

2024

Synthèse des connaissances



Évolution de la pluie verglaçante au Québec

TABLE DES MATIÈRES

Faits saillants	3
1. Introduction.....	4
2. Climat observé	6
2.1. Les normales climatiques observées.....	6
2.2. La variabilité observée aux diverses échelles temporelles.....	7
2.3. Les extrêmes observés.....	8
3. Représentation du climat historique par les modèles climatiques.....	10
4. Changements anticipés	11
4.1. Les changements dans les normales climatiques.....	13
4.2. Les changements dans la variabilité aux diverses échelles temporelles	14
4.3. Les changements dans les extrêmes climatiques.....	15
5. Événements combinés impliquant la pluie verglaçante	18
6. Ailleurs en Amérique du Nord.....	19
7. Perspectives de recherche	23
8. Crédits	25
9. Références.....	26



Faits saillants

Le Québec est parmi les endroits en Amérique du Nord où la pluie verglaçante est la plus abondante.

Elle s'y produit le plus fréquemment dans certaines vallées selon leur topographie, notamment celles du fleuve Saint-Laurent (de Montréal à Tadoussac), de la rivière des Outaouais, de la rivière Richelieu et de la rivière Saguenay.

Voir section 2.1

Pour l'Amérique du Nord, un déplacement vers le nord de la zone touchée par la pluie verglaçante est projeté. Les tendances s'accroîtront au fil du réchauffement planétaire.

Le Québec se trouve dans une zone de transition entre une augmentation projetée du verglas au nord et au nord-ouest et une diminution au sud-est du territoire nord-américain.

Voir sections 4.1 et 6

Pour explorer les projections de pluie verglaçante dans les diverses régions du Québec, rendez-vous sur [Portraits climatiques | Ouranos](#). Les projections sont disponibles par niveaux de réchauffement planétaire ainsi que par horizon temporel.



Les régions du Québec au nord du 50° parallèle

Ces régions peuvent s'attendre à une augmentation graduelle du nombre médian d'heures annuelles de pluie verglaçante par rapport à la période 1980-2009.

Voir section 4.1

Elles verront leurs heures de pluie verglaçante survenir principalement entre les mois de décembre et mai.

Voir section 4.2

Dans la plupart des régions du Québec situées au sud du 50° parallèle

Une diminution graduelle du nombre médian d'heures annuelles de pluie verglaçante par rapport à la période 1980-2009 est projetée.

Voir section 4.1

Les heures de pluie verglaçante qui subsisteront se concentreront surtout entre les mois de décembre et février.

Voir section 4.2

Ces conclusions reposent sur un nombre restreint de simulations climatiques, mais leurs résultats deviennent plus cohérents au fur et à mesure que la planète se réchauffe.

1 Introduction

La pluie verglaçante est une « pluie dont les gouttes se congèlent au moment de leur impact sur le sol, sur les objets à la surface du globe ou sur les aéronefs en vol » (Villeneuve, 1974). On parle souvent d'épisode de verglas lors des événements de pluie verglaçante. Le verglas quant à lui se définit comme un « dépôt de glace, généralement homogène et transparent, provenant de la congélation de gouttelettes de bruine ou de gouttes de pluie, en surfusion, sur les objets dont la surface est inférieure à une température de 0°C, ou très peu supérieure » (Villeneuve, 1974). Le sud du Québec est l'une des régions du continent où la pluie verglaçante se produit le plus fréquemment. Ce phénomène météorologique entraîne souvent des conséquences négatives sur les infrastructures, les écosystèmes, les activités économiques et même la santé publique.

Surfondue (eau) :

Eau refroidie à une température inférieure à son point de congélation sans qu'il y ait solidification ni cristallisation.

(Source : Glossaire international d'hydrologie, OMM/UNESCO, 2011)

La crise du verglas ayant eu lieu en [janvier 1998](#) a marqué l'histoire récente du Québec avec deux épisodes consécutifs très rapprochés de pluie verglaçante pour une durée totale de 5 jours. Récemment, l'épisode [d'avril 2023](#) d'une durée de 13 heures a entraîné une privation d'électricité pour des dizaines de milliers de foyers et des dommages à des milliers d'arbres urbains. Des épisodes courts et moins intenses peuvent aussi causer des pannes d'électricité, rendre routes et trottoirs dangereux ou endommager la flore.

Dans le contexte d'un climat changeant, il est important de se questionner sur l'évolution de la fréquence et de l'intensité de la pluie verglaçante. Depuis la parution de la Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, édition 2015 (Ouranos, 2015), les connaissances sur les changements potentiels des épisodes de pluie verglaçante ont progressé et ces avancées sont présentées dans ce document.

La formation de la pluie verglaçante

La plupart du temps, la formation de pluie verglaçante dépend de deux conditions essentielles : une couche d'air froid (< 0°C) en basse altitude et une couche d'air chaud et humide (> 0°C) au-dessus de cette masse d'air froid (Brooks, 1920; Meisinger, 1920). Des flocons de neige se forment dans les nuages, puis en tombant pénètrent la masse d'air chaud, fondent et se transforment en gouttes de pluie. La pluie traverse ensuite la couche d'air froid près de la surface, mais ne gèle pas instantanément. Elle devient plutôt de l'eau surfondue et gèle seulement lorsqu'elle entre en contact avec des objets proches de la surface dont la température est sous zéro. On parle alors du mécanisme classique de formation de la pluie verglaçante (Figure 1).

La pluie verglaçante peut aussi être formée lorsque la température en altitude est à la fois trop chaude pour former de la neige et trop froide pour former de la pluie. Dans ce cas, les précipitations se trouvent, dès leur formation, sous forme d'eau surfondue, et gèlent ensuite au contact d'objets dont la température est négative. Ce type de formation est moins courant au Québec.

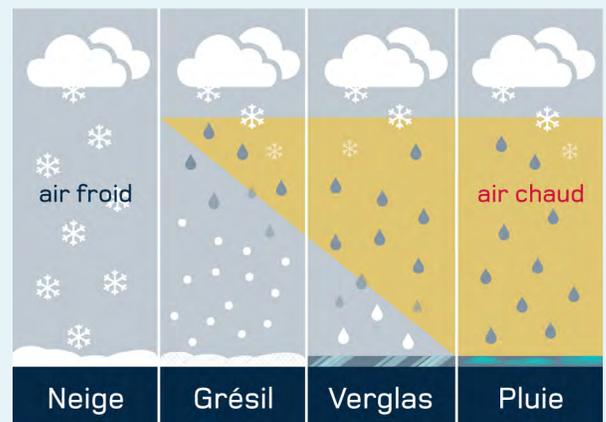


Figure 1. Profils atmosphériques de température lors de la formation de divers types de précipitations : neige, grésil, pluie verglaçante et pluie. Figure inspirée du [National Weather Service](#) des États-Unis.

Dans une configuration similaire à celle du mécanisme classique de formation de la pluie verglaçante, lorsque la couche d'air chaud n'est pas suffisamment épaisse pour que les flocons de neige aient le temps de fondre complètement et devenir de l'eau surfondue, la glace restante dans les gouttelettes fait en sorte que celles-ci regèlent lors de leur passage dans la couche froide avant d'atteindre la surface, formant ainsi des grains de glace appelés grésil (Zerr, 1997). Les impacts du grésil sont généralement moindres que ceux de la pluie verglaçante.

Les caractéristiques utilisées pour quantifier la pluie verglaçante sont les mêmes que celles utilisées pour quantifier les précipitations de façon générale : occurrence, durée et accumulation.

L'occurrence réfère au nombre d'événements de pluie verglaçante sur une période donnée alors que la durée caractérise un seul événement et se compte généralement en heures ou en jours. L'accumulation peut faire référence à l'épaisseur de la glace accumulée au sol ou bien à l'épaisseur de la glace radiale accumulée sur des surfaces courbes ou cylindriques telles que les fils électriques ou les branches par exemple.

La complexité et la nature très locale de la pluie verglaçante font en sorte que les données requises pour décrire adéquatement le comportement passé de toutes ces caractéristiques ne sont pas toujours disponibles. Ainsi, à travers les diverses sections de cette revue, on parlera tantôt de durée, tantôt d'accumulations, mais rarement des deux. Bien qu'il soit possible de lier ces deux caractéristiques de la pluie verglaçante, la conversion directe entre les durées et les accumulations demeure approximative.

Le sud du Québec est l'une des régions du continent où la pluie verglaçante se produit le plus fréquemment.



2 Climat observé

Les observations de pluie verglaçante collectées aux stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) rapportent la présence, et non pas l'accumulation de pluie verglaçante. C'est pourquoi les statistiques historiques de la pluie verglaçante pour différentes périodes et régions sont habituellement présentées en termes d'heures (McCray et al., 2019; Cortinas et al., 2004; Stuart & Isaac, 1999).

