



# PINS - Portrait des indices de neige au sol

Émilie Bresson, Éric Dupuis, Pascal Bourgault

Ouranos

# Rapport final

Mai 2024

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

Émilie Bresson, Ouranos

Éric Dupuis, Ouranos

Pascal Bourgault, Ouranos

## RÉVISION SCIENTIFIQUE

Martin Leduc, Ouranos

Pierre Pellerin, Ouranos

## RÉVISION GÉNÉRALE

Clara Champalle, Ouranos

Financé par le gouvernement du Québec dans le cadre du Plan d'action pour un tourisme responsable et durable 2020-2025 du ministère du Tourisme.

**Titre du projet Ouranos:** PINS - Portrait des indices de neige au sol

**Numéro de projet Ouranos:** 709100

**Citation suggérée :** Bresson, É., Dupuis, É. et Bourgault, P. (2024). *PINS - Portrait des indices de neige au sol*. Rapport présenté à l'Association des Stations de ski du Québec et au gouvernement du Québec. Ouranos, Montréal, Canada. 34 pages + Annexes 9 pages.

---

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

# Résumé exécutif

Une entente entre l'Association des stations de ski du Québec (ASSQ) et Ouranos a amené au développement de l'étude [globale](#) "Le système ski québécois face aux changements climatiques" visant à aider l'industrie du ski alpin du Québec à s'adapter aux nombreux défis engendrés par les changements climatiques. Le projet "Portrait des indices de neige au sol" (PINS) s'inscrit dans cette étude globale et a pour objectif de produire des données et une cartographie des indicateurs du couvert de neige naturelle au sol dont les biais inhérents aux simulations climatiques ont été corrigés (ajustement de biais statistique), sur le Québec à une résolution de l'ordre d'une dizaine de kilomètres.

Pour répondre aux besoins de l'ASSQ, nous nous sommes concentrés sur l'équivalent en eau de la neige (ÉEN) simulé par des modèles régionaux de climat. L'équivalent en eau de la neige est la mesure de la quantité d'eau présente dans un manteau neigeux. Le produit sur grille d'ÉEN en période historique qui a servi de référence est ERA5-Land. Après avoir rassemblé toutes les données simulées disponibles, un ensemble de dix simulations (ensemble PINS) a été sélectionné en considérant les simulations avec les données les plus proches de la référence, et sous l'hypothèse qu'elles reproduisent de manière plus cohérente le cycle annuel du manteau neigeux. En effet, comme le couvert de neige naturelle au sol présente une saisonnalité forte et des valeurs nulles en-dehors de la saison, cela présente des défis pour l'ajustement de biais statistique: par exemple, une saison simulée trop courte par rapport à la référence entraîne un ajustement de biais sur des valeurs nulles. La sélection de l'ensemble PINS a permis de minimiser ce problème. Cet effet a également été mitigé en imposant une décroissance progressive du couvert neigeux pour les fins de saison trop abruptes dans l'ensemble PINS. Par la suite, la méthode d'ajustement de biais *quantile mapping* (multiplicative) a été appliquée sur l'ensemble PINS modifié. On notera aussi que l'ensemble PINS prend en compte les incertitudes inhérentes aux modèles climatiques et aux scénarios de concentrations de gaz à effet de serre (RCP). Nous avons ainsi pu obtenir un portrait de huit indicateurs de neige naturelle au sol pour le Québec.

Les principaux résultats sur le domaine Québec-ski sont :

- Une diminution générale du couvert de neige naturelle projetée pour l'ensemble du domaine Québec-ski; des maximums annuels d'ÉEN plus faibles; la période de couvert continu raccourcissant, en lien avec un début plus tardif et une fin plus hâtive.
- Dans le sud et la vallée du Saint-Laurent, une diminution du couvert de neige naturelle s'accroît plus la période s'approche de la fin du siècle, et aussi, plus importante avec les simulations avec le RCP 8.5 (scénario d'émissions élevées) que le RCP 4.5 (scénario d'émissions modérées).
- Dans le reste du domaine, une diminution du couvert de neige naturelle moins marquée, avec des régions moins affectées vers le nord du domaine et sur certains reliefs dont les massifs de Charlevoix, des Monts-Valin et des Chic-Chocs.
- Le patron des jours avec une forte augmentation du couvert de neige naturelle en 24 heures changeant peu quel que soit le RCP ou l'horizon temporel considéré.

Pour les quatre Groupes climatiques, les messages-clés sont présentés ci-dessous pour la période historique 1991-2020. Les valeurs pour l'horizon 2041-2070 sont également indiquées dans les messages-clés et sont écrits entre crochets.

**Groupe 1    Sud-Ouest :**

**Centre-du-Québec,  
Chaudière-Appalaches,**

Les régions comprises dans ce Groupe possèdent un faible couvert de neige naturelle au sol : les maximums annuels d'ÉEN sont de l'ordre de 145 [120] mm, la saison de couvert continu de neige naturelle au sol dure environ 140 [115] jours, commençant à la fin novembre [premier tiers de décembre] et finissant à la mi-avril [première semaine d'avril]. Le nombre de jours sans couvert est de l'ordre de 225 [245], le nombre de jours

