront au Canada dans le futur, bien que l'ampleur de l'augmentation soit beaucoup plus incertaine.

Encadré 4.2: L'impact des changements combinés de température et de précipitations sur des changements observés et projetés dans les conditions météorologiques propices aux incendies forestiers

Les changements de température et des précipitations influencent tous les deux de nombreux secteurs. Cependant, les changements combinés de température et des précipitations peuvent avoir des répercussions supplémentaires et certains secteurs reposent sur l'information concernant les changements simultanés dans ces deux variables. Un exemple est les conditions météorologiques propices aux incendies forestiers. Le changement des précipitations et de la température (avec le vent changeant) modifie le risque de feux de forêt extrêmes qui peuvent se produire dans des conditions chaudes, sèches et venteuses. Comprendre les changements de la température et des précipitations offre une perspective dans les changements de risque d'incendies forestiers et la façon dont la situation peut évoluer dans le futur.

La Méthode canadienne de l'indice forêt-météo (IFM) est une collection d'indices qui utilise les variables météorologiques, y compris la température et les précipitations, pour caractériser le risque d'incendie. Cela comprend un indice, appelé IFM, qui synthétise l'information de la collection d'indices pour quantifier les changements quotidiens pour le risque de propagation d'un incendie. Un seuil de cet indice est souvent utilisé pour définir les jours propices à la propagation d'un incendie (Wang et

coll., 2015; Jain et coll., 2017). De plus, trois des indices les plus communément utilisés sont des codes d'humidité, décrivant la sécheresse de différentes catégories de combustibles (Wotton, 2009). Tous les indices de l'IFM représentent des facteurs influençant la possibilité d'incendie, les valeurs plus importantes indiquant une plus grande possibilité d'incendie, même si l'occurrence d'un important incendie forestier dépend également des sources de feu, des caractéristiques des combustibles et des mesures de gestion de l'incendie.

Quelques études ont examiné les tendances de ces indices partout au Canada. Une importante variabilité d'une année à l'autre dans les indices de l'IFM nuit à la détection des tendances (Amiro et coll., 2004; Girardin et coll., 2004). Les tendances peuvent quelques fois être discernées d'une très longue série de données, comme c'est le cas avec l'Indice de sécheresse dans le Nord du Canada et les diminutions dans l'Indice de sécheresse²¹ dans l'Ouest du Canada et certaines parties de l'Est du Canada lors du XX^e siècle (Girardin et Wotton, 2009). Une autre étude a révélé que le nombre moyen de jours de propagation du feu dans l'ensemble du Canada a augmenté lors de la période de 1979 à 2002, bien que les tendances varient à l'échelle régionale, et seulement certaines étaient significatives (Jain et coll., 2017). Malgré des tendances incohérentes dans les indices d'IFM, il y a une augmentation significative dans la superficie annuelle brûlée dans l'ensemble du Canada (Podur et coll., 2002; Gillett et coll., 2004).

Des températures plus élevées dans le futur contribueront à augmenter les valeurs des indices de l'IFM et donc, augmenter le risque d'incendie. L'augmentation dans les précipitations qui serait nécessaire pour compenser le réchauffement de la plupart des indices d'IFM dépasse les changements de précipitations projetés et raisonnables (Flannigan et coll., 2016). Des augmentations dans les valeurs extrêmes de l'Indice d'humidité de l'humus²² sont projetées dans la plupart des écozones forestières du Canada d'ici 2090 (Wotton et coll., 2010). Des augmentations dans les jours de propagation d'incendies et de valeurs extrêmes de l'IFM sont projetées, les plus importants changements se situant dans l'Ouest des Prairies (Wang et coll., 2015). Plusieurs autres études projettent également des augmentations dans les indices de l'IFM et la durée de la saison des feux au Canada dans le futur (Flannigan et coll., 2009; de Groot et coll., 2013; Flannigan et coll., 2013; Kochtubajda et coll., 2006). Même si l'ampleur des changements projetés varie parmi ces études, la plupart projettent des augmentations des indices de l'IFM qui correspondent à un risque accru d'incendies.

Résumé de la section

Pour résumer, il y a un **degré de confiance moyen** que les précipitations moyennes annuelles ont augmenté, en moyenne, au Canada, avec un pourcentage d'augmentation plus élevé pour le Nord du Canada. Il y a un **degré de confiance faible** dans l'ampleur de l'augmentation en raison d'une mauvaise couverture spatiale des dossiers d'observation à long terme. Ces augmentations sont cohérentes avec la réaction simulée des précipitations face aux changements climatiques anthropiques. On prévoit que les précipitations annuelles et hivernales augmenteront partout au Canada au cours du XXI^e siècle, avec un pourcentage de changement plus important dans le Nord du Canada. On prévoit que les précipitations estivales diminueront dans le Sud du Canada dans un scénario d'émissions élevées vers la fin du XXI^e siècle, mais seulement de petits changements

21 L'Indice de sécheresse décrit la sécheresse dans les couches les plus profondes du sol forestier et dans les gros débris; les précipitations influencent la quantité d'humidité dans cette couche et la température contrôle la vitesse à laquelle la couche sèche (Wotton et coll., 2009).

22 L'Indice d'humidité de l'humus décrit la sécheresse dans les couches supérieures des débris du sol forestier; les précipitations fournissent de l'humidité et la température ainsi que l'humidité relative contrôlent la vitesse à laquelle la couche sèche (Wotton et coll., 2009).

sont projetés dans un scénario de faibles émissions. Pour l'ensemble du Canada, il y a un manque de preuves d'observations disponibles des changements dans les précipitations quotidiennes extrêmes et de courte durée. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où la réaction des précipitations extrêmes aux changements climatiques anthropiques au cours de la période historique aurait été faible par rapport à sa variabilité naturelle et donc, difficile à détecter. Cependant, dans l'avenir, les précipitations extrêmes quotidiennes sont projetées d'augmenter (*degré de confiance élevé*).

4.4: Attribution des événements extrêmes

Message clé

Le changement climatique anthropique a augmenté la probabilité de certains types d'événements extrêmes, comme les feux de forêt de Fort McMurray en 2016 (*degré de confiance moyen*) et les précipitations extrêmes qui ont produit les inondations au Sud de l'Alberta en 2013 (*degré de confiance faible*).

Il y a eu une augmentation dans les événements climatiques et météorologiques extrêmes coûteux à l'échelle mondiale (OMM, 2014) et dans l'ensemble du Canada (Kovacs et Thistlethwaite, 2014; BVGC, 2016; BDPB, 2016). Une grande partie de cette hausse est attribuable à une plus grande exposition aux effets de ces événements extrêmes, comme la population du Canada et la valeur de son infrastructure de soutien ont toutes les deux augmenté considérablement. Les changements dans l'intensité et la fréquence des événements climatiques et météorologiques extrêmes causant des dommages en raison des changements climatiques (GIEC, 2013) peuvent également jouer un rôle. Ces événements climatiques et météorologiques extrêmes attirent l'attention parce qu'ils sont rares et ont souvent des répercussions remarquables sur notre société et économie.