La question de l'accumulation présente plusieurs défis. Plus l'accumulation de glace est grande, plus les impacts sur la société et les écosystèmes sont importants. Il faut donc garder en tête que, bien que les observations de la pluie verglaçante ne permettent pas de décrire cette accumulation, il a été montré que la durée de l'événement est une bonne approximation de l'intensité de cet événement (Cortinas, 2000). De plus, il peut y avoir d'importantes variations dans les cumuls de glace observés sur les objets et le sol lors d'un épisode de pluie verglaçante puisque l'épaisseur de la glace accumulée ne dépend pas seulement de l'intensité des précipitations, mais également des propriétés de la surface, des vents, de la température et du taux d'humidité de l'air (Sanders & Barjenbruch, 2016; Jones, 1998; Chaîné & Skeates, 1974).

2.1. Les normales climatiques observées

Normales climatiques : moyennes ou médianes ?

Les normales climatiques permettent de décrire le climat moyen en un lieu donné. Elles sont habituellement obtenues en calculant la moyenne d'une variable climatique - ou d'une caractéristique d'un aléa - sur une fenêtre de 30 ans. Or, pour certaines variables climatiques ou pour certains aléas, la forme de leur distribution fait en sorte qu'il est plus pertinent d'utiliser la médiane plutôt que la moyenne. En effet, la médiane divise une série de données en deux parts égales, tandis que la moyenne est la somme des valeurs de la série divisée par le nombre de valeurs de cette même série. Concrètement, la médiane est le point central de la série, elle exprime la valeur du milieu. Ainsi, 50 % des valeurs de la série sont en dessous, et 50 % des autres valeurs sont au-dessus de la médiane. Pour un aléa peu fréquent comme la pluie verglaçante et dont les séries de données contiennent de nombreuses valeurs nulles, la médiane est plus adaptée pour représenter la normale que ne le serait la moyenne.

Le sud du Québec est l'une des régions du continent où la pluie verglaçante se produit le plus souvent. La Figure 2a présente la médiane du nombre d'heures annuelles observées de pluie verglaçante pour la période 1979 à 2016 (McCray et al., 2019) sur le Québec et les régions limitrophes. Sur cette carte, les valeurs médianes les plus élevées se trouvent dans les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais qui reçoivent annuellement de 40 à 50 heures de pluie verglaçante, suivies du Saguenay avec des valeurs de 30 à 40 heures par année.

En raison de leur topographie, les vallées sont propices au mécanisme de formation classique de la pluie verglaçante par la canalisation de l'air froid proche de la surface (voir encadré La formation de la pluie verglaçante, p. 4). Par exemple, les vallées du Saint-Laurent, du Richelieu et de l'Outaouais permettent aux vents froids de surface, en provenance du nord-est, de s'engouffrer dans ces canaux et d'aller à la rencontre des systèmes de basse pression chauds et humides situés au sud (Razy et al., 2012; Ressler et al., 2012; Carrera et al., 2009; Milton & Bourque, 1999). C'est ce qui explique le nombre d'heures de pluie verglaçante particulièrement élevé dans ces régions.

Les stations situées dans l'est du Québec et sur la Côte-Nord affichent des médianes annuelles de 10 à 20 heures. Les valeurs diminuent vers le nord et les quatre stations québécoises au

nord du 50^e parallèle affichent toutes des médianes d'au plus 10 heures par année. Exprimée en nombre d'épisodes de pluie verglaçante, la médiane annuelle est de l'ordre de six dans la vallée du Saint Laurent et la vallée du Saguenay, et de l'ordre de quatre pour le Bas-Saint-Laurent et le littoral de la Côte-Nord pour la période de 1979 à 2016 (McCray et al., 2019).

On notera qu'à l'intérieur d'une même région, les caractéristiques de la topographie ainsi que les fines variations du profil de température peuvent faire varier le nombre d'heures de pluie verglaçante de manière importante sur de courtes distances. Par exemple, les médianes annuelles observées à Dorval et à Saint-Hubert (respectivement

25 et 28 heures) sont plus faibles que celles observées à Mirabel (45 heures), dont la station météorologique est à environ 35 kilomètres de Dorval. Ceci s'explique par le fait qu'à Montréal et en Montérégie, les vents de surface sont souvent un peu plus chauds qu'à Mirabel ce qui a tendance à produire de la pluie plutôt que de la pluie verglaçante.

Le territoire québécois connaît donc de grandes disparités géographiques dans le nombre d'heures de pluie verglaçante, qui découlent, en bonne partie, des caractéristiques locales.

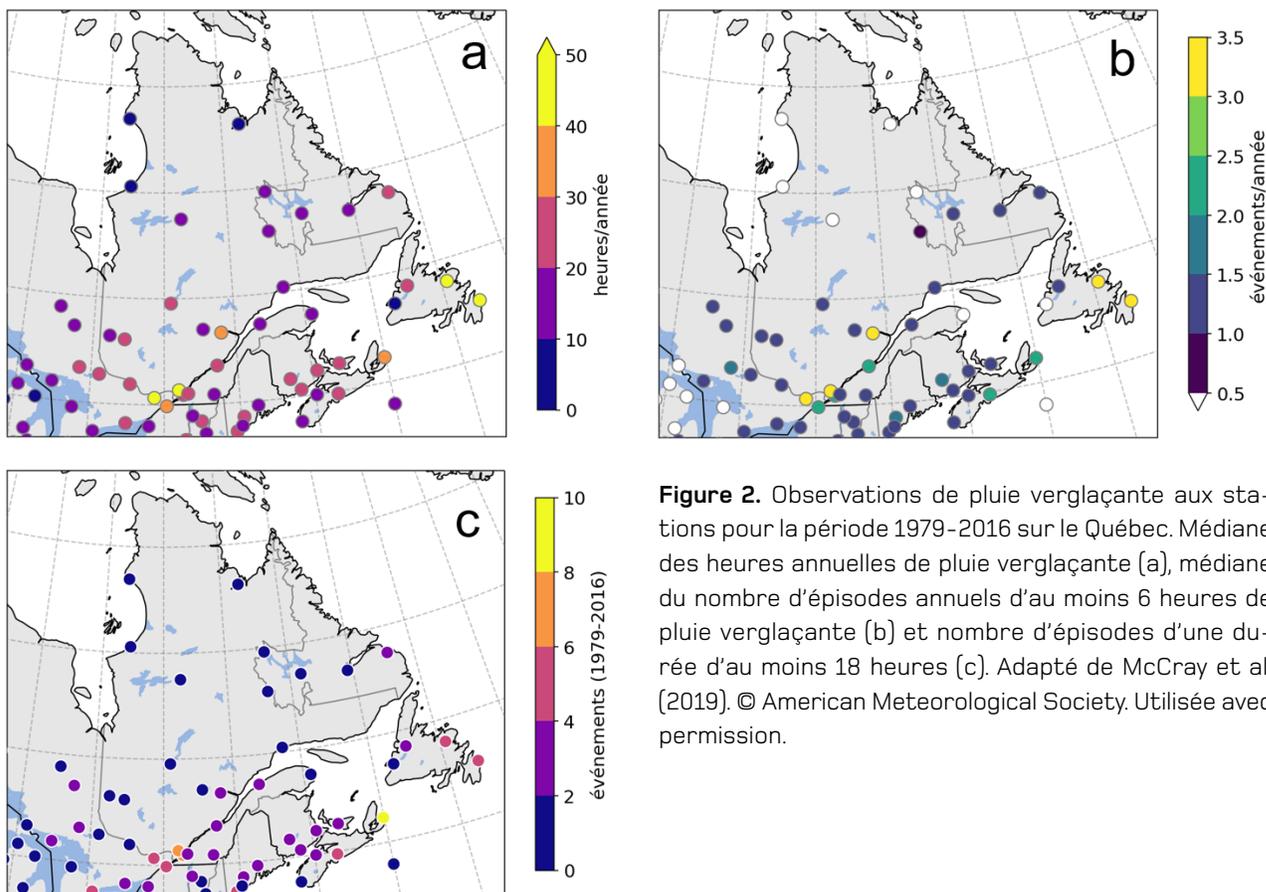


Figure 2. Observations de pluie verglaçante aux stations pour la période 1979-2016 sur le Québec. Médiane des heures annuelles de pluie verglaçante (a), médiane du nombre d'épisodes annuels d'au moins 6 heures de pluie verglaçante (b) et nombre d'épisodes d'une durée d'au moins 18 heures (c). Adapté de McCray et al. (2019). © American Meteorological Society. Utilisée avec permission.

2.2. La variabilité observée aux diverses échelles temporelles

Échelle quotidienne

L'occurrence de la pluie verglaçante varie selon le moment de la journée, en fonction du cycle diurne de la température (McCray, 2019; Cortinas et al., 2004). L'analyse des données observées sur une région qui inclut le sud du Québec et le nord-est des États-Unis montre que la pluie verglaçante débute plus fréquemment pendant la nuit ou peu après le lever du soleil et se termine plus fréquemment dans les heures qui suivent le lever du soleil.

Échelle saisonnière

Les variations intra-annuelles suivent le climat des températures de chaque région. Dans le sud du Québec, les plus hautes occurrences de pluie verglaçante sont observées aux mois de décembre et janvier (St-Pierre et al., 2019; Stuart & Isaac, 1999). Des occurrences moins importantes sont observées à la fin de l'automne en novembre, ainsi que dans une moindre mesure en février et en mars. Dans le nord du Québec, les températures sont généralement trop froides durant l'hiver pour observer de la pluie verglaçante qui est plutôt un phénomène printanier et de façon moins importante, automnal.