<b>Estrie, Montérégie, Montréal Laval</b>	de couvert autour du congé de Noël de l'ordre de 15 [13.5] et du congé de la relâche de 29.5 [27.5] (1991-2020 [2041-2070]).
<b>Groupe 2 Nord-Ouest :</b> <b>Capitale-Nationale, Outaouais, Lanaudière, Laurentides, Mauricie, Abitibi- Témiscamingue</b>	Les régions comprises dans ce Groupe ont un couvert de neige naturelle au sol plus important en termes de durée et maximum annuel que celui du Groupe 1 Sud-Ouest. Les maximums annuels sont de l'ordre de 235 [200] mm, le couvert continu commence à la mi-novembre [fin novembre] et achève au début de mai [fin avril], environ 190 [210] jours n'ont pas de couvert de neige naturelle au sol, toute la période des congés de Noël et de la relâche ont un couvert de neige naturelle au sol (1991-2020 [2041-2070]).
<b>Groupe 3 Nord-Est :</b> <b>Jamésie-Sud Est, Saguenay – Lac- Saint-Jean, Côte- Nord</b>	Les régions comprises dans ce Groupe ont le couvert de neige au sol le plus long de tout le domaine Québec-ski. Le couvert continu de neige naturelle au sol dure environ 210 [190] jours, de la fin octobre [premier tiers de novembre] à la fin mai [mi-mai], 150 [175] jours ne présentent pas de couvert de neige naturelle au sol, les périodes autour des congés de Noël ont un couvert de neige naturelle, le maximum annuel d'ÉEN est de l'ordre de 290 [275] mm (1991-2020 [2041-2070]).
<b>Groupe 4 Sud-Est :</b> <b>Bas-Saint-Laurent, Gaspésie</b>	Les régions comprises dans le Groupe 4 Sud-Est ont le maximum annuel d'ÉEN le plus important du domaine Québec-ski, de l'ordre de 310 [265] mm. Pour les autres indicateurs, les régions de ce Groupe se situent entre celles du Groupe 2 Nord-Ouest et celles du Groupe 3 Nord-Est : le couvert continu de neige naturelle au sol est de l'ordre de 185 [170] jours, commençant à la mi-novembre [deux-tiers de novembre] et finissant à la mi-mai [premier tiers de mai], 180 [200] jours sont sans couvert de neige naturelle au sol, les périodes autour du congé de Noël et de la relâche ont un couvert de neige naturelle au sol (1991-2020 [2041-2070]).

Toutes les simulations régionales de climat disponibles au moment du projet ont été considérées. L'ensemble PINS est le résultat d'une sélection des simulations. Cette sélection est basée sur la capacité à reproduire le cycle annuel du manteau neigeux et, bien que restreint, il prend en compte les incertitudes dues aux modèles climatiques. Ainsi, l'ensemble PINS forme un ensemble de simulations de qualité pour la projection de l'équivalent en eau de la neige naturelle au sol. De nouvelles simulations régionales climatiques pourraient venir étoffer l'ensemble PINS et offrir une meilleure représentation des incertitudes dues aux modèles climatiques. Pour mener à bien ce projet, un produit de référence a dû être sélectionné. Bien que ERA5-Land soit, à notre connaissance, le meilleur produit de référence disponible pour l'équivalent en eau de la neige au moment du projet, il comporte des biais. Il sera donc important pour les prochains projets dans cette thématique d'évaluer le potentiel des nouveaux produits de référence sur grille.





# Table des matières

RÉSUMÉ EXÉCUTIF .....	II
GLOSSAIRE .....	IX
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>II. OBJECTIFS</b> .....	<b>4</b>
<b>III. MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>4</b>
1. PRODUCTION DES PORTRAITS D'ÉEN .....	4
1.1. <i>Évaluation de la base de données sur grille de référence</i> .....	4
1.2. <i>Développement des indicateurs climatiques</i> .....	6
1.3. <i>Ensemble de simulations climatiques</i> .....	7
1.4. <i>Sélection de la méthode d'ajustement de biais</i> .....	8
2. RÉGIONS D'INTÉRÊT DE L'ASSQ .....	8
<b>IV. RÉSULTATS</b> .....	<b>10</b>
3. COUVERT DE NEIGE NATURELLE AU SOL .....	10
4. NOMBRE DE JOURS AVEC COUVERT DE NEIGE NATURELLE AU SOL POUR UNE PÉRIODE SPÉCIFIQUE .....	15
5. MAXIMUM D'ÉEN .....	17
6. FORTES ACCUMULATIONS EN UNE JOURNÉE .....	18
<b>V. CONCLUSIONS</b> .....	<b>19</b>
<b>VI. RÉFÉRENCES</b> .....	<b>23</b>
<b>VII. ANNEXES</b> .....	<b>25</b>
A. ÉVALUATION DE LA BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE .....	25
B. PRODUCTION D'UN ENSEMBLE DE SCÉNARIOS D'ÉEN AJUSTÉS STATISTIQUEMENT .....	25
B.1. <i>Sélection des simulations</i> .....	26
B.2. <i>Méthode de décroissance progressive</i> .....	27
B.3. <i>Méthode d'ajustement statistique de biais</i> .....	30
C. MOYENNES SPATIALES DES INDICATEURS SUR LES QUATRE GROUPES CLIMATIQUES .....	30