Il n'est généralement pas possible de répondre à la question : est-ce que les changements climatiques causés par l'humain causent un événement climatique ou météorologique particulier? Souvent, cet événement aurait pu se produire en l'absence d'effets humains. Au lieu de cela, des recherches récentes ont porté sur la question de savoir si l'activité humaine a influencé la probabilité de certains événements climatiques ou météorologiques ou, dans certains cas, la force ou l'intensité de ces événements. Alors que le climat change, attribuable en grande partie à des influences anthropiques, la probabilité d'une catégorie particulière d'événement – tous les événements aussi extrêmes ou plus extrêmes que celui défini dans l'étude – change également (NASEM, 2016). En ce sens, un événement extrême peut être attribuable à des causes extérieures au système climatique naturel. Donc, un nouveau domaine de la science du climat, appelée « attribution des événements », a émergé; elle évalue la façon dont la probabilité ou l'intensité d'un événement extrême, ou plus généralement, une catégorie d'événements extrêmes, a changé à la suite de l'augmentation des concentrations atmosphériques de GES provenant de l'activité humaine.

Un nombre croissant d'événements extrêmes au Canada et à l'échelle mondiale sont examinés de cette façon (p. ex. Herring et coll., 2017; NASEM 2016). Plusieurs de ces analyses d'attribution des événements sont pertinentes pour les Canadiens (voir le tableau 4.7). Deux exemples sont soulignés dans cette section, y compris une description des méthodes d'analyse dans l'encadré 4.3.

Tableau 4.7: Analyses d'attribution des événements pertinentes dans le contexte canadien

ÉVÉNEMENT	RÉFÉRENCE	BREF APERÇU DES CONCLUSIONS
Sécheresse		
La sécheresse de 2015 dans l'Ouest canadien	Szeto et al., 2016 ^a	Les changements climatiques anthropiques ont augmenté la probabilité d'un printemps extrêmement chaud, mais aucune contribution à la tendance météorologique observée n'a été détectée.
Inondations		
Inondations dans le sud-est de la région des Prairies en 2014	Szeto et al., 2015 ^a	L'influence anthropique peut avoir augmenté les précipitations, mais la modification du paysage a joué un rôle clé dans l'augmentation du ruissellement.
Inondations de l'Alberta en 2013	Teufel et al., 2017 ^b	Augmentation de la probabilité de précipitations extrêmes dans cette région en raison de l'élément anthropique, aucune influence anthropique détectée pour le ruissellement.
Froid extrême		
Février froid en Amérique du Nord en 2015	Bellprat et al., 2016	L'événement déterminé était principalement en raison de la variabilité naturelle, malgré la possibilité d'une certaine contribution de la diminution de la glace marine de l'Arctique et de l'augmentation de la température à la surface de la mer.
Hiver extrêmement froid de 2013-2014 en Amérique du Nord	Yu and Zhang, 2015	La tendance de réchauffement suggérée a rendu l'événement moins extrême qu'il aurait pu l'être.
Hiver extrêmement froid de 2013-2014	Wolter et al., 2015 ^a	Des événements de froid extrême sont devenus beaucoup moins probables en raison de la tendance à long terme du réchauffement anthropique.
Chaleur extrême		
Températures extrêmement chaudes de l'Arctique en novembre et décembre 2016	Kam et al., 2017 ^a	Des températures extrêmement chaudes en Arctique ne se seraient probablement pas produits sans la contribution anthropique.
Températures extrêmement chaudes dans l'Est du Pacifique et de l'Ouest de l'Atlantique en 2014	Kam et al., 2015 ^a	Des températures extrêmement chaudes dans l'Est du Pacifique et l'Ouest de l'Atlantique sont considérablement plus probables avec l'élément anthropique.
Glace marine de l'Arctique		

Tableau 4.7: Analyses d'attribution des événements pertinentes dans le contexte canadien

Étendue minimale de glace marine enregistrée en 2012	Kirchmeier-Young et al., 2017 ^b	L'étendue minimale de glace marine enregistrée pendant l'été dans l'Arctique ne se serait pas produite sans la contribution anthropique.
Faible étendue de glace marine enregistrée en mars 2015	Fučkar et al., 2016 ^a	L'étendue de la glace marine observée ne se serait pas produite sans l'influence sous-jacente des changements climatiques.
Étendue minimale de glace marine enregistrée en 2012	Zhang and Knutson, 2013	L'étendue minimale de glace marine enregistrée est extrêmement improbable d'avoir été causée par la variabilité interne.
Feux de forêt		
Feux de forêt de Fort McMurray de 2016	Kirchmeier-Young et al., 2017 ^{a,b}	La contribution anthropique a augmenté la probabilité de risque de feux de forêt extrêmes et la durée de la saison des feux.
Feux de forêt de Fort McMurray de 2016	Tett et al., 2017 ^a	La contribution anthropique a augmenté la probabilité de déficit hygrométrique extrême, ce qui augmente le risque d'incendie.
Saison des feux de forêt d'Alaska en 2015	Partain et al., 2016 ^a	La contribution anthropique a augmenté la probabilité de risque de feux de forêt extrêmes.

^a Inclus dans les rapports spéciaux annuels du Bulletin of the American Meteorological Society sur l'attribution des événements.

^b Discuté plus en détail dans la présente section.

^c Discuté plus en détail dans le chapitre 5.

Encadré 4.3: Méthodes pour l'attribution des événements

L'attribution des événements est utilisée pour quantifier la façon dont les changements climatiques influencés par l'humain influencent l'occurrence d'un type (ou d'une classe) particulier d'événement extrême. Ses objectifs sont semblables à ceux des processus de détection et d'attribution décrits dans le chapitre 2 (voir la section 2.3.4), mais se concentrent sur les événements individuels. Les analyses d'attribution des événements (NASEM, 2016) comparent la probabilité d'une classe particulière d'événements (p. ex. tous les événements aussi extrêmes ou plus extrêmes que l'événement défini dans l'étude) entre un monde factuel, qui comprend l'élément humain et un monde contrefactuel qui comprend seulement les facteurs naturels – voulant dire, le « climat qui aurait pu exister » en l'absence de l'élément humain.

Pour démontrer, la figure 4.21 montre les distributions des valeurs possibles d'un climat variable pour le monde sans la contribution humaine en bleu et pour un scénario comme celui que nous avons vécu avec la contribution humaine en rouge. Les régions nuancées représentent la probabilité qu'un événement extrême particulier (un résultat aussi extrême, ou plus, que celui indiqué par la barre verticale) se produise dans chaque scénario. La probabilité de ces événements augmente lorsque la contribution humaine est incluse – de 1 sur 60 à 1 sur 5. Le ratio de la probabilité avec la contribution humaine à la probabilité sans la contribution humaine est référé comme « ratio de risque ». Bien que cet événement puisse se produire en l'absence d'influence humaine, il est 12 fois plus probable (ratio de risque de 12) lorsque l'élément humain est inclus.

Les conclusions d'une analyse d'attribution des événements dépendent souvent de la façon dont la question est posée. Cela comprend les choix faits lors de la définition d'événements et de l'élaboration de l'approche de l'analyse. Par exemple, le changement de probabilité entre les deux scénarios dans la figure 4.21 dépend de placement de la barre verticale ou de la limite inférieure de l'ampleur qui définit l'événement choisi. Les changements dans les probabilités d'extrêmes de température et de précipitations dépendent de la probabilité des événements dans le climat actuel, avec des ratios de risque plus important correspondant aux événements plus extrêmes (plus rares) (Kharin et coll., 2018). L'incertitude dans le ratio de risque (c.-à-d. le résultat d'attribution des événements) devient plus importante pour les événements plus rares, puisqu'il est plus difficile d'estimer les probabilités de ces événements très rares. Le choix de la variable ou de la région pour déterminer les distributions a également une influence sur les résultats.