Échelle interannuelle

Aucune des études recensées ne fait mention de la variabilité interannuelle. Nous savons que les événements de pluie verglaçante varient fortement d'une année à l'autre, et plusieurs stations météorologiques n'en détectent pas certaines années, mais il n'y a pas assez d'événements recensés pour obtenir une statistique fiable décrivant la variabilité interannuelle. Cela est particulièrement le cas pour les stations qui rapportent de faibles nombres d'heures annuelles.

Échelle décennale

Les observations de pluie verglaçante ne sont pas assez longues et fiables pour déterminer s'il y a une composante décennale à la variabilité.

2.3. Les extrêmes observés

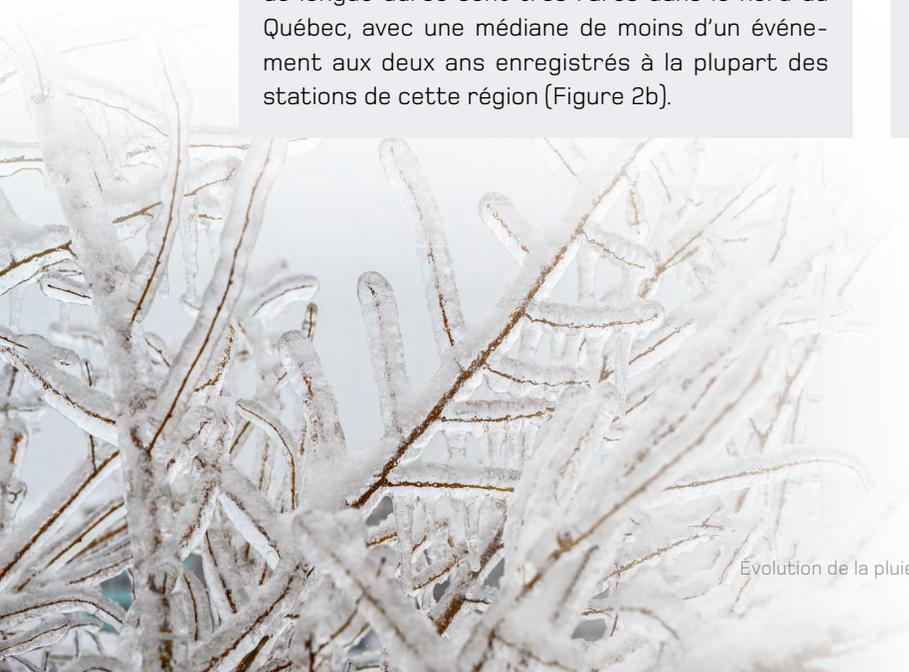
Les événements extrêmes de verglas sont souvent associés à des pluies verglaçantes de longue durée. La majorité des événements de pluie verglaçante durent moins de 6 heures (Ressler et al., 2012). En deçà de 6 heures, la couche de verglas est généralement plus fine ce qui limite les conséquences. Plusieurs études ont utilisé le seuil de 6 heures pour différencier les épisodes, définissant les épisodes comportant 6 heures et plus de pluie verglaçante comme des épisodes de longue durée (McCray et al., 2019; Ressler et al. 2012). Les événements de longue durée les plus marquants des dernières années dans le sud du Québec furent ceux de janvier 1998 (deux épisodes consécutifs) et d'avril 2023 qui ont respectivement duré 5 jours et 13 heures.

Les épisodes d'au moins 6 heures

Les épisodes de pluie verglaçante de longue durée se produisent généralement dans les régions où la pluie verglaçante est la plus souvent observée (Figure 2b; McCray et al., 2019). Au sud du 50^e parallèle, le nombre médian d'événements de longue durée est typiquement d'un à trois par année. Encore une fois, on remarque que les conditions locales des vallées du Saint-Laurent, de l'Outaouais et du Saguenay sont propices aux extrêmes, avec un nombre plus élevé d'événements. Les épisodes de longue durée sont très rares dans le nord du Québec, avec une médiane de moins d'un événement aux deux ans enregistrés à la plupart des stations de cette région (Figure 2b).

Les épisodes d'au moins 18 heures

Seul 1 % des épisodes observés en Amérique du Nord ont une durée de 18 heures et plus (Figure 2c; McCray et al., 2019). Le mois de janvier 1998, durant lequel deux épisodes consécutifs très rapprochés de pluie verglaçante totalisant cinq jours, fait partie de cette catégorie (Roebber & Gyakum, 2002; Gyakum & Roebber, 2002; Milton & Bourque, 1999). Ces événements sont extrêmement rares au Québec. En effet, durant la période 1979-2016, les stations météorologiques ont enregistré entre zéro et quatre épisodes de 18 heures et plus, à l'exception de Mirabel (sept épisodes) et Dorval (six épisodes).





En raison de leur topographie, les vallées sont propices au mécanisme de formation classique de la pluie verglaçante.

3 Représentation du climat historique par les modèles climatiques

Avant de procéder à l'analyse des changements anticipés d'un phénomène météorologique, il est important d'évaluer la capacité des modèles à simuler le phénomène dans le climat historique. La représentation de la pluie verglaçante dans les [modèles du climat](#) est complexifiée par plusieurs facteurs.

Les modèles du climat ne simulent pas directement les différents types de précipitations (neige, pluie, grésil, pluie verglaçante). Cela est d'abord dû à leur résolution spatiale qui est généralement trop basse par rapport à celle des mécanismes de microphysique menant à la pluie verglaçante et aux autres types de précipitations. De plus, l'inclusion de ces processus physiques allongerait de façon trop importante le temps de calcul requis pour simuler ces phénomènes sur plusieurs décennies. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode diagnostique qui permet de distinguer les différents types de précipitations à partir des profils atmosphériques de température et d'humidité au-dessus de la surface terrestre (Figure 1) (Bourgouin, 2000; Baldwin & Contorno, 1993; Ramer, 1993). Ces méthodes ont été développées et sont encore utilisées pour les prévisions météorologiques, effectuées à des échelles spatiales de l'ordre d'une dizaine de kilomètres.

Il est avantageux de s'appuyer sur des projections climatiques produites par des modèles régionaux pour évaluer les changements anticipés de la pluie verglaçante.

La première étude à appliquer l'une de ces méthodes aux données d'un modèle climatique global à faible résolution (Lambert et Hansen, 2011) a montré la nécessité de mieux représenter la topographie et les processus météorologiques de fine échelle pour une représentation adéquate du climat de la pluie verglaçante dans plusieurs régions, notamment la vallée du Saint-Laurent. Des études subséquentes (St-Pierre et al., 2019; Bresson et al., 2017) ont montré qu'une résolution de quelques dizaines de kilomètres, typique des modèles régionaux, permet de bien reproduire les caractéristiques du climat observé et même de reproduire la durée et les quantités de pluie verglaçante observées lors d'événements majeurs tels que la tempête de janvier 1998.

En savoir plus sur les modèles climatiques mondiaux et régionaux et leur façon d'évaluer leur performance sur ouranos.ca/



4 Changements anticipés

La majorité des analyses citées dans cette section présentent leurs résultats pour la pluie verglaçante en termes de changement par niveau de réchauffement planétaire. Cette façon de faire, adoptée dans de nombreux articles scientifiques ainsi que par le GIEC dans son plus récent rapport d'évaluation, diffère de l'approche classique qui présente des changements entre une période future fixe et une période historique de même durée.

Explorer les projections de pluie verglaçante (par niveaux de réchauffement planétaire et par horizon temporel) dans les diverses régions du Québec sur portraits.ouranos.ca.



Vu le petit nombre de projections climatiques qui simulent la pluie verglaçante, l'approche des changements exprimés par niveau de réchauffement planétaire permet d'exploiter au maximum les simulations climatiques existantes issues de différentes générations de modèles climatiques ou de famille de scénarios d'émission. Les changements sont présentés suivant trois niveaux de réchauffement : 2°C, 3°C et 4°C de réchauffement annuel moyen mondial par rapport à la période préindustrielle (1850-1900) (Figure 3, Figure 4, Figure 5, Figure 7).

Les niveaux de réchauffement planétaire

L'utilisation de niveaux de réchauffement est une méthode récemment adoptée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dans leur sixième rapport d'évaluation (AR6) pour montrer de nombreux changements anticipés. L'approche plus classique de présenter les changements entre une période future et une période de référence historique, généralement associée à des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES), est toujours employée par le GIEC. Toutefois, l'approche par niveaux de réchauffement planétaire permet de faire le lien plus facilement entre les engagements de réduction des GES et les impacts des changements projetés.

Sous certaines conditions, cette façon de faire permet de combiner les simulations et les modèles, peu importe le scénario d'émissions de GES et la sensibilité climatique des modèles. Ainsi, 2°C de réchauffement planétaire correspond à une augmentation moyenne des températures en surface de 2°C sur l'ensemble de la planète pour une période de vingt ans par rapport à la période préindustrielle de référence

1850-1900. Rappelons que l'Accord de Paris sur le climat de 2015 fixe un objectif de limiter le réchauffement planétaire à bien en dessous de 2°C, et idéalement 1,5°C, par rapport à la période préindustrielle.