# Liste des figures

Figure 1 – Schéma de la méthodologie appliquée au projet PINS.....	5
Figure 2 – Domaine Québec-ski. Répartition des Groupes climatiques visés par l'étude globale. ....	9
Figure 3 – Conditions simulées de la durée (jours) du couvert continu de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.....	11
Figure 4 – Conditions simulées de la date du début du couvert continu de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.....	12
Figure 5 – Conditions simulées de la date de fin du couvert continu de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.....	13
Figure 6 – Conditions simulées du nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.....	14
Figure 7 – Conditions simulées du nombre annuel de jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de Noël (entre le 19 décembre et le 3 janvier inclusivement), pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves. ....	15
Figure 8 – Conditions simulées du nombre annuel de jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de la relâche (entre le 19 février et le 20 mars inclusivement), pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves. ....	16

Figure 9 – Conditions simulées du maximum annuel de l'ÉEN (mm), pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.....	17
Figure 10 – Conditions simulées du nombre annuel de jours avec une augmentation en une journée de 10 mm et plus du couvert de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.....	18
Figure 11 – Maximum annuel d'ÉEN pour la région de l'Outaouais. Stations météorologiques : Observations aux stations de la base de données CanSWE (points colorés), médiane des observations (ligne et points bleus), enveloppe des valeurs (gris). ERA5-Land : médiane sur la région (ligne et points noirs), barres couvrant les 10e et 90e centiles (noir). .....	25
Figure 12 – a) Proportion de points de grille entrant dans l'intervalle de sélection pour le début de la saison avec un couvert de neige continu. b) Même graphique pour la fin de saison. ....	27
Figure 13 – Exemple d'une série temporelle journalière d'ÉEN (mm) pendant la période de fonte. Les données originales sont en turquoise, la sélection sur laquelle la méthode de décroissance progressive est appliquée par la suite est dans la zone en gris, le seuil de 1mm est en bleu foncé. .	27
Figure 14 – Zoom sur la période sélectionnée de la série temporelle journalière d'EEN. Les données originales sont en turquoise; les données de la période sélectionnée sont en gris et sont mises à zéro lorsqu'elles sont inférieures au seuil de 0.001 mm (orange). .....	28
Figure 15 – Zoom de la Figure 14.....	28
Figure 16 – Les données originales sont en turquoise; les données de la période sélectionnées en gris; les données sur lesquelles la décroissance progressive a été appliquée sont en bourgogne; le seuil de 0.001 mm en orange. ....	29
Figure 17 – Les données originales sont en turquoise; les données finales en vert; le seuil de 0.001 mm en orange. ....	29

# Liste des tableaux

Tableau 1 – Liste non exhaustive de bases de données quotidiennes d'équivalent en eau de la neige sur grille disponibles au courant du projet et avec une couverture, au minimum, sur le Canada. ....	5
Tableau 2 – Liste des indicateurs de neige au sol développés dans le projet. ....	6
Tableau 3 – Liste des caractéristiques des simulations sélectionnées pour ce projet. ....	8
Tableau 4 – Répartition des régions administratives du Québec visées par l'étude globale par Groupe climatique. ....	9
Tableau 5 – Liste des simulations produites par des MRC pour lesquelles la variable ÉEN a été archivée. Les simulations en gras sont les simulations sélectionnées pour ce projet.....	26
Tableau 6 – Moyennes spatiales pour les quatre Groupes climatiques pour la durée du couvert continu de neige naturelle au sol (jours).....	31
Tableau 7 – Comme Tableau 6 pour la date de début du couvert continu de neige naturelle au sol (jours juliens). ....	31
Tableau 8 – Tableau 6 pour la date de fin du couvert continu de neige naturelle au sol (jours juliens).....	31
Tableau 9 – Comme Tableau 6 pour le nombre annuel de jours sans couvert de neige naturelle au sol (jours). ....	32
Tableau 10 – Comme Tableau 6 pour le nombre annuel de jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de Noël (jours). Le maximum de jours possible est de 16 jours. ....	32
Tableau 11 – Comme Tableau 6 pour le nombre de jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de la relâche (jours). Le maximum de jours possible est de 30 jours.....	32
Tableau 12 – Comme Tableau 6 pour le maximum annuel d'ÉEN (mm). ....	33
Tableau 13 – Comme Tableau 6 pour le nombre annuel de jours avec une augmentation en une journée de 10 mm et plus du couvert de neige naturelle au sol (jours). ....	33

# Glossaire

ASSQ	Association des stations de ski du Québec
ÉEN	Équivalent en eau de la neige
MGC	Modèle global de climat
MRC	Modèle régional de climat
MRCC5	Modèle régional canadien de climat, version 5
PINS	Portrait des indices de neige au sol
RCP	Representative Concentration Pathway



# I. Introduction

L'analyse des besoins des usagers et partenaires d'Ouranos a mis de l'avant l'intérêt de longue date et toujours grandissant pour des scénarios de changements climatiques d'indicateurs du couvert de neige naturelle au sol à une résolution élevée (de l'ordre d'une dizaine de kilomètres). Au moment de la rédaction de ce rapport, et au meilleur de nos connaissances, aucune information n'est publiquement disponible quant à des projections climatiques du couvert de neige naturelle incluant un ajustement statistique des biais. Les seules projections climatiques en lien avec la neige disponibles publiquement au Québec sont les précipitations solides ([donneesclimatiques.ca](http://donneesclimatiques.ca), [ouranos.ca/portaits-climatiques/](http://ouranos.ca/portaits-climatiques/)). Une entente entre l'Association des stations de ski du Québec (ASSQ) et Ouranos a amené à développer ce projet pour combler ce manque. **L'objectif principal est de produire des données et une cartographie des indicateurs du couvert de neige naturelle au sol sur le Québec à une résolution de l'ordre d'une dizaine de kilomètres avec un ajustement statistique des biais.** Ces informations serviront à l'étude [globale de l'ASSQ](#) afin d'aider l'industrie du ski du Québec à s'adapter aux nombreux défis engendrés par les changements climatiques.