Deux types de questions ont été posées dans les analyses d'attribution des événements : comment la probabilité d'événement extrême (fréquence) a-t-elle changé, et comment l'intensité de l'événement (ampleur) a-t-elle changé? À titre d'exemple, l'attribution d'un événement de précipitations intenses provoquant des inondations peut essayer de répondre aux questions suivantes : « est-ce que les changements climatiques causés par l'humain ont rendu ce type d'événement de précipitations intenses plus fréquent? » (fréquence) ou « est-ce que les changements climatiques causés par l'humain ont augmenté la quantité de précipitations dans ces types de tempêtes? » (ampleur). L'influence humaine pourrait avoir des répercussions différentes sur la fréquence que sur l'ampleur d'un événement particulier. Il est donc important de comprendre les caractéristiques de l'événement en évaluation et d'interpréter les résultats d'une analyse d'attribution des événements selon le contexte.

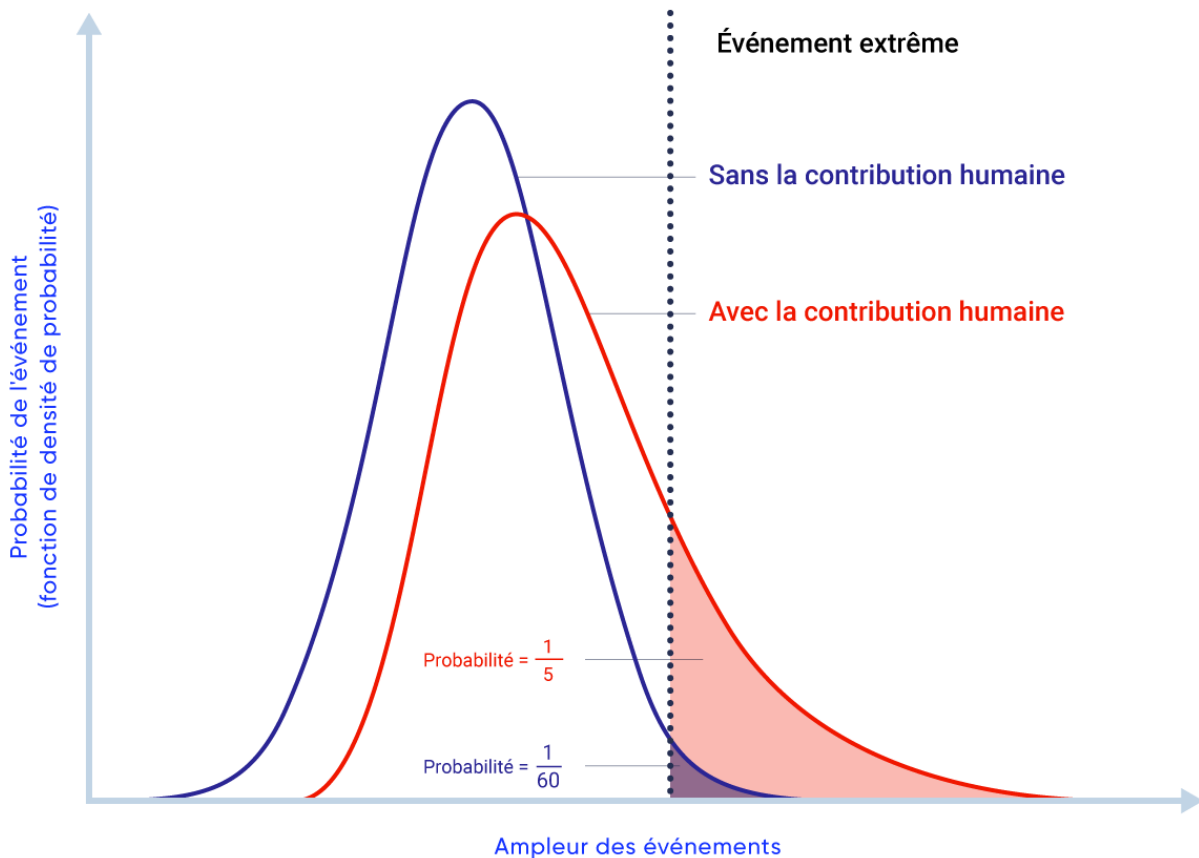


Figure 4.21: Illustration hypothétique de l'attribution d'un événement

La distribution bleue représente les valeurs possibles d'une variable du climat dans un monde sans influence humaine. La distribution rouge représente les valeurs possibles de la même variable avec la contribution humaine. Les zones de couleur indiquent la probabilité de vivre un événement extrême (défini par la barre verticale pointillée) dans chaque scénario.

SOURCE DE LA FIGURE : PRODUITE POUR CE RAPPORT PAR LE PACIFIC CLIMATE IMPACTS CONSORTIUM (PCIC).

4.4.1: Attribution de deux événements récents

4.4.1.1: Inondations au Sud de l'Alberta en 2013

En juin 2013, un événement d'inondations extrêmes dans le Sud de l'Alberta est devenu le désastre naturel le plus coûteux pour le Canada à ce jour, entraînant des dommages importants aux biens et infrastructures dans toute la région, y compris la ville de Calgary. L'inondation a entraîné le déplacement de près de 100 000 personnes et des dommages de 6 milliards de dollars, dont 2 milliards en pertes assurées (ECCC, 2017).

Une tempête produisant de fortes précipitations dans la région a provoqué une inondation dans le bassin de la Bow River, mais une combinaison de facteurs météorologiques et hydrologiques a entraîné une inondation extrême. Une étude récente (Teufel et coll., 2017) évalue les contributions de plusieurs de ces facteurs y compris les émissions de GES anthropiques.

L'étude a utilisé le modèle régional canadien du climat (MRCC) pour effectuer d'importants ensembles de simulations à haute résolution pour l'Amérique du Nord. Pour évaluer la contribution des changements climatiques anthropiques, les simulations du modèle ont été effectuées en utilisant les niveaux de GES d'aujourd'hui et également les niveaux préindustriels pour représenter le temps avant que les humains aient une influence visible sur le climat.

Pour estimer la probabilité de l'événement, des périodes de récurrence ont été calculées pour des totales de précipitations sur trois jours en mai et juin, dépassant la quantité observée. La période de récurrence pour l'événement observé à la Bow River dans le climat d'aujourd'hui était estimée à environ 60 ans. En utilisant les projections du climat, la période de récurrence est estimée d'être réduite à environ 20 ans d'ici la fin du XXI^e siècle (dans le cas d'un scénario d'émissions moyennes [RCP4.5] et d'un scénario d'émissions élevées [RCP8.5]), impliquant que le type de précipitations extrêmes qui a mené à l'inondation dans le sud de l'Alberta deviendra beaucoup plus courant dans le futur.

Les périodes de récurrence estimées ont été comparées entre le climat d'aujourd'hui et le climat préindustriel, afin de déterminer la contribution humaine (voir la figure 4.22). L'inclusion des émissions de GES d'origine humaine a entraîné des périodes de récurrence plus courtes (l'événement est encore plus probable) pour les précipitations maximales sur trois jours dans l'entière région du Sud de l'Alberta que pour les niveaux préindustriels (voir la figure 4.22a). La variabilité climatique et météorologique a tendance à être plus importante pour les plus petites régions, entraînant un plus petit ratio entre l'influence anthropique et la variabilité naturelle interne. Donc, l'influence anthropique sur les événements de précipitations dans la région du bassin de la Bow River était moins prononcée (voir la figure 4.22 b). Il n'y a pas de différence visible pour le ruissellement de surface maximal sur trois jours et donc, aucune influence anthropique n'est détectée pour cette variable (voir la figure 4.22c). Les auteurs reconnaissant les incertitudes liées à la modélisation des processus hydrologiques complexes de surface et suggèrent que toute augmentation des précipitations pourrait être compensée par une diminution du manteau neigeux ou des conditions de sol gelé.