Pour les périodes futures de 2041-2060 et 2081-2100, le GIEC a pris le soin d'évaluer dans laquelle de ces périodes les différents niveaux de réchauffement pourraient être atteints selon les divers scénarios d'évolution de GES. L'exercice a donc été réalisé pour les récents scénarios d'émissions de GES de la famille SSP mais aussi pour les scénarios plus anciens de la famille RCP (voir le tableau Cross-Chapter Box CLIMATE.1 du GIEC, (Ara Begum et al; 2022)). Les informations relatives aux RCP sont donc résumées dans le tableau 1 car la totalité des études citées dans cette revue sur la pluie verglaçante est basée sur cette famille de scénarios d'évolution des GES.

Il est important de mentionner que le niveau de réchauffement qui sera réellement atteint dépend de l'ampleur et de la cadence des efforts concrets de réduction des GES dès maintenant et dans les années à venir.

4 Changements anticipés

Un niveau de réchauffement planétaire de...	... suppose, par rapport au 1,2°C déjà subi, un réchauffement supplémentaire de...	... et durant les périodes ci-dessous, les plages de réchauffement associées aux divers scénarios permettraient à ce niveau d'être...					
		2041-2060			2081-2100		
		Évité	Atteint	Excédé	Évité	Atteint	Excédé
2°C	0,8°C	Non	Tous les RCP	Non	Non	RCP2.6 RCP4.5	RCP6.0 RCP8.5
3°C	1,8°C	RCP2.6 RCP4.5 RCP6.0	RCP8.5	Non	RCP2.6	RCP4.5 RCP6.0 RCP8.5	Non
4°C	2,8°C	Tous les RCP	Non	Non	RCP2.6 RCP4.5 RCP6.0	RCP8.5	Non

Tableau 1. Sommaire des liens entre les niveaux de réchauffement planétaire, le réchauffement déjà subi, et les plages de réchauffement projetées à moyen terme (2041-2060) et long terme (2081-2100) selon les divers scénarios RCP. Les informations proviennent des colonnes « full ranges » du tableau Cross-Chapter Box CLIMATE.1 du GIEC (Ara Begum et al; 2022). Les caractères gras identifient les scénarios RCP pris en compte dans les études citées dans cette revue.

Une analyse de plusieurs des facteurs pouvant influencer la fréquence de pluie verglaçante simulée par le Modèle régional canadien du climat version 5 (MRCC5) (McCray, Thériault, et al., 2022) a montré que le modèle planétaire qui sert de pilote et la méthode diagnostique utilisée sont des plus importants. Ces résultats ont motivé l'utilisation d'un ensemble de plusieurs modèles pilotes et de méthodes diagnostiques dans McCray, Paquin, et al. (2022), dont les résultats sur les changements anticipés seront présentés tout au long de cette section. Malgré l'usage d'un seul modèle climatique régional, cet ensemble tient compte de la plupart des principales sources d'incertitude.

Explorer les types d'ensemble de simulations climatiques et leur usage pour quantifier l'effet des diverses sources d'incertitudes sur ouranos.ca/



4.1. Les changements dans les normales climatiques

En climat futur, la répartition de la pluie verglaçante sur le territoire demeurera très liée à la topographie et aux fines variations de température en surface.

Dans une région qui observe historiquement des conditions propices à la formation de verglas, un réchauffement de l'atmosphère pourrait faire en sorte que les températures en surface inférieures à zéro deviennent moins fréquentes, et une diminution de la pluie verglaçante pourrait être envisagée.

Dans une région plus froide où la pluie verglaçante est actuellement rare, un réchauffement de l'atmosphère au niveau de la couche d'air chaud pourrait favoriser la formation de pluie verglaçante au détriment de la neige. Le Québec se situe à la frontière de ces deux zones. Les changements attendus seront donc très différents d'une région à l'autre.

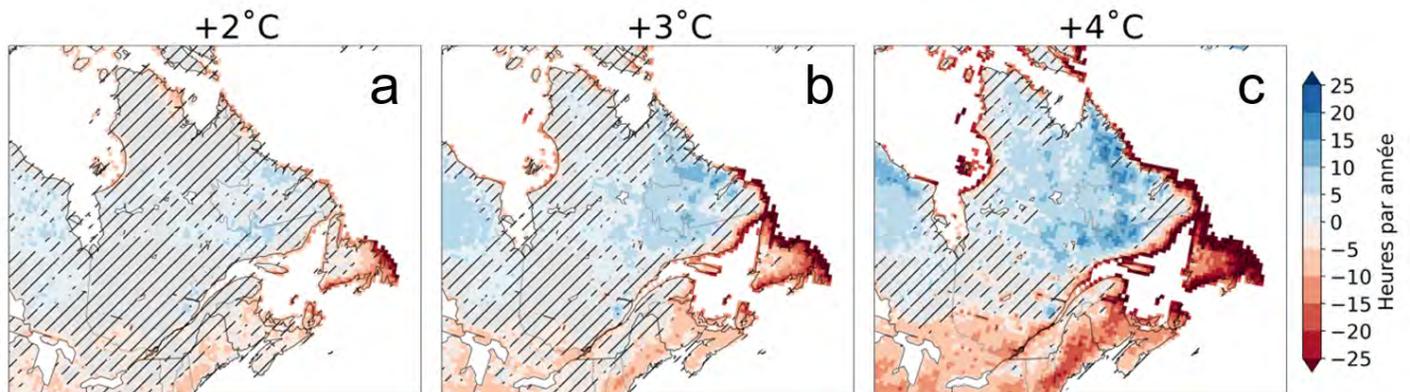


Figure 3. Moyenne des changements de la médiane des heures annuelles de pluie verglaçante projetés par un ensemble de quatre simulations du MRCC5 pour lesquelles quatre méthodes diagnostiques ont été utilisées afin de représenter la pluie verglaçante. Les changements sont présentés entre la période historique de 1980-2009 et les périodes pendant lesquelles les niveaux de réchauffement planétaire de 2°C (a), 3°C (b) et 4°C (c) sont atteints par rapport à la période préindustrielle (1850-1900). Dans les zones hachurées, moins de 80 % des combinaisons des simulations et méthodes diagnostiques s'entendent sur la direction du changement. Version modifiée de la Figure 6 de McCray, Paquin et al. (2022).

2°C de réchauffement planétaire

Si la température moyenne mondiale se réchauffe de 2°C par rapport à la période préindustrielle, les changements dans la médiane des heures annuelles de pluie verglaçante par rapport à la période 1980-2009 seront relativement incertains au Québec (Figure 3a). Il n'y a aucune grande région où au moins 80 % des projections climatiques de l'ensemble utilisé par McCray, Paquin et al. (2022) s'entendent sur la direction du changement (augmentation ou diminution).

3°C de réchauffement planétaire

Des changements plus clairs apparaissent à 3°C de réchauffement planétaire (Figure 3b). Au Québec, les changements les plus robustes, c'est-à-dire où 80 % des simulations s'entendent sur la direction du changement, se retrouvent dans le sud-est du Nunavik ainsi que dans les secteurs de la Côte-Nord longeant le Labrador avec une augmentation moyenne projetée de 5 à 10 heures par an.

Quant aux plus basses latitudes, notamment dans les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais, allant de la ville de Québec jusqu'à la frontière de l'Ontario et de l'état de New York, on projette une diminution moyenne de 5 à 10 heures par année. Au moins 80 % des projections s'entendent sur une diminution sur une petite région du sud-ouest du Québec, incluant Montréal et la Montérégie. À l'extérieur de cette région, les changements sont incertains ou près de zéro.

4°C de réchauffement planétaire

Pour un réchauffement planétaire plus intense de 4°C, les changements sont plus importants (Figure 3c). Par rapport à sa position dans un scénario de réchauffement planétaire de 3°C, la zone où les projections montrent une augmentation de la médiane des heures de pluie verglaçante s'étend vers le nord et vers l'ouest, avec des augmentations significatives d'au moins 5 heures par année dans l'est du Nord-du-Québec ainsi que dans les terres de la Côte-Nord situées loin du fleuve. On notera que les résultats sont présentés pour un ensemble réduit de simulations car seulement la moitié des modèles pilotes utilisés atteignent ce niveau de réchauffement (McCray, Paquin et al., 2022).

Avec un tel réchauffement planétaire, une diminution moyenne significative d'au moins 5 heures de pluie verglaçante par année est projetée dans les basses terres du Saint-Laurent ainsi que sur une grande partie des régions de l'Outaouais et de la moitié sud de l'Abitibi-Témiscamingue. Dans la région de Montréal, les projections indiquent plutôt une baisse de l'ordre de 15 à 20 heures de pluie verglaçante par année. Sur le littoral de la Côte-Nord et du Nunavik, des diminutions moyennes importantes pouvant aller de 10 à 15 heures par année sont aussi projetées.

Projections pour la fin du siècle

Selon le scénario d'émission utilisé, le nombre d'événements de pluie verglaçante d'ici à la fin du siècle (2070-2100) par rapport à la période 1980-2009 sera semblable aux changements projetés avec les divers degrés de réchauffement planétaire, soit une diminution dans les basses terres du Saint-Laurent, une grande partie des régions de l'Outaouais, de la moitié sud de l'Abitibi-Témiscamingue et du littoral de la Côte-Nord et du Nunavik (Bresson & Paquin, in prep.; Matte et al., 2019). Plus d'événements sont prévus dans le reste du Québec.