Les précipitations solides sont un indicateur calculé à partir des précipitations totales et sont comptabilisées pour des températures négatives. Se baser uniquement sur les précipitations solides avec un ajustement de biais statistique donne de l'information sur les chutes de neige et non pas sur l'évolution du manteau neigeux naturel. Les modèles de neige qui eux, tiennent compte de manière réaliste d'un grand nombre de processus physiques à la surface et au sein du manteau neigeux (sublimation, maturation, densification, métamorphose...) permettent de suivre l'évolution spatiale et temporelle des caractéristiques associées, telles que l'épaisseur du manteau neigeux ou l'équivalent en eau de la neige (ÉEN). Ces modèles de neige peuvent être utilisés soit de manière couplée à l'intérieur des modèles de climat, lorsqu'ils ont été implémentés dans le modèle de climat, soit de manière externalisée, c'est-à-dire a posteriori en utilisant comme intrants les informations climatiques produites par les modèles de climat. Les deux méthodologies comportent des avantages et des inconvénients. La première approche permet une pleine interaction du cycle thermodynamique et hydrique entre le sol, la végétation, la neige et l'atmosphère, tandis que la deuxième méthode fait évoluer le manteau neigeux en forçant de manière unidirectionnelle le modèle de neige à partir de variables atmosphériques précalculées par un modèle ou à partir d'observations des conditions atmosphériques. Le projet « Analyse économique des mesures d'adaptation aux changements climatiques appliquée au secteur du ski alpin au Québec » (Da Silva et al., 2019), réalisé chez Ouranos a utilisé un modèle de neige CROCUS (version CROCUS-ski) de manière externalisée. Ce modèle de neige a été utilisé pour trois stations de ski au Québec pour analyser en détail l'évolution du couvert neigeux. Ce modèle a aussi été utilisé pour fournir des indicateurs climatiques pour l'industrie du ski en Europe dans un projet de grande envergure (Morin et al., 2021). L'utilisation d'un modèle de neige externalisé permet de prendre en compte toutes les spécificités hydro-climatiques à l'échelle d'une station et destination ski, en ayant par exemple, une meilleure représentation de la topographie et du couvert végétal. Ce type de modèle a permis de faire des avancées substantielles pour travailler avec des modèles d'impacts économiques et il est adapté aux processus de planification et de gestion des stations de ski et destinations ski à travers le monde. Néanmoins, l'utilisation d'un modèle de neige externe au modèle de climat, malgré la qualité des données générées et sa grande efficacité pour les stations de ski, présente des défauts. Par exemple, les interactions de la température et des précipitations avec le sol et le couvert neigeux sont modélisées mais l'inverse n'est pas vrai : l'effet du couvert de neige sur l'atmosphère n'est pas modélisé. À l'échelle de la station, ceci peut être négligeable mais moins à une échelle plus importante. Par exemple, avec des modèles externalisés, le refroidissement des basses couches de l'atmosphère dû à la présence d'un couvert neigeux n'est pas pris en compte. Il est donc important

de prendre en compte ces interactions et rétroactions afin de reproduire au mieux les processus physiques. De plus, l'utilisation d'un modèle externalisé, en plus de limiter la représentation des processus physiques, va entraîner plus de complexité dans l'opérationnalisation des services climatiques qui visent à fournir des informations climatiques aux usagers de la manière la plus efficace et scientifiquement rigoureuse possible. Les modèles de climat possèdent déjà des schémas de surface permettant de simuler la neige au sol. Des modèles régionaux de climat (MRC) disponibles pour l'Amérique du Nord grâce au projet NA-CORDEX (The North America [Coordinated Regional Downscaling Experiment Program](#)) ont été évalués par rapport à différentes bases de données d'observations (Bresson & Biner, 2021; McCrary et al., 2022). Il a été montré que ces modèles produisent des simulations historiques dans l'enveloppe des observations relevées aux stations météorologiques. Ces modèles bénéficient d'une résolution spatiale fine, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, qui permet une bonne représentation des processus physiques atmosphériques hivernaux tout en représentant de manière réaliste les diverses caractéristiques de la topographie québécoise. Ainsi, en utilisant la neige au sol produite par les simulations climatiques, il sera possible de produire un portrait des changements projetés pour des indicateurs de la neige au sol, autorisant des mises à jour à partir de nouvelles simulations climatiques, ou de nouvelles méthodes d'ajustement de biais, et ce sans un intermédiaire (modèle de neige externe). Pour prendre en compte les incertitudes dues aux biais des modèles de climat, aux scénarios d'émission de gaz à effet de serre et aérosols et à la variabilité naturelle du climat, les simulations produites par plusieurs modèles de climat, utilisant différents scénarios d'émission, sont considérées dans ce projet.

Afin d'atteindre l'objectif général de ce projet, il est nécessaire d'appliquer une méthode d'ajustement de biais statistique sur les caractéristiques du couvert de neige produites par les simulations climatiques. En particulier, le but est de réduire les biais inhérents aux simulations climatiques. Pour cela, plusieurs éléments sont nécessaires : définir la variable du couvert neigeux sur laquelle travailler, trouver une base de données de référence pour ajuster le biais et sélectionner une méthode d'ajustement de biais statistique.