En résumé, l'influence humaine a été détectée pour les précipitations produisant des inondations, particulièrement dans les plus grandes régions, mais l'influence humaine n'a pas pu être détectée pour l'inondation en elle-même. Une inondation est le résultat de nombreux facteurs en plus de la quantité de précipitations, y compris les conditions du sol, les caractéristiques du manteau neigeux ainsi que la taille et l'orientation de la tempête. Par conséquent, deux événements avec la même quantité de précipitations ne produisent pas nécessairement des inondations de la même ampleur. Les processus hydrologiques complexes qui se produisent après les que précipitations atteignent le sol ajoute une incertitude supplémentaire ce qui diminue la capacité à détecter l'influence humaine.

L'augmentation des émissions de GES, en grande partie à cause des activités humaines, entraîne une hausse des températures. Une augmentation des températures permet à plus d'humidité d'être disponible dans l'atmosphère pour des précipitations, menant à une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes. Les inondations au Sud de l'Alberta en 2013 étaient le résultat d'une combinaison de nombreux facteurs et cette étude démontre que les émissions de GES anthropiques ont augmenté la probabilité d'une quantité extrême de précipitations dans le Sud de l'Alberta, une augmentation au moins aussi importante que la quantité observée lors de cet événement.

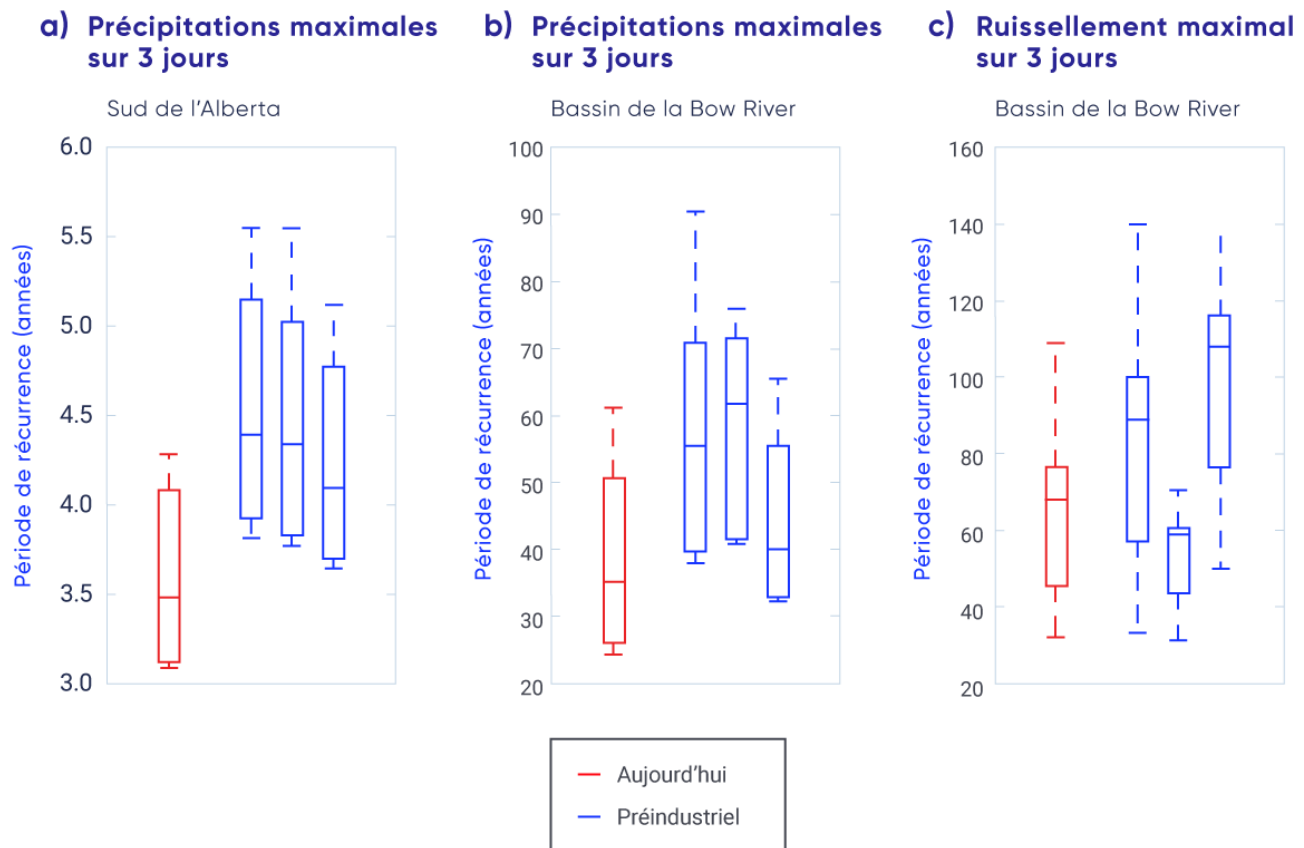


Figure 4.22: Précipitations et ruissellement qui ont mené à l'inondation dans le sud de l'Alberta en 2013

Les périodes de récurrence pour les précipitations maximales observées sur trois jours (a, b) et le ruissellement maximal sur trois jours (c) qui ont mené à l'événement extrême d'inondation du Sud de l'Alberta en 2013. Les périodes de récurrence d'aujourd'hui sont montrées en rouge et les périodes de récurrence de trois simulations préindustrielles sont montrées en bleu. L'analyse est pour la plus grande région dans le sud de l'Alberta (a) et le plus petit bassin de la Bow River (b, c). Les tracés de boîtes montrent l'étendue dans les périodes de récurrence pour différentes estimations des valeurs observées provenant des simulations de référence. Les limites des boîtes indiquent la portée du 25^e au 75^e percentile, la ligne du milieu indiquant le 50^e percentile, et les moustaches s'étendant à 1,5 fois la largeur de la boîte ou à la valeur la plus extrême.

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE TEUFEL ET COLL., 2017.

4.4.1.2: Feux de forêt de Fort McMurray en 2016

Au début de mai 2016, un grand feu de forêt a brûlé près de 600 000 ha (couvrant une superficie de 6 000 kilomètres carrés) dans le Nord de l'Alberta. Ce feu a entraîné l'évacuation de tous les résidents de Fort McMurray (plus de 80 000 personnes) et a stoppé la production dans les sables bitumineux (gouvernement de l'Alberta, 2016). Les pertes assurées sont estimées à 3,5 milliards de dollars (IBC, 2016). Le coût total de l'événement est encore à déterminer, mais on s'attend à ce qu'il soit beaucoup plus élevé.

Le feu s'est déclenché près de la Horse River dans des conditions de combustible très sec. De forts vents quelques jours plus tard ont entraîné une propagation rapide et une croissance du feu. Une étude a utilisé l'attribution des événements pour évaluer l'influence des changements climatiques d'origine humaine sur plusieurs mesures de risques de feux de forêt (voir l'encadré 4.2), bien qu'il ne s'agisse pas de feu extrême, dans cette région (Kirchmeier-Young et coll., 2017 a).