4.2. Les changements dans la variabilité aux diverses échelles temporelles

Échelle saisonnière

Les projections climatiques indiquent un déplacement de la période de l'année où la pluie verglaçante se produira le plus souvent. Cependant, les changements saisonniers sont plus difficiles à quantifier que les changements annuels, étant donné le petit échantillon d'événements associé à cette échelle temporelle.

La Figure 4 présente les résultats de McCray, Paquin et al. (2022) par saison et niveau de réchauffement. Le portrait général est similaire pour 2°C, 3°C et 4°C de réchauffement planétaire : tant pour les augmentations que pour les diminutions, les changements s'amplifient avec la progression du réchauffement planétaire.

En automne (Figure 4 a-b-c), le signal de diminution du nombre d'heures de pluie verglaçante se confirme

pour tout le Québec. En hiver (Figure 4 d-e-f), pour une grande région entre le 50^e et le 55^e parallèle Nord, des augmentations allant jusqu'à 10 heures de plus par saison sont attendues selon un réchauffement planétaire de 4°C (Figure 4f). Le long du fleuve Saint-Laurent ainsi que tout au long du littoral de l'estuaire et du golfe, la moyenne des durées médianes de pluie verglaçante devrait diminuer, bien que ces changements soient plus incertains.

Au printemps (Figure 4 h-i-j), le nord du Québec se démarque avec une augmentation des heures de pluie verglaçante tandis que les régions situées plus au sud peuvent s'attendre à des diminutions.

Vu l'état des connaissances et des données climatiques, il n'est pas encore possible de se prononcer sur l'évolution de la variabilité aux échelles quotidiennes, interannuelles et décennales.

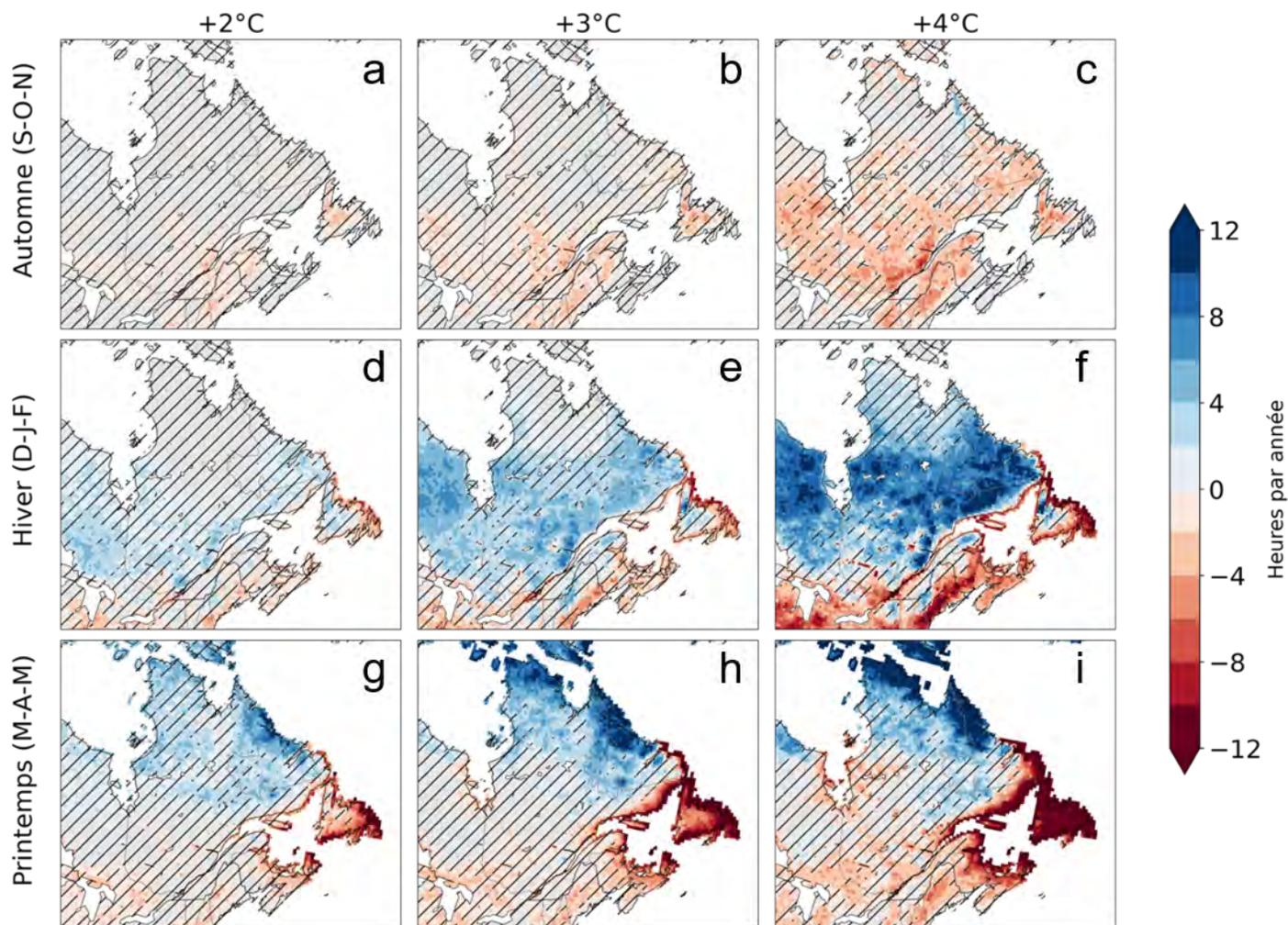


Figure 4. Moyenne des changements de la médiane des heures saisonnières de pluie verglaçante projetés par un ensemble de quatre simulations du MRCC5 pour lesquelles quatre méthodes diagnostiques ont été utilisées afin de représenter la pluie verglaçante. Les résultats sont présentés pour l'automne (septembre, octobre et novembre; a-b-c), l'hiver (décembre, janvier et février; d-e-f) et le printemps (mars, avril et mai; g-h-i). Les changements sont présentés entre la période historique de 1980–2009 et les périodes pendant lesquelles des niveaux de réchauffement planétaire de 2°C (a-d-g), 3°C (b-e-h) et 4°C (c-f-i) sont atteints par rapport à la période préindustrielle (1850–1900). Dans les zones hachurées, moins de 80 % des combinaisons des simulations et méthodes diagnostiques s'entendent sur la direction du changement. Version modifiée de la Figure 7 de McCray, Paquin et al. (2022).

4.3. Les changements dans les extrêmes climatiques

La rareté des épisodes de verglas extrême (section 2.3) rend difficile l'identification des changements de ces événements par rapport au passé. Quelques analyses ont néanmoins été produites sur les extrêmes.

Périodes de retour d'accumulations extrêmes de pluie verglaçante

Deux études se sont concentrées sur les valeurs extrêmes de l'épaisseur de glace accumulée lors d'événements de pluie verglaçante en lien avec la sécurité des bâtiments et des infrastructures (Cannon et al., 2020; Jeong et al., 2019).

4 Changements anticipés

Les analyses de Cannon et al., (2020) présentées à la Figure 5 montrent les changements projetés pour des événements de verglas extrêmes, relativement rares, dont la période de retour est de 20 ans. Cela signifie que ce type d'événement a statistiquement eu lieu une fois aux 20 ans et qu'il a 5 % de chances de se produire à chaque année. Pour des niveaux de réchauffement planétaire de 3°C (Figure 5b) et 4°C (Figure 5c) par rapport à la période préindustrielle, plusieurs secteurs de la Côte-Nord et du Nord-du-Québec montrent des augmentations allant de 20 à 40 % de la quantité de verglas extrême. D'ailleurs, on constate que ces régions sont semblables à celles identifiées à la Figure 3 par McCray, Paquin et al. (2022) où des hausses du nombre médian d'heures annuelles de pluie verglaçante sont anticipées (voir section 4.1). Les autres régions, principalement au sud du Québec, peuvent s'attendre à des augmentations inférieures à 20 % des épaisseurs de glace de période de retour 20 ans.

Quant aux événements extrêmes de pluie verglaçante ayant une période de retour de 50 ans, autrement dit pour les extrêmes de pluie verglaçante dont la probabilité d'occurrence annuelle est de 2 %, les conclusions sont similaires, avec des augmentations d'accumulation de glace comprises entre 0 et 20 % (Jeong et al., 2019).

On notera que les résultats présentés par Cannon et al., (2020) et Jeong et al., (2019) ont un niveau de confiance moyen quant à l'augmentation des charges de glace sur l'ensemble du Canada, mais un niveau de confiance très faible quant à la répartition régionale ou locale de ces changements en lien avec une importante variabilité naturelle.