Le couvert de neige naturelle est une variable qui est mesurée d'après différentes caractéristiques (épaisseur de neige, ÉEN, couvert neigeux...) et simulée dans les modèles de climat avec différents schémas. L'ÉEN est la variable fréquemment considérée dans les études, puisqu'elle ne dépend pas de la densité de la neige, cette dernière pouvant varier selon la nature de la neige (Mekis & Vincent, 2011). L'ÉEN renseigne sur les quantités d'eau disponibles dans le manteau neigeux, jouant un rôle dans le cycle hydrologique de la région (inondations, sécheresses, disponibilité en eau pour l'hydro-électricité...). Au-delà de la complexité de la variable en tant que telle, l'accès à des données de qualité et en quantité suffisante sur l'ensemble du territoire peut être complexe. La mesure des caractéristiques (épaisseur, densité, ÉEN) du manteau neigeux n'est pas simple et peut présenter des disparités spatiales et temporelles qui complexifient les comparaisons avec les résultats de modélisation (Bresson & Biner, 2021; McCrary et al., 2022; Vionnet et al., 2021). L'utilisation de l'ÉEN, permet de s'affranchir de certaines de ces incertitudes. Une base de données d'ÉEN a été mise à jour récemment par Environnement et Changement climatique Canada (Vionnet et al., 2023). Au Québec, cette base de données comprend les données des lignes de neige et des stations automatiques d'Hydro-Québec, mais pas celles du gouvernement du Québec (MELCC). De plus, les observations d'ÉEN relevées manuellement peuvent apporter un biais sur les dates de début et de fin du couvert neigeux continu, dû à des relevés non réalisés sur une base quotidienne, et des observations d'épaisseur de neige (Environnement et Changement climatique Canada par exemple) peuvent permettre de compléter l'information sur ces indicateurs. Il existe des produits sur grille d'ÉEN pour pallier cette répartition spatiale non homogène des données observées. Ils peuvent être basés sur des produits satellitaires (MERRA-2 ou IMS24, par exemple), sur des multiensembles de bases de données (Blended-5, par exemple), des réanalyses (ERA-Interim, ERA5, par exemple) ou des produits issus de modèles de neige avec une assimilation de données (ERA5-Land, par exemple). Néanmoins, ces produits sur grille présentent des différences dans les portraits climatiques de la neige au sol dans certaines régions en particulier dues à l'influence des méthodes utilisées pour compléter les données dans les régions pauvres en observations (Bresson & Biner, 2021; Mortimer et al., 2020; Mudryk et al., 2024). L'utilisation d'une base de données sur grille est néanmoins nécessaire pour ajuster le biais des simulations climatiques afin d'avoir un portrait de la neige au

sol le plus cohérent et rigoureux possible. Il est donc nécessaire de sélectionner la base de données sur grille qui répond le mieux aux besoins de l'étude. La résolution fait partie des critères de sélection de bases de données sur grille à considérer (résolution fine dans ce projet, de l'ordre de 1° de résolution horizontale, par exemple). L'évaluation d'indicateurs calculés à partir des bases de données sur grille par rapport à ceux à partir des observations aux stations météorologiques permettra de sélectionner la base de données de référence. Les indicateurs de neige au sol examinés sont, par exemple, la durée de la saison de couvert neigeux et le maximum d'ÉEN.

L'ÉEN est une variable avec une saisonnalité et elle est fortement influencée par la température et par les précipitations (Sospedra-Alfonso & Merryfield, 2017 par exemple). Des biais dans les modèles peuvent avoir des effets sur la présence ou non de neige au sol et par conséquent sur le nombre de jours avec un couvert neigeux et les dates de début et de fin du couvert neigeux continu. Pour calculer des indicateurs de neige au sol projetés, un ajustement de biais adapté est donc indispensable. Néanmoins, peu de littérature réfère à l'utilisation d'une méthode d'ajustement de biais univarié ou multivarié de l'ÉEN. Par exemple, McCrary et al. (2022) s'intéressent aux changements par rapport à la période de référence; Morin et al. (2021) et Scott et al. (2020) utilisent un ajustement de biais univarié sur les variables entrant dans un modèle de neige externalisé. Zahmatkesh et al. (2019) ont travaillé avec la méthode des fonctions de répartition pour corriger le biais du produit SNODAS (U.S. National Weather Service's Snow Data Assimilation System), mais il s'agit là d'un ajustement spatial et non temporel puisque ce sont des données historiques. Évaluer différentes méthodes d'ajustement de biais est donc nécessaire pour faire ressortir la plus adaptée à cette étude. Dans leurs travaux, Matiu & Hanzer (2022) ont évalué plusieurs méthodes d'ajustement de biais sur la fraction de couvert neigeux. Cette variable présente des similarités avec l'ÉEN et cette étude présente des méthodes d'intérêt à investiguer pour l'ÉEN. Il est important de noter que les méthodes multivariées sont encore peu utilisées et que de nombreux défis existent encore. Ce projet se place comme une première étape dans l'évaluation des méthodes d'ajustement de biais pour la neige au sol et la production d'un portrait du couvert de neige naturelle avec un ajustement de biais.

Ce rapport commence par expliciter les objectifs du projet ainsi que les choix qui ont été faits quant aux données et méthodes considérées pour ce projet (Section Méthodologie), puis présente et discute les résultats (Section Résultats), et enfin, fournit plus de détails techniques en Annexes.