Comme dans l'exemple précédent, l'étude a utilisé d'importants ensembles de simulations de modèles, dans ce cas employant le modèle canadien du système terrestre (CanESM²). Pour évaluer l'influence humaine, on a fait une simulation avec des forçages naturels (effets solaires et volcaniques) seulement et également avec une combinaison des forçages naturels et anthropiques. L'élément anthropique comprend les émissions de GES, les aérosols, les changements de l'ozone atmosphérique et le changement de l'utilisation des terres.

Les conditions météorologiques propices aux incendies forestiers (voir l'encadré 4.2), le comportement du feu et les mesures de la saison des feux ont été calculés pour caractériser le risque d'incendie à partir des résultats des modèles climatiques. Pour quantifier la contribution anthropique, un ratio de risque (NASEM, 2016) a été calculé en tant que ratio de deux probabilités : un pour l'occurrence de l'événement lorsque l'élément humain est inclus et un pour l'occurrence du même événement avec des facteurs naturels seulement. Le ratio de risque peut être interprété comme étant le nombre de fois plus probable que l'événement se produise en raison de facteurs anthropiques. Par exemple, un ratio de risque de 1 n'implique aucun changement dans la probabilité de l'occurrence et un ratio de risque de 2 indique que l'événement est deux fois plus probable ou qu'il y a eu une augmentation de 100 % dans la probabilité de l'événement par rapport au climat non perturbé.

Les résultats de l'analyse montrent que trois des indices de risque d'incendie – valeurs extrêmes de l'indice forêt-météo (IFM; voir l'encadré 4.2), un grand nombre de jours de propagation et de longues saisons de feux – montrent tous des valeurs de ratio de risque supérieures à 1 (voir la figure 4.23), ce qui indique que les valeurs extrêmes de chaque mesure de risque de feux de forêt sont plus probables lorsque le réchauffement anthropique est pris en compte. Les ratios de risque varient parmi les différents indices de risque d'incendie analysés. Cependant, les valeurs extrêmes de toutes les mesures décrivant le risque de feu de forêt sont plus probables avec le forçage anthropique.

Des augmentations de température, comme celles observées partout au Canada (voir la section 4.2) mèneront à des combustibles plus secs et donc un potentiel d'incendie plus élevé de même que des saisons des feux plus longues. Cela nécessiterait une augmentation des précipitations bien au-delà de ce qu'on s'attend à la suite des changements climatiques pour compenser l'augmentation des températures en matière des indices de l'IFM (Flannigan et coll., 2016). L'étude a démontré que le feu de forêt extrême de l'Alberta en 2016 s'est produit dans un monde où le réchauffement anthropique a augmenté le risque d'incendie, le potentiel de propagation de feu et la durée des saisons de feu dans certaines parties de l'Alberta et de la Saskatchewan.

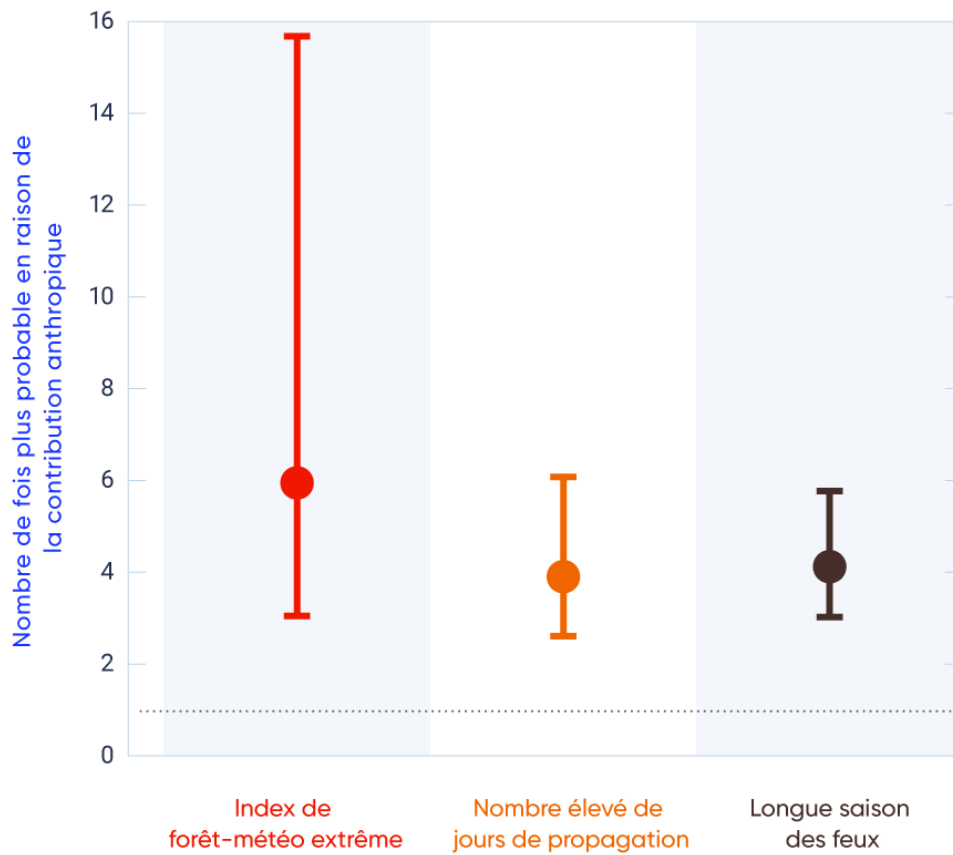


Figure 4.23: Ratios de risque pour trois mesures de risque de feux de forêt extrêmes

Ratios de risque pour trois mesures de risque de feux de forêt extrêmes dans les zones homogènes de régime des feux au Sud des Prairies (Boulanger et coll., 2014), montrant l'augmentation dans la probabilité en raison de la contribution anthropique. Un ratio de risque supérieur à 1 (ligne pointillée) indique que l'événement extrême est plus probable lorsque la contribution humaine est prise en compte. Les trois mesures utilisées pour caractériser le risque de feux de forêt extrêmes dans cette région sont les conditions météorologiques propices aux incendies forestiers (l'indice forêt-météo extrême), le comportement du feu (un nombre élevé de jours de propagation de feu) et la saison des feux (longues saisons des feux). Les barres d'erreur représentent la plage d'incertitude de 5% à 95 %.

SOURCE DE LA FIGURE : ADAPTÉ DE KIRCHMEIER-YOUNG ET COLL., 2017A.



Résumé de la section

Pour résumer, un nouveau domaine d'attribution des événements a émergé, visant à évaluer le rôle des changements climatiques d'origine humaine dans les événements extrêmes. Certains événements extrêmes récents au Canada ont été analysés de cette façon, y compris les inondations au Sud de l'Alberta en 2013 et les feux de forêt de Fort McMurray en 2016. Pour le premier événement, les émissions de GES provenant d'activités humaines ont augmenté la probabilité de précipitations extrêmes produisant des inondations, mais le degré de confiance dans cette attribution est faible en raison des difficultés à modéliser des extrêmes de précipitations, qui exposent une importante variabilité à petite échelle, comme pour cet événement. Pour le second événement, il y a un **degré de confiance moyen** que les changements climatiques d'origine humaine augmentent la probabilité de risque d'incendie extrême associé aux feux de forêt de Fort McMurray de 2016. L'évaluation du **degré de confiance moyen** équilibre de **degré de confiance élevé** de l'influence humaine sur l'augmentation de température, qui influence fortement le risque d'incendie, avec de nombreux autres facteurs contribuant à cet événement qui sont plus difficiles à représenter dans un modèle climatique.