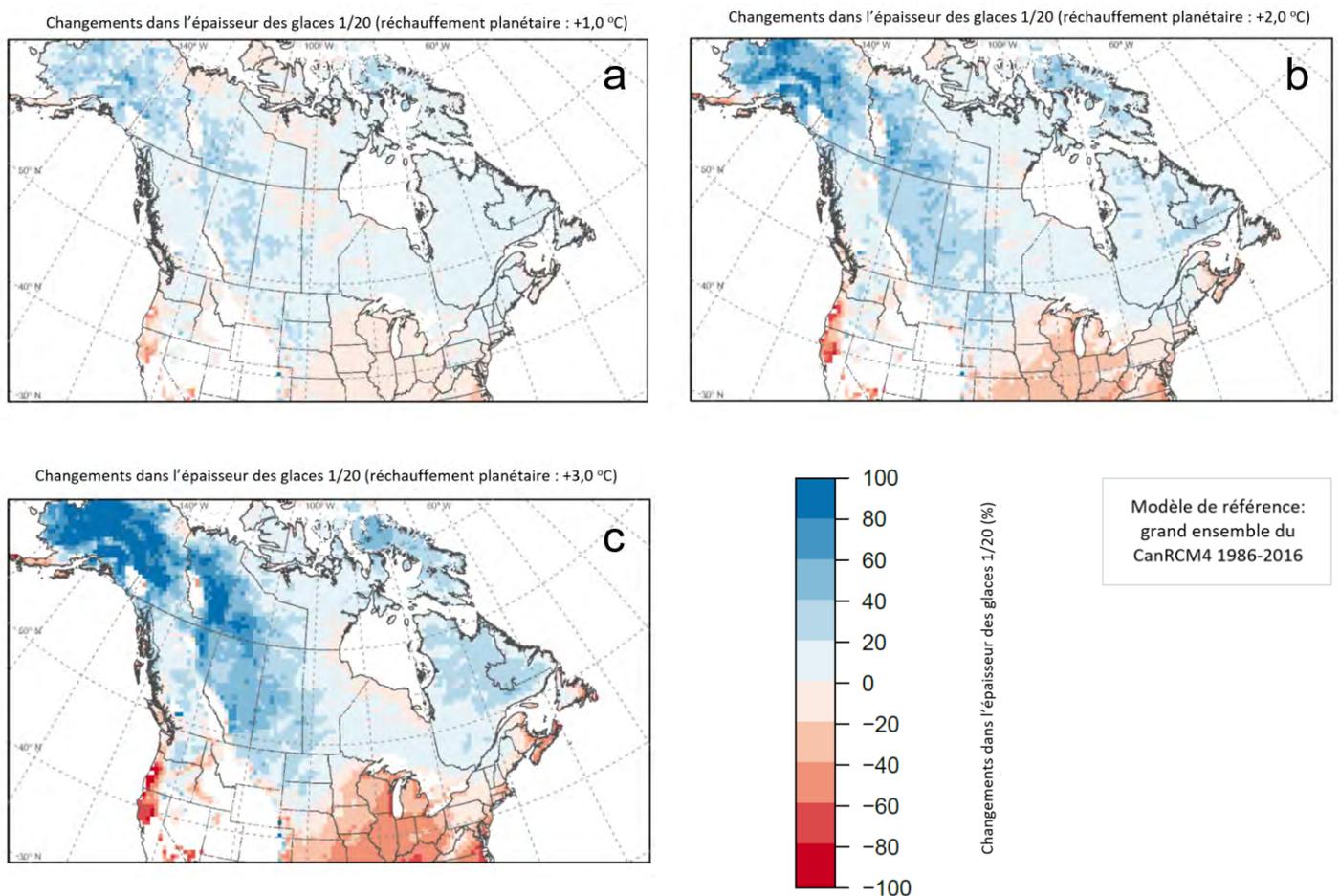


Figure 5. Changements de l'épaisseur de glace avec une période de retour de 20 ans pour trois niveaux de réchauffement planétaires par rapport à la période de référence 1986–2016 : 1°C (a), 2°C (b) et 3°C (c). Par rapport à la période préindustrielle, ces niveaux sont équivalents à 2°C, 3°C et 4°C, respectivement. Tiré de Cannon et al. (2020).

Dépassement de seuil d'accumulation de verglas

Le changement du nombre d'épisodes générant plus de 10 mm de précipitations verglaçantes entre différentes périodes passées et futures a été analysé (Bresson & Paquin, in prep.). D'ici à la fin du siècle, on s'attend à des changements infimes pour ces événements rarissimes : des diminutions pour les vallées du Saint-Laurent et du Saguenay et pour le littoral de la Côte-Nord; des augmentations sur le sud du Québec; des tendances peu claires pour le reste de la province.

En climat futur,
la répartition de la pluie
verglaçante sur le territoire
demeurera très liée à la
topographie et aux fines
variations de température
en surface.

Événements de longue durée

La durée d'un événement de pluie verglaçante étant une bonne approximation de sa sévérité, les épisodes de longue durée peuvent être considérés comme des événements extrêmes – seuls 20 % des épisodes nord-américains, incluant ceux du Québec, produisent au moins 6 heures de précipitation verglaçante (McCray, Paquin et al., 2019).

Dans leurs travaux de recherche, Matte et al. (2019) et Bresson & Paquin, in prep., projettent une faible diminution du nombre d'événements de longue durée (de l'ordre d'un par année) pour la fin du siècle par rapport au climat récent dans les vallées du sud du Québec et sur le littoral de la Côte-Nord et du Nunavik.



5 Événements combinés impliquant la pluie verglaçante

La rareté même des événements de pluie verglaçante complexifie l'analyse de combinaison d'événements et à ce jour, très peu de recherches ont été produites sur ce sujet (Cannon et al., 2020; Jeong et al., 2018, 2019).



Jeong et al. (2018) ont analysé l'accumulation de glace sur les lignes de transmission, en fonction de la pluie verglaçante, du vent et de la température ambiante. Leurs travaux ont permis de déterminer, de façon préliminaire, des zones où des augmentations de glace et d'intensité de vent pour des événements ayant une période de retour de 50 ans se produiraient. Au Québec, les différentes simulations s'accordent sur la région de la vallée du Saguenay pour de telles augmentations combinées, et ne s'accordent pas pour les autres régions. Ces résultats sont néanmoins incertains.

Lors d'événements de verglas, le vent peut influencer l'épaisseur de la glace qui s'accumule sur les surfaces. Des études ont donc été réalisées pour les bâtiments et les infrastructures (Cannon et al., 2020; Jeong et al., 2019). Les épaisseurs de glace lors d'événements de verglas ont été considérées sur les surfaces horizontales, verticales et radiales, les deux dernières étant plus influencées par le vent. Ils ont montré de très faibles changements dans l'intensité des vents de surface sur l'ensemble du Québec (-2 % à +4 % du sud au nord) pour un niveau de réchauffement planétaire de 3°C par rapport à l'ère préindustrielle.

Lors d'événements de verglas, le vent peut influencer l'épaisseur de la glace qui s'accumule sur les surfaces.

6

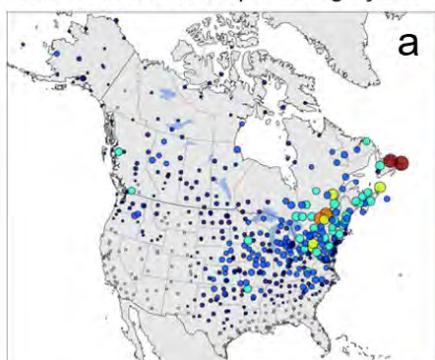
Ailleurs en Amérique du Nord

De façon générale en Amérique du Nord (Figure 6), la pluie verglaçante est surtout observée à l'est des montagnes Rocheuses.

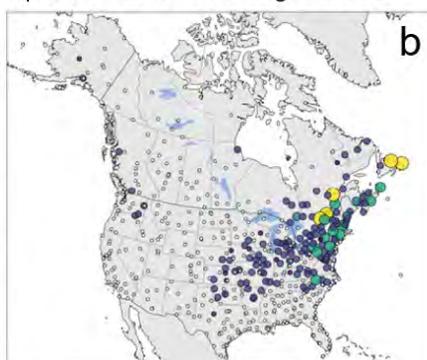
La zone où la pluie verglaçante est observée avec une durée annuelle médiane d'au moins 10 heures s'étend du Texas et de l'Oklahoma vers le nord-est jusqu'à Terre-Neuve (Figure 7a). Les stations qui observent au moins 20 heures par année de verglas se trouvent principalement dans le nord-est des États-Unis et l'est du Canada, plus spécifiquement dans le sud de l'Ontario et du Québec, au Nouveau-Brunswick, en Nouvelle-Écosse et à Terre-Neuve-et-Labrador. Les valeurs élevées dans les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais sont dépassées uniquement dans l'est de Terre-Neuve, où la médiane du total annuel des heures observées est de 50 à 60 heures.

Dans certaines régions, la pluie verglaçante se produit rarement, mais lorsqu'elle survient, elle a tendance à tomber pendant plusieurs heures. C'est le cas notamment dans le sud-est des États-Unis, où la pluie verglaçante est plus rare que dans les régions précédemment mentionnées, mais où une majorité des événements est de longue durée (Figure 6b-c). Dans le sud des Plaines américaines, autour de l'Oklahoma, un grand nombre d'épisodes de très longue durée (18 heures et plus) a été observé (Figure 6d). Certaines stations dans cette région ont observé davantage de ces événements particulièrement longs que dans la vallée du Saint-Laurent où le verglas arrive plus fréquemment.