#### **AVIS IMPORTANT**

Les travaux présentés dans ce rapport s'intéressent uniquement à la neige naturelle recouvrant le sol. La neige fabriquée par des canons à neige par exemple n'est pas considérée ici.

Pour alléger la lecture, les termes *couvert de neige naturelle au sol*, *couvert de neige naturelle*, *couvert de neige au sol* et *couvert de neige* sont considérés comme équivalents et utilisés indifféremment dans le rapport.

## II. Objectifs

L'objectif principal de ce projet est de **produire un portrait climatique des indicateurs historiques et futurs de la neige naturelle au sol avec un ajustement de biais statistique sur l'ensemble du Québec** pour répondre au besoin de l'ASSQ, et d'autres usagers potentiels (compagnies d'hydro-électricité, municipalités, compagnies minières, autres acteurs du tourisme hivernal...). Pour ce faire, plusieurs sous-objectifs sont définis :

- Développer des indicateurs de neige au sol dédiés à l'adaptation du secteur du ski alpin au Québec face aux changements climatiques et pouvant être utiles aux usagers d'autres secteurs d'activité, et rendre public le code informatique au sein de la librairie informatique [xclim](#) disponible sur la plateforme PAVICS;
- Mettre en place une méthodologie pour ajuster statistiquement le biais de ces indicateurs (sélection des simulations climatiques, du produit de référence, et de la méthode d'ajustement de biais);
- Ajuster statistiquement le biais des simulations de l'ensemble de simulations climatiques disponibles;
- Calculer les indicateurs historiques et futurs de la neige naturelle au sol avec un ajustement de biais statistique sur le Québec.

## III. Méthodologie

Pour produire des indicateurs de neige au sol simulée avec un ajustement de biais statistique, plusieurs étapes sont nécessaires (Figure 1). Ces étapes sont décrites dans les sous-sections suivantes.

### 1. PRODUCTION DES PORTRAITS D'ÉEN

#### 1.1. Évaluation de la base de données sur grille de référence

Comme précisé précédemment, la principale variable d'intérêt pour les indicateurs climatiques de ce projet est l'ÉEN, qui sera utilisée à une fréquence quotidienne. Des bases de données d'ÉEN sur grille sont disponibles (Tableau 1) et elles présentent des disparités spatiales, des périodes de disponibilité différentes, des résolutions plus ou moins grossières (Mudryk et al., 2015, 2024). Les critères de sélection de la base de données de référence ont aussi tenu compte des produits utilisés à Ouranos au début du projet.

Au moment du début de l'étude, ERA5-Land était le produit qui répondait le mieux aux critères suivants :

- Des données récentes (disponibilité des données pour l'année précédant l'année en cours);
- Une couverture spatiale pancanadienne (en vue d'un éventuel élargissement de la zone d'intérêt dans le futur);
- Une meilleure représentation de la neige au sol que dans ERA5 dans la région d'intérêt (Muñoz-Sabater et al., 2021);
- Une résolution élevée (prise en compte de la topographie, qui a un rôle important pour les stations de ski);
- Une utilisation éprouvée à Ouranos (produit de référence pour les scénarios climatiques disponible sur le site des [Portraits climatiques d'Ouranos](#) au début du projet).