Références

Amiro, B.D., Logan, K.A., Wotton, B.M., Flannigan, M.D., Todd, J.B., Stocks, B.J. et Martell, D.L. « Fire weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 13, 2007, pp. 391–400, doi:10.1071/WF03066.

Assel, R.A. « Maximum freezing degree-days as a winter verity index for the Great Lakes, 1897–1977 », *Monthly Weather Review*, vol. 108, 1980, pp. 1440–1445, doi:10.1175/1520-0493(1980)108%3C1440:MFDDAA%3E2.0.CO;2

Barbero, R., Fowler, H.J., Lenerink, G. et Blenkinsop, S. « Is the intensification of precipitation extremes with global warming better detected at hourly than daily resolutions? », *Geophysical Research Letters*, 2017. doi:10.1002/2016GL071917

BDPB (Bureau du Directeur parlementaire du budget). *Estimation du coût annuel moyen des Accords d'aide financière en cas de catastrophe causée par un événement météorologique*, Ottawa, Canada, 2016, < <https://www.pbo-dpb.gc.ca/fr/blog/news/DFAA>>.

Bellprat, O., Massonnet, F., García-Serrano, J., Fučkar, N. S., Guemas, V. et Doblas-Reyes, F. J. « The role of Arctic sea ice and sea surface temperatures on the cold 2015 February over North America », dans *Explaining Extreme Events of 2015 from a Climate Perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, 2016, pp. S36–S41. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0159.1

Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I.I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R. et Zhang, X. « Détection et attribution des changements climatiques : de l'échelle mondiale à régionale », dans *Changements climatiques 2013: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 867–952. Version anglaise doi:10.1017/CBO9781107415324.008

Boulanger, Y., Gauthier, S. et Burton, P.J. « A refinement of models projecting future Canadian fire regimes using homogeneous fire regime zones », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 44, 2014, pp. 365–376, doi:10.1139/cjfr-2013-0372.

BVGC (Bureau du vérificateur général du Canada). Rapport 2 — L'atténuation des effets du temps violent, *Rapports de la commissaire à l'environnement et au développement durable*, 2016, <http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/att_f_41392.html>.

Casati, B., Yagouti, A. et Chaumont, D. « Regional climate projections of extreme heat events in nine pilot Canadian communities for public health planning », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52, 2013, pp. 2669–2698. doi:10.1175/JAMC-D-12-0341.1

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe,

M., Tebaldi, C., Weaver, A.J. et Wehner, M.: « Changement climatique à long terme: projections, engagements et irréversibilité », dans *Changements climatiques 2013: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 1029-1136. Version anglaise doi:10.1017/CBO9781107415324.008

de Groot, W.J., Flannigan, M.D. et Cantin, A.S. « Climate change impacts on future boreal fire regimes », *Forest Ecology and Management*, vol. 294, 2013, pp. 35–44. doi:10.1016/j.foreco.2012.09.027.

DeBeer, C.M., Wheeler, H.S., Carey, S.K. et Chun, K.P. (2016): « Recent climatic, cryospheric, and hydrological changes over the interior of western Canada: a review and synthesis », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, pp. 1573–1598. doi: 10.5194/hess-20-1573-2016

ECCC (Environnement et changement climatique Canada). « Données et scénarios climatiques pour le Canada : Synthèse des observations et des résultats récents de modélisation », 2016, Cat. No.: En84-132/2016E -PDF.

ECCC (Environment and Climate Change Canada) « Canada's top ten weather stories of 2013 », 2017 <<https://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=3318B51C-1>>.

Environnement Canada « The State of Canada's Climate: Monitoring Variability and Change », A State of the Environment Report, 2017, SOE report no. 95-1, Catalogue no. En1-11/95-1E, Environment Canada, Ottawa, ON.

Flannigan, M., Cantin, A.S., de Groot, W.J., Wotton, M., Newbery, A. et Gowman, L.M. « Global wildland fire season severity in the 21st century », *Forest Ecology and Management*, vol. 294, 2013, pp. 54–61. doi:10.1016/j.foreco.2012.10.022.

Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M. et Gowman, L.M. « Implications of changing climate for global wildland fire », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, 2009, pp. 483–507. doi:10.1071/WF08187.

Flannigan, M.D., Wotton, B.M., Marshall, G.A., de Groot, W.J., Johnston, J., Jurko, N. et Cantin, A.S. « Fuel moisture sensitivity to temperature and precipitation: climate change implications », *Climatic Change*, vol. 134, 2016, pp. 59–71. doi:10.1007/s10584-015-1521-0

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C. et Rummukainen, M. (2013): « Évaluation des modèles climatiques » dans *Changements Climatiques 2013: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, F. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, New York, 2013, pp. 741-866. Version anglaise doi:10.1017/CBO9781107415324.008

Fučkar, N.S., Massonnet, F., Guemas, V., García-Serrano, J., Bellprat, O., Doblas-Reyes, F.J. and Acosta, M. « Record low Northern Hemisphere sea ice extent in March 2015 », dans *Explaining Extreme Events of 2015 from a Climate Perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, 2016, pp. S136-S140. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0153.1

GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements Climatiques 2013: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, F. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, New York, 2013, pp. 3-29, <http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/onerc_spm_v3.pdf>.

Gillett, N.P., Weaver, A.J., Zwiers, F.W. et Flannigan, M.D. « Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires », *Geophysical Research Letters*, vol. 31, 2004, 4 p. doi:10.1029/2004GL020876

Girardin, M.P. et Wotton, B.M. « Summer moisture and wildfire risks across Canada », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, 2009, pp. 517–533, doi:10.1175/2008JAMC1996.1.

Girardin, M.-P., Tardif, J., Flannigan, M.D., Wotton, B.M. et Bergeron, Y. « Trends and periodicities in the Canadian Drought Code and their relationships with atmospheric circulation for the southern Canadian boreal forest », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, 2004, pp. 103–119, doi:10.1139/X03-195.

Goodsman, D.W., Groszkos, G., Aukema, B.H., Whitehouse, C., Bleiker, K.P., McDowell, N.G., Middleton, R.S. et Xu, C. « The effect of warmer winters on the demography of an outbreak insect is hidden by intraspecific competition », *Global Change Biology*, 2018. doi:10.1111/gcb.14284

Government of Alberta. *Final update 39: 2016 wildfires, 2016*

Gullett, D.W. et Skinner W.R. « The state of Canada's climate: temperature change in Canada », A State of the Environment Report, SOE report no. 92-2, Catalogue no. Enl-11/92-2E, Environnement Canada, Ottawa, ON, 1992.

Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M. et Zhai, P.M. « Observations: Atmosphère et Surface », dans *Changements Climatiques 2013: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 159–254. Version anglaise doi:10.1017/CBO9781107415324.008

Herring, S.C., Christidis, N., Hoell, A., Kossin, J.P., Schreck III, C.J. et Stott, P.A. « Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, 2017, pp. S1-S157.

Herring, S.C., Hoell, A., Hoerling, M.P., Kossin, J.P., Schreck III, C.J. et Stott, P.A. « Explaining extreme events of 2015 from a climate perspective », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, 2016, pp. S1-S145.

IBC (Insurance Bureau of Canada). *Northern Alberta wildfire costliest insured natural disaster in Canadian history – estimate of insured losses: \$3.58 billion*, 2016, <<http://www.abc.ca/bc/resources/media-centre/media-releases/northern-alberta-wildfire-costliest-insured-natural-disaster-in-canadian-history>>.