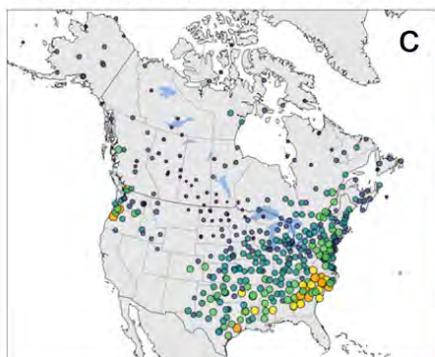
Heures annuelles de pluie verglaçante



Épisodes annuels de longue durée



Pourcentage d'épisodes de longue durée



Épisodes de ≥ 18 h

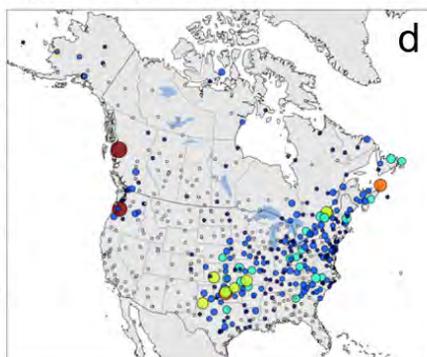


Figure 6. Observations de pluie verglaçante aux stations pour la période 1979-2016 sur l'Amérique du Nord. Médiane des heures annuelles de pluie verglaçante (a), médiane du nombre annuel d'épisodes d'au moins six heures de pluie verglaçante (b), pourcentage d'épisodes d'au moins six heures (c) et nombre d'épisodes d'une durée d'au moins 18 heures (d). Adapté de McCray et al. (2019). © American Meteorological Society. Utilisée avec permission.

Dans le futur, les conditions propices à la formation de la pluie verglaçante seront plus fréquentes à l'ouest et au nord du Canada, augmentant graduellement les risques de verglas avec des changements, dont l'amplitude et l'étendue des territoires touchés augmentent au fil du réchauffement planétaire (Figure 7). Au sud du continent, les conditions de formation de la pluie verglaçante seront moins fréquentes, entraînant une diminution du verglas. Cette tendance dans le futur au déplacement vers le nord de la zone où la pluie verglaçante sera observée le plus souvent a été identifiée

par plusieurs études (McCray, Paquin et al., 2022; Jeong et al., 2018, 2019; Lambert & Hansen, 2011). Ceci serait dû aux changements de températures à la surface et en altitude (McCray, Paquin et al., 2022; Jeong et al., 2019), car les températures à la surface inférieures à 0°C deviendront plus rares dans le futur, particulièrement dans le sud. Le Québec se situe à la frontière entre la diminution et l'augmentation projetées, respectivement au sud et au nord du continent nord-américain.

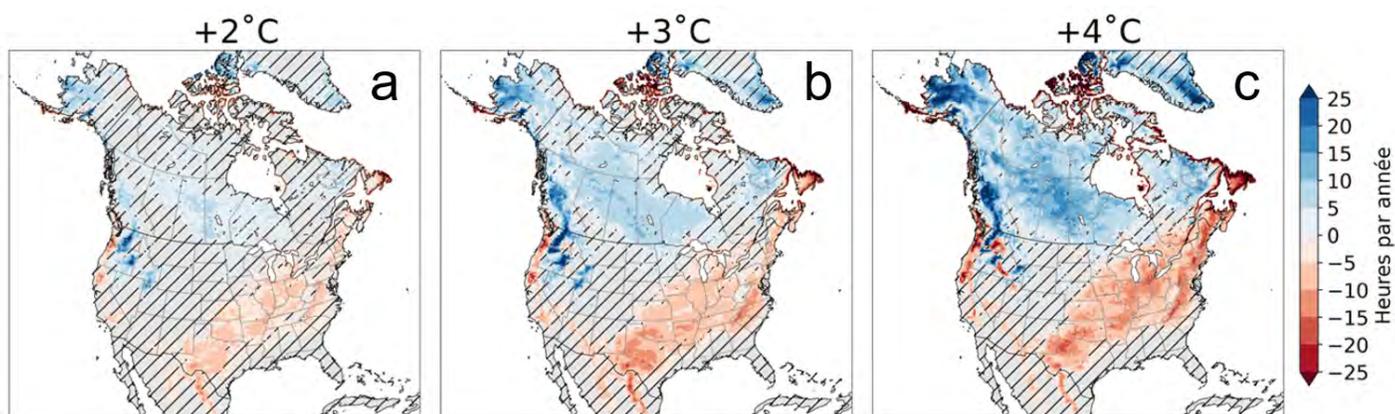


Figure 7. Moyenne des changements de la médiane des heures annuelles de pluie verglaçante projetés par un ensemble de quatre simulations du MRCC5 pour lesquelles quatre méthodes diagnostiques ont été utilisées afin de représenter la pluie verglaçante. Les changements sont présentés entre la période historique de 1980-2009 et les périodes pendant lesquelles les niveaux de réchauffement planétaire de 2°C (a), 3°C (b) et 4°C (c) sont atteints par rapport à la période préindustrielle (1850-1900). Dans les zones hachurées, moins de 80 % des combinaisons des simulations et méthodes diagnostiques s'entendent sur la direction du changement. Version modifiée de la figure 6 de McCray et al. (2022).

L'évolution des quantités considérées extrêmes de verglas est généralement semblable aux changements projetés des médianes annuelles. Par exemple, les projections des quantités de verglas avec une probabilité d'occurrence annuelle de 2 % (période de retour de 50 ans) présentent des diminutions dans le sud des États-Unis et des augmentations dans l'Ouest canadien selon les analyses de Jeong et al. (2019).

Les changements par fourchettes de 10° de latitude en Amérique du Nord ont aussi été examinés (Figure 8). Dans la zone de 30° à 40°N, autant les projections des

quantités annuelles de précipitations verglaçantes (Figure 8a) que celles des valeurs extrêmes (Figure 8b) devraient diminuer d'environ 50 % dans l'éventualité d'un réchauffement planétaire de 4°C. À l'opposé, les quantités annuelles projetées pour la zone entre 60 et 70°N augmenteraient de 100 % pour le même niveau de réchauffement planétaire, avec des augmentations d'environ 50 % pour les quantités extrêmes pour les événements rares de probabilité d'occurrence annuelle de 2 %.

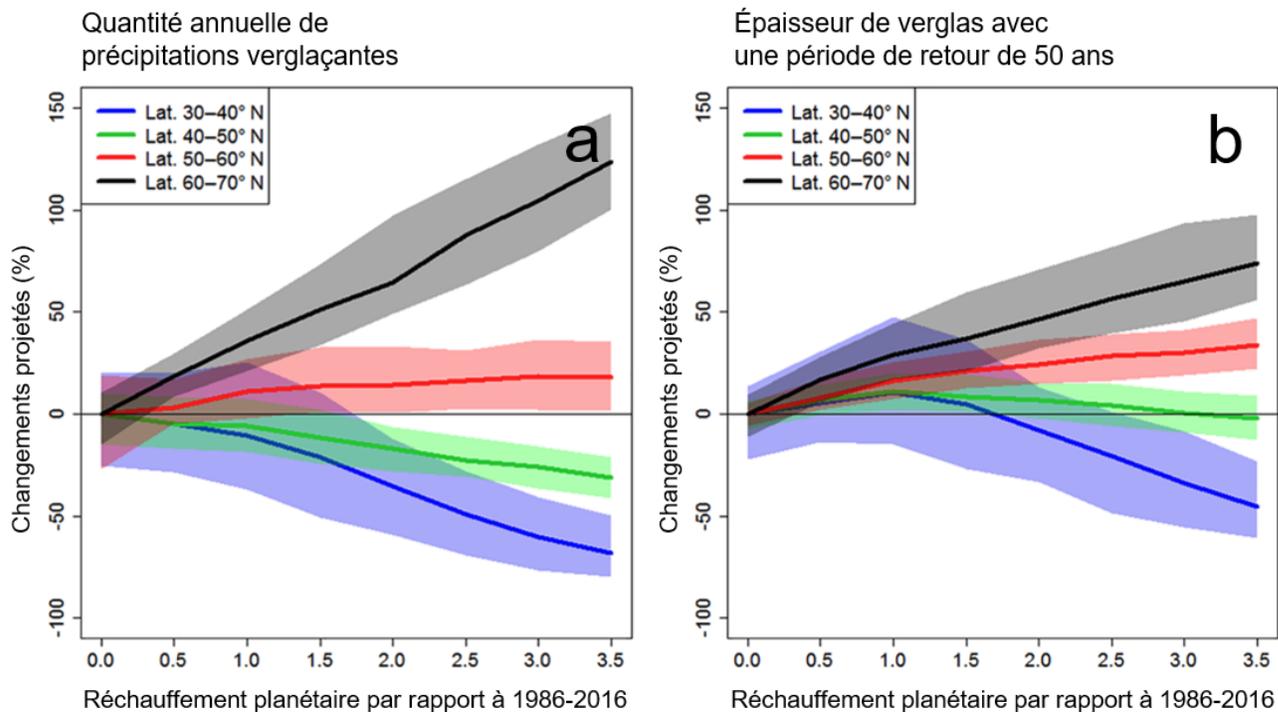


Figure 8. Changement moyen par bande de latitude de la quantité annuelle de précipitations verglaçantes (a) et dans l'épaisseur de verglas avec une période de retour de 50 ans (b) selon le niveau de réchauffement planétaire par rapport à la période 1866–2016. Les lignes pleines représentent les médianes, alors que la zone colorée présente la 5^e à 95^e centiles parmi les 50 simulations étudiées par Jeong et al. (2019). Afin d'identifier les changements par rapport à la période préindustrielle, il faut ajouter 1°C aux niveaux affichés en abscisse des deux graphiques. Tiré de Jeong et al. (2019).