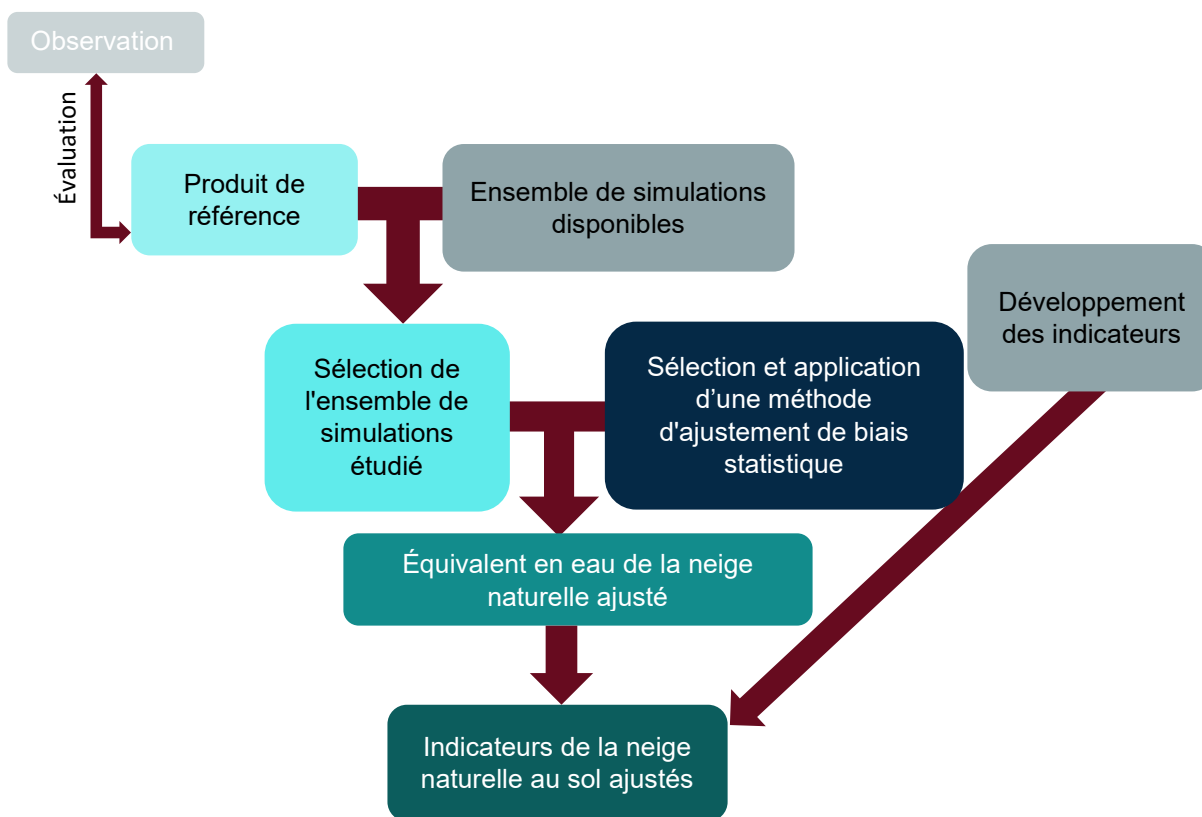


Figure 1 – Schéma de la méthodologie appliquée au projet PINS.

La base de données ERA5-Land a été évaluée avec les données observées disponibles dans la base de données CanSWE (Vionnet et al., 2023; Annexe A). Un article soumis à la fin du projet a par ailleurs appuyé ce choix. En effet dans leur étude Mudryk et al. (2024) montraient que ERA5-Land était le meilleur produit d'ÉEN sur grille disponible, à travers un échantillon de 24 jeux de données.

En cours de projet, le produit de référence utilisé pour les Portraits climatiques d'Ouranos a été changé pour RDRS v2.1. Il n'a pas été envisagé de changer de produit de référence dans le présent projet en raison de l'absence de l'ÉEN dans cette version du produit RDRS.

Tableau 1 – Liste non exhaustive de bases de données quotidiennes d'équivalent en eau de la neige sur grille disponibles au courant du projet et avec une couverture, au minimum, sur le Canada.

Nom	Résolution	Période	Référence
<b>Blended-5</b>	1°	1981 – 2010	Mudryk et al. (2015)
<b>MERRA-2</b>	0.5° lat – 0.6° lon	1980 – 2014	Molod et al. (2015)
<b>ERA5</b>	31 km	1940 –	Hersbach et al. (2020)
<b>ERA5-Land</b>	0.1° (~ 9 km)	1950 –	Muñoz-Sabater et al. (2021)

## 1.2. Développement des indicateurs climatiques

À partir des indicateurs existants dans la librairie `xclim` (Bourgault et al., 2023), des besoins des usagers et de la littérature (Morin et al., 2021, par exemple), plusieurs indicateurs climatiques ont été développés et ajoutés à cette même librairie. Ces indicateurs prennent en compte la variable ÉEN, appelée `snw` dans les données. La liste des indicateurs codés pendant le projet est présentée dans le Tableau 2. Les indicateurs de neige au sol ont été calculés annuellement. Les jours de tempête et ceux sans couverts neigeux sont produits aussi mensuellement et saisonnièrement, mais non présentés ici.

Tableau 2 – Liste des indicateurs de neige au sol développés dans le projet.

Nom	Description	Fonction <code>xclim</code>
<b>Durée du couvert continu de neige naturelle au sol</b>	Nombre de jours entre le premier jour avec un ÉEN supérieur à 4 mm pendant 14 jours consécutifs et le premier jour avec un ÉEN inférieur à 4 mm pendant 14 jours consécutifs (jours)	<code>snw_season_length</code>
<b>Date de début du couvert continu de la neige naturelle au sol</b>	Premier jour à partir duquel l'ÉEN est supérieur à 4 mm durant 14 jours consécutifs (jour julien)	<code>snw_season_start</code>
<b>Date de fin du couvert continu de la neige naturelle au sol</b>	Dernier jour à partir duquel l'ÉEN est supérieur à 4 mm durant 14 jours consécutifs (jour julien)	<code>snw_season_end</code>
<b>Jours sans couvert de neige naturelle au sol</b>	Nombre de jours avec un ÉEN inférieur à 4 mm (jours)	<code>count_occurrences</code>
<b>Maximum annuel de l'équivalent en eau du couvert de neige naturelle au sol</b>	Maximum annuel d'ÉEN (mm)	<code>snw_max</code>
<b>Jours avec une augmentation en une journée de 10 mm ou plus du couvert de neige naturelle au sol</b>	Nombre de jours avec une augmentation journalière de l'ÉEN supérieure à 10 mm (jours)	<code>snw_storm_days</code>
<b>Jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de Noël</b>	Nombre de jours avec un ÉEN supérieur à 4 mm entre le 19 décembre et le 3 janvier inclusivement (jours)	<code>count_occurrences</code>
<b>Jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de la relâche</b>	Nombre de jours avec un ÉEN supérieur à 4 mm entre le 19 février et le 20 mars inclusivement (jours)	<code>count_occurrences</code>



L'unité « jour julien » est une date représentée par le nombre de jours qui se sont écoulés depuis le 1er janvier de l'année concernée.

L'indicateur *“Durée du couvert continu de neige naturelle au sol”* correspond au nombre de jours total entre la date de début et de fin du couvert continu de la neige naturelle au sol. Comme la fin de la période est définie par une série de 14 jours consécutifs sans couvert de neige naturelle au sol, certains jours de cette période peuvent être sans couvert de neige naturelle au sol, pourvu que ces absences de couvert de neige naturelle au sol n'excèdent pas 14 jours consécutifs.