Jain, P., Wang, X. et Flannigan, M.D. « Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 and 2015 », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 26, 2017, pp. 1009–1020. doi:10.1071/WF17008

Jeong, D.I. et Sushama, L. « Rain-on-snow events over North America based on two Canadian regional climate models », *Climate Dynamics*, 2017. doi:10.1007/s00382-017-3609-x

Kam, J., Knutson, T.R., Zeng, F. et Wittenberg, A.T. « Record annual mean warmth over Europe, the northeast Pacific, and the northwest Atlantic during 2014: assessment of anthropogenic influence », dans *Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, 2015, pp. S61–S65. doi:10.1175/BAMS-D-15-00101.1

Kam, J., Knutson, T.R., Zeng, F. et Wittenberg, A.T. « CMIP5 model-based assessment of anthropogenic influence on highly anomalous Arctic warmth during November–December 2016 », dans *Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, 2017, pp. S34–S38. doi:10.1175/BAMS-D-17-0115.1

Kharin, V.V., Flato, G.M., Zhang, X., Gillett, N.P., Zwiers, F. et Anderson, K. « Risks from climate extremes change differently from 1.5°C to 2.0°C depending on rarity », *Earth's Future*, vol. 6, 2018, pp. 704–715.

Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X. et Wehner, M. « Changes in temperature and precipitation extremes in the MCIP5 ensemble », *Climatic Change*, vol. 119, 2013, pp. 345–357. doi:10.1007/s10584-013-0705-8

Kim, Y.-H., Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F., Alexander, L.V., Donat, M.G. et Tung, Y.-S. « Attribution of extreme temperature changes during 1951–2010 », *Climate Dynamics*, vol. 46, 2015, pp. 1769–1782. doi: 10.1007/s00382-015-2674-2

Kirchmeier-Young, M.C., Zwiers, F.W., Gillett, N.P. et Cannon, A.J. « Attributing extreme fire risk in Western Canada to human emissions », *Climatic Change*, vol. 144, 2017a, pp. 365–379. doi:10.1007/s10584-017-2030-0

Kirchmeier-Young, M.C., Zwiers, F.W. et Gillett, N.P. « Attribution of extreme events in Arctic sea ice extent », *Journal of Climate*, vol. 30, 2017 b, pp. 553–571. doi:10.1175/JCLI-D-16-0412.1

Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, J.A., Boer, G.J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F.J., Fiore, A.M., Kimoto, M., Meehl, G.A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G.J., Vecchi, G. et Wang, H.J. « Changements climatique à court terme: projections et prévisibilité », dans *Changements Climatiques 2013: les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D.

Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, New York, États-Unis, 2013. Version anglaise doi:10.1017/CBO9781107415324.008

Kochtubajda, B., Flannigan, M.D., Gyakum, J.R., Stewart, R.E., Logan, K.A. et Nguyen, T.-V. « Lightning and fires in the Northwest Territories and responses to future climate change », *Arctic*, vol. 59, 2006, pp. 211–221.

Kovacs, P. et Thistlethwaite, J. « Industrie », dans *Vivre avec les Changements Climatiques au Canada : Perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen, (éd.), gouvernement du Canada, Ottawa, ON, 2014, pp. 135-158.

Krasting, J.P., Broccoli, A.J., Dixon, K.W. et Lanzante, J.R. « Future changes in Northern Hemisphere snowfall », *Journal of Climate*, vol. 26, 2013, pp. 7813-7828 doi:10.1175/JCLI-D-12-00832.1

Li, G., Zhang, X., Cannon, A.J., Murdock, T., Sobie, S., Zwiers, F.W., Anderson, K. et Qian, B. « Indices of Canada's future climate for general and agricultural adaptation applications », *Climatic Change*, vol. 148, 2018, pp. 249-263.

Marvel, K. et Bonfils, C. « Identifying external influences on global precipitation », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, 2013, 6 p. doi:10.1073/pnas.1314382110

Mekis, É. et Vincent, L.A. « An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, 2011, pp. 163–177. doi:10.1080/07055900.2011.583910

Mekis, É., Vincent, L.A., Shephard, M.W. et Zhang, X. « Observed trends in severe weather conditions based on humidex, wind chill, and heavy rainfall events in Canada for 1953–2012 », *Atmosphere-Ocean*, vol. 53, 2015, pp. 383-397. doi:10.1080/07055900.2015.1086970

Milewska, E. et Hogg, W.D. (2001): « Spatial representativeness of a long-term climate network in Canada », *Atmosphere Ocean*, vol. 39, 2001, pp. 145-161.

Milewska, E. et Hogg, W.D. « Continuity of climatological observations with automation – temperature and precipitation amounts from AWOS (Automated Weather Observing System) », *Atmosphere-Ocean*, vol. 40, 2002, pp. 333–359. doi:10.3137/ao.400304

Milewska, E.J. et Vincent, L.A. « Preserving continuity of long-term daily maximum and minimum temperature observations with automation of reference climate stations using overlapping data and meteorological conditions », *Atmosphere-Ocean*, vol. 54, 2016, pp. 32-47. doi:10.1080/07055900.2015.1135784

Milewska, E.J., Vincent, L.A., Hartwell, M., Charlesworth, K. et Mekis, É. « Adjusting precipitation amounts from Geonor and Pluvio automated weighing gauges to preserve continuity of observations in Canada », *Canadian Water Resources Journal*, sous presse.

Min, S.-K., Zhang, X. et Zwiers, F.W. « Human-induced Arctic moistening », *Science*, vol. 320, 2008, pp. 518-520. doi:10.1126/science.1153468

Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W. et Hegerl, G.C. « Human contribution to more intense precipitation extremes », *Nature*, vol. 470, 2011, pp. 378-381. doi:10.1038/nature09763

Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F., Shiogama, H., Tung, Y.-S. et Wehner, M. « Multi-model detection and attribution of extreme temperature changes », *Journal of Climate*, vol. 26, 2013, pp. 7430-7451. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00551.1

Murdock, T.Q., Cannon, A.J. et Sobie, S.R. *Statistical downscaling of future climate projections for North America*, Pacific Climate Impacts Consortium, Prepared for Environment Canada, Victoria, Canada, 2014, 37 p., <https://www.pacificclimate.org/sites/default/files/publications/PCIC_EC_downscaling_report_2014.pdf>.

Najafi, M.R., Zwiers, F.W. et Gillett, N.P. « Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences », *Nature Climate Change*, vol. 5, 2015, pp. 246–249. doi:10.1038/nclimate2524

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

Najafi, M.R., Zwiers, F.W. et Gillett, N.P. « Attribution of observed streamflow changes in key British Columbia drainage basins », *Geophysical Research Letters*, vol. 44, 2017b, pp. 11012–11020.

NASEM (National Academies of Science, Engineering, and Medicine). *Attribution of extreme weather events in the context of climate change*, The National Academies Press, Washington, District of Columbia, 2016. doi:10.17226/21852

OMM (Organisation météorologique mondiale) « Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2012) », WMO-No. 1123, 2014.