Dans le futur,
les conditions propices
à la formation de la pluie
verglaçante seront plus
fréquentes à l'ouest
et au nord du Canada.

7 Perspectives de recherche

La quantification des tendances historiques observées du verglas est déficiente, notamment parce que les données observées sont insuffisantes pour une analyse de qualité. Une base de données contenant non seulement l'occurrence, mais aussi des quantités observées de pluie verglaçante permettrait de combler de nombreuses lacunes (incluant les analyses de la variabilité à diverses échelles).

Les extrêmes de pluie verglaçante ainsi que les événements combinés sont des avenues qu'il sera important d'étudier plus en détail dans les prochaines années. L'étude de ces extrêmes nécessitant un grand échantillon d'épisodes, l'utilisation de grands ensembles de modèles climatiques ou de nouvelles techniques afin de bonifier la taille de l'échantillon serait nécessaire.

L'évaluation de l'incertitude des méthodes diagnostiques de verglas, appliquées à des données de modèles régionaux autres que le Modèle régional canadien du climat, n'a pas encore été réalisée parce que les variables nécessaires ne sont généralement pas dans

la liste des archives suggérées par les protocoles internationaux de modélisation climatique. La prochaine génération de simulations suivant les nouveaux protocoles devrait permettre une telle analyse.

La résolution explicite de la convection dans des simulations de modèles régionaux à l'échelle de moins de quelques kilomètres (2 ou 3) ainsi que l'utilisation de modules de microphysique pour distinguer les types de précipitation, dont certains adaptés à des résolutions de 10 kilomètres, permettra aussi de mieux explorer le comportement de la pluie verglaçante.





Les extrêmes
de pluie verglaçante
ainsi que les événements
combinés sont des avenues
qu'il sera important d'étudier
plus en détail dans
les prochaines années.

8 Crédits

Auteur.e.s : Christopher McCray
et Dominique Paquin

Coordonnatrice de la publication :
Hélène Côté

Révisseurs : Émilie Bresson (scientifique),
Angelica Alberti-Dufort

Designer graphique : Isabelle Toussaint

Photos : iStock, Unsplash (Ashley Beal,
Rafa G. Bonilla, Jody Confer)

Année : Mars 2024



9 Références

- Ara Begum, R., R. Lempert, E. Ali, T.A. Benjaminsen, T. Bernauer, W. Cramer, X. Cui, K. Mach, G. Nagy, N.C. Stenseth, R. Sukumar, & P. Wester (2022). Point of Departure and Key Concepts. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 121–196, <https://doi.org/doi:10.1017/9781009325844.003>
- Bresson, É., Laprise, R., Paquin, D., Thériault, J. M., & de Elía, R. (2017). Evaluating the Ability of CRCM5 to Simulate Mixed Precipitation. *Atmosphere - Ocean*. <https://doi.org/10.1080/07055900.2017.1310084>
- Bresson, É., & Paquin, D. (n.d.). *Freezing rain events over eastern Canada: what to expect? in prep.*
- Brooks, C. F. (1920). The nature of sleet and how it is formed. *Mon. Wea. Rev.*, 48, 69–72. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1920\)48<69b:TNOSAH>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1920)48<69b:TNOSAH>2.0.CO;2)
- Cannon, A. J., Jeong, D. Il, Zhang, X., & Zwiers, F. W. (2020). *Climate-Resilient Buildings and Core Public Infrastructure An Assessment of the Impact of Climate Change on Climatic Design Data In Canada*.
- Carrera, M. L., Gyakum, J. R., & Lin, C. A. (2009). Observational study of wind channeling within the St. Lawrence River Valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2061.1>
- Chaîné, P. M., & Skeates, P. (1974). *Wind and Ice Loading Criteria Selection. Canadian Climate Centre Internal Report, Industrial Meteorology--Study III*. Environment Canada.
- Cortinas, J. (2000). A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3574–3588. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<3574:ACOFRI>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<3574:ACOFRI>2.0.CO;2)
- Cortinas, J. V, Bernstein, B. C., Robbins, C. C., & Strapp, J. W. (2004). An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976–90. *Weather and Forecasting*, 19, 377–390.
- GIEC. (2021). *Résumé à l'intention des décideurs. In: Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [publié sous la direction de Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou].*
- Gyakum, J. R., & Roebber, P. J. (2002). The 1998 Ice Storm—Analysis of a Planetary-Scale Event. *Monthly Weather Review*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2983:tisaoa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2983:tisaoa>2.0.co;2)
- Jeong, D. Il, Cannon, A. J., & Zhang, X. (2019). Projected changes to extreme freezing precipitation and design ice loads over North America based on a large ensemble of Canadian regional climate model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(4), 857–872.
- Jeong, D. Il, Sushama, L., Vieira, M. J. F., & Koenig, K. A. (2018). Projected changes to extreme ice loads for overhead transmission lines across Canada. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.017>
- Jones, K. F. (1998). A simple model for freezing rain ice loads. *Atmospheric Research*. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(97\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(97)00053-7)
- Lambert, S. J., & Hansen, B. K. (2011). Simulated changes in the freezing rain climatology of North America under global warming using a coupled climate model. *Atmosphere - Ocean*. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.607492>

- Matte, D., Thériault, J. M., & Laprise, R. (2019). Mixed precipitation occurrences over southern Québec, Canada, under warmer climate conditions using a regional climate model. *Climate Dynamics*, 53(1), 1125–1141. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4231-2>
- McCray, C. D., Atallah, E. H., & Gyakum, J. R. (2019). Long-Duration Freezing Rain Events over North America: Regional Climatology and Thermodynamic Evolution. *Weather and Forecasting*, 34(3), 665–681. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0154.1>
- McCray, C. D., J. M. Thériault, D. Paquin, and É. Bresson (2022). Quantifying the Impact of Precipitation-Type Algorithm Selection on the Representation of Freezing Rain in an Ensemble of Regional Climate Model Simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61, 1107–1122. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0202.1>
- McCray, C. D., Paquin, D., Thériault, J. M., & Bresson, É. (2022). A multi-algorithm analysis of projected changes to freezing rain over North America in an ensemble of regional climate model simulations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*.
- Meisinger, C. L. (1920). The precipitation of sleet and the formation of glaze in the eastern United States, January 20 to 25, 1920, with remarks on forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 48, 73–80. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1920\)48<73b:TPOSAT>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1920)48<73b:TPOSAT>2.0.CO;2)
- Milton, J., & Bourque, A. (1999). *A climatological account of the January 1998 ice storm in Quebec*. Environment Canada.
- Razy, A., Milrad, S. M., Atallah, E. H., & Gyakum, J. R. (2012). Synoptic-scale environments conducive to orographic impacts on cold-season surface wind regimes at Montreal, Quebec. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0142.1>
- Ressler, G. M., Milrad, S. M., Atallah, E. H., & Gyakum, J. R. (2012). Synoptic-Scale Analysis of Freezing Rain Events in Montreal, Quebec, Canada. *Weather and Forecasting*, 27(2), 362–378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00071.1>
- Roebber, P. J., & Gyakum, J. R. (2002). Orographic Influences on the Mesoscale Structure of the 1998 Ice Storm. *Monthly Weather Review*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0027:oiotms>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0027:oiotms>2.0.co;2)
- Sanders, K. J., & Barjenbruch, B. L. (2016). Analysis of Ice-to-Liquid Ratios during Freezing Rain and the Development of an Ice Accumulation Model. *Weather and Forecasting*, 31(4), 1041–1060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/WAF-D-15-0118.1>
- St-Pierre, M., Thériault, J. M., & Paquin, D. (2019). Influence of the Model Horizontal Resolution on Atmospheric Conditions Leading to Freezing Rain in Regional Climate Simulations. *Atmosphere-Ocean*, 57(2), 101–119. <https://doi.org/10.1080/07055900.2019.1583088>
- Stuart, R., & Isaac, G. (1999). Freezing precipitation in Canada. *Atmos.–Ocean*, 37, 87–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/07055900.1999.9649622>
- Villeneuve, O. G. (1974). *Glossaire de météorologie et de climatologie*. Presses Université Laval.
- Zerr, R. J. (1997). Freezing rain: An observational and theoretical study. *J. Appl. Meteor.*, 36, 1647–1661. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1647:FRAOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1647:FRAOAT>2.0.CO;2)



ouranos.ca


Ouranos