L'indicateur *“Date de début du couvert continu de neige naturelle au sol”* correspond au premier jour de la première période avec 14 jours consécutifs de neige naturelle au sol. Il se peut donc qu'il y ait des jours avec un couvert de neige naturelle au sol avant cette date. Et inversement pour l'indicateur *“Date de fin du couvert continu de neige naturelle au sol”*.

### 1.3. Ensemble de simulations climatiques

Dans un premier temps, il s'agissait de réunir toutes les simulations produites par des MRC couvrant le Québec pour lesquelles la variable ÉÉN avait été archivée (Tableau 5, dans l'Annexe B). Pour ce faire, nous avons inspecté un ensemble de simulations incluant les données des MRC du projet international de NA-CORDEX et du MRCC5 produit par Ouranos, toutes pilotées par des modèles globaux de CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5; Taylor et al., 2012). On notera que dans leurs travaux, McCrary et al. (2022) ont retiré de leur ensemble les simulations produites avec le MRC RegCM4 qui simule des quantités aberrantes d'ÉÉN (supérieures à 5 m). Ces valeurs problématiques sont situées dans la partie ouest de l'Amérique du Nord. Le domaine Québec-ski n'étant pas affecté par celles-ci, nous avons décidé de conserver ces simulations dans notre ensemble initial.

Ensuite, une sélection a été faite sur l'ensemble de simulations disponibles. La neige au sol est une variable avec une saisonnalité marquée et des valeurs nulles en dehors de la saison de neige pour la majorité de la province. En fonction des biais inhérents au modèle de climat et au modèle de surface utilisé, mais aussi de la résolution choisie, des biais importants peuvent apparaître dans le couvert de neige simulé. En particulier, la saison peut être plus courte qu'elle ne devrait avec des fins de saison hâtives. Or, les méthodes d'ajustement de biais ne peuvent pas corriger une absence de neige, car ceci demande de créer de l'information de toutes pièces, et ainsi de sortir de la cohérence physique qui est apportée par l'utilisation d'un modèle de climat. Pour toutes ces raisons, une sélection des simulations climatiques a été faite en fonction de leur habileté à reproduire la saisonnalité (début et fin du couvert neigeux) en comparant les simulations au produit de référence. Les simulations devaient répondre aux critères suivants (voir Figure 12 en Annexe B) :

- Date de début de couvert neigeux continu dans un intervalle de +/- 10 jours par rapport à la référence pour au moins 80 % des points de grille sur la zone de validation;
- Date de fin de couvert neigeux continu dans un intervalle de +/- 15 jours par rapport à la référence pour au moins 80 % des points de grille sur la zone de validation.
- La zone de validation correspond au Québec méridional (sous le 50<sup>e</sup> parallèle) où se trouve la majorité des stations de ski du Québec, mais aussi avec un plus grand nombre d'observations disponibles, permettant une meilleure cohérence entre les bases de données. Le choix d'un intervalle plus grand pour la fin de la saison que pour le début se justifie par une plus grande difficulté des MRC ayant produit l'ensemble initial à reproduire convenablement la fin de la saison.

Après cette sélection, l'ensemble de simulations a été réduit à dix simulations comprenant deux RCP, trois MRC et quatre pilotes. Cette sélection est nommée ensemble PINS par la suite. Les détails de ces simulations sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Liste des caractéristiques des simulations sélectionnées pour ce projet.

MRC (Centre)	Pilote (Membre)	Résolution	RCP
CRCM5 (UQAM)	MPI-ESM-LR (r1i1p1)	0,44°	4.5
CRCM5 (Ouranos)	CNRM-CM5 (r1i1p1)	0,22°	4.5
CRCM5 (Ouranos)	GFDL-ESM2M (r1i1p1)	0,22°	4.5
CRCM5 (Ouranos)	MPI-ESM-LR (r1i1p1)	0,22°	4.5
RegCM4 (ISU)	HadGEM2-ES (r1i1p1)	0,22°	8.5
RegCM4 (ISU)	MPI-ESM-LR (r1i1p1)	0,22°	8.5
WRF (NCAR)	GFDL-ESM2M (r1i1p1)	0,22°	8.5
CRCM5 (Ouranos)	CNRM-CM5 (r1i1p1)	0,22°	8.5
CRCM5 (Ouranos)	GFDL-ESM2M (r1i1p1)	0,22°	8.5
CRCM5 (Ouranos)	MPI-ESM-LR (r1i1p1)	0,22°	8.5

## 1.4. Sélection de la méthode d’ajustement de biais

La sélection d’une méthode d’ajustement de biais a été complexe étant donné que l’ÉEN est une variable ayant une forte saisonnalité et avec des valeurs minimales nulles. La problématique principale vient du fait qu’une grande partie des simulations présentent une fin de saison hâtive par rapport à la base de données de référence. Il s’agit alors de ramener des valeurs nulles, simulées, vers des valeurs non nulles, observées. Ce genre de problème a été pallié en deux étapes. Tout d’abord, par une sélection basée sur l’exclusion des simulations les plus éloignées de la référence (voir sous-section précédente). Ensuite, une décroissance progressive (Aschauer et al., 2023) a été appliquée sur la fin de la saison. Cette procédure vient freiner la fonte de la neige en ajoutant