Osborn, T.J. et Jones, P.D. « The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth », *Earth System Science Data*, vol. 6, 2014, pp. 61–68. doi:10.5194/essd-6-61-2014

Partain, J.L., Alden, S., Bhatt, U.S., Bieniek, P.A., Brettschneider, B.R., Lader, R.T., Olsson, P.Q., Rupp, T.S., Strader, H., Thoman, R.L., Walsh, J., York, A.D. et Ziel, R.H. « An assessment of the role of anthropogenic climate change in the Alaska fire season of 2015 », dans *Explaining Extreme Events of 2015 from a Climate Perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, 2016, pp. S14-S18. doi:10.1175/BAMS-D-16-0149.1

Podur, J., Martell, D. L., et Knight, K. « Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 32, 2002, pp. 195–205. doi: 10.1139/X01-183

Screen, J.A. et Simmonds, I. « Declining summer snowfall in the Arctic: causes, impacts and feedbacks », *Climate Dynamics*, vol. 38, 2012, pp. 2243-2256.

Shephard, M.W., Mekis, E., Morris, R.J., Feng, Y., Zhang, X., Kilcup, K. et Fleetwood, R. « Trends in Canadian short-duration extreme rainfall: Including an Intensity-Duration-Frequency Perspective », *Atmosphere-Ocean*, vol. 52, 2014, pp. 398-417.

Szeto, K., Brimelow, J., Gysbers, P. et Stewart, R. « The 2014 extreme flood on the southeastern Canadian Prairies », dans *Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective, Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, 2015, pp. S20-S24. doi:10.1175/BAMS-D-15-00110

Szeto, K., Zhang, X., White, R.E. et Brimelow, J. « The 2015 extreme drought in western Canada », dans *Explaining Extreme Events of 2015 from a Climate Perspective, Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, 2016, pp. S42-S46. doi:10.1175/BAMS-D-16-0147.1

Tett, S.F.B., Falk, A., Rogers, M., Spuler, F., Turner, C., Wainwright, J., Dimdore-Miles, O., Knight, S., Freychet, N., Mineter, M.J. et Lehmann, C.E.R. « Anthropogenic forcings and associated changes in fire risk in western North America and Australia during 2015/16 », dans *Explaining Extreme Events of 2016 from a Climate Perspective, Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, 2017, pp. S60-S64. doi:10.1175/BAMS-D-17-0096.1

Teufel, B., Diro, G.T., Whan, K., Milrad, S.M., Jeong, D.I., Ganji, A., Huziy, O., Winger, K., Gyakum, J.R., de Elia, R., Zwiers, F.W. et Sushama, L. (2017): « Investigation of the 2013 Alberta flood from weather and climate perspectives », *Climate Dynamics*, vol. 48, p. 2881–2899. doi:10.1007/s00382-016-3239-8

Vincent, L.A., Milewska, E.J., Wang, X.L. et Hartwell, M.M. « Uncertainty in homogenized daily temperatures and derived indices of extremes illustrated using parallel observations in Canada », *International Journal of Climatology*, vol. 38, 2017, pp. 692-707. doi:10.1002/joc.5203

Vincent, L.A., Wang, X.L., Milewska, E.J., Wan, H., Yang, F. et Swail, V. « A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis », *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, 2012, 13 p. doi:10.1029/2012JD017859

Vincent, L.A., Zhang, X., Bonsal, B.R. et Hogg, W.D. « Homogenization of daily temperatures over Canada », *Journal of Climate*, vol. 15, 2002, pp. 1322-1334.

Vincent, L.A., Zhang, X., Brown, R.D., Feng, Y., Mekis, E., Milewska, E.J., Wan, H. et Wang, X.L. « Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes », *Journal of Climate*, vol. 28, 2015, pp. 4545–4560. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00697.1>

Vincent, L.A., Zhang, X., Mekis, E., Wan, H. et Bush, E.J. « Monitoring changes in Canada's climate: Trends in temperature and precipitation indices based on daily monitoring data », *Atmosphere-Ocean*, 2018.

Wan, H., Zhang, X., Zwiers, F. et Min, S.-K. « Attributing Northern high-latitude precipitation change over the period 1966-2005 to human influence », *Climate Dynamics*, vol. 45, 2014, pp. 1713-1726. doi: 10.1007/s00383-014-2423-y

Wan, H., Zhang, X. and Zwiers, F.W. « Human influence on Canadian temperatures », *Climate Dynamics*, vol. 51, 2018, pp. 1–16.

Wang, X.L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y. et Pu, Q. (2010): « New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, p. 2416-2436. doi:10.1175/2010JAMC2376.1

Wang, X.L., Feng, Y. et Vincent, L.A. « Observed changes in one-in-20 year extremes of Canadian surface air temperatures », *Atmosphere-Ocean*, vol. 52, 2014, pp. 222-231. doi:10.1080/07055900.2013.818526

Wang, X., Thompson, D. K., Marshall, G. A., Tymstra, C., Carr, R. et Flannigan, M.D. « Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change », *Climatic Change*, vol. 130, 2015, pp. 573–586. doi:10.1007/s10584-015-1375-5

Wang, X.L., Wen, Q.H. et Wu, Y. « Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 46, 2007, pp. 916-931. doi:10.1175/JAM2504.1

Wang, Z., Jiang, Y., Wan, H., Yan, J. et Zhang, X. « Detection and attribution of changes in extreme temperatures at regional scale », *Journal of Climate*, vol. 30, 2017, pp. 7035-7047.

Werner, A.T. et Cannon, A.J. « Hydrologic extremes – an intercomparison of multiple gridded statistical downscaling methods », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, 2016, pp. 1483-1508. doi: 10.5191/hess-20-1483-2016

Westra, S., Alexander, L.V. et Zwiers, F.W. « Global increasing trends in annual maximum daily precipitation », *Journal of Climate*, vol. 26, 2013, pp. 3904–3918. doi:10.1175/JCLI-D-12-00502.1

Wolter, K., Hoerling, M., Eischeid, J.K., van Oldenborgh, G.J., Quan, X.-W., Walsh, J.E., Chase, T.N. et Dole, R.M. « How unusual was the cold winter of 2013/14 in the upper Midwest », dans *Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, 2015, pp. S10-S14. doi:10.1175/BAMS-D-15-0126.1

Wotton, B.M. « Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications », *Environmental and Ecological Statistics*, vol. 16, 2009, pp. 107–131. doi:10.1007/s10651-007-0084-2.

Wotton, B.M., Nock, C.A. et Flannigan, M.D. « Forest fire occurrence and climate change in Canada », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19, 2010, pp. 253–271. doi:10.1071/WF09002

Yu, B. et Zhang, X. « A physical analysis of the severe 2013/2014 cold winter in North America », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, 2015, pp. 10149-10165. doi:10.1002/2015JD02116

Zhang, R. et Knutson, T.R. « The role of global climate change in the extreme low summer Arctic sea ice extent in 2012 », dans *Explaining Extreme Events of 2012 from a Climate Perspective*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 94, 2013, pp. S23–S26.

Zhang, X., Wan, H., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C. et Min, S.-K. « Attributing intensification of precipitation extremes to human influence », *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 2013, pp. 5252-5257. doi: 10.1002/grl.51010



Zhang, X., Zwiers, F.W., Li, G., Wan, H. et Cannon, A.J. « Complexity in estimating past and future extreme short-duration rainfall », *Nature Geoscience*, vol. 10, 2017. doi: 10.1038/ngeo2911

Zhang, X., Zwiers, F.W. et Stott, P. « Multi-model multi-signal climate change detection at regional scale », *Journal of Climate*, vol. 19, 2006, pp. 4294-4307.

Zwiers, F.W., Zhang, X. et Feng, Y. « Anthropogenic influence on long return period daily temperature extremes at regional scales », *Journal of Climate*, vol. 24, 2011, pp. 881-892. doi:10.1175/2010JCLI3908.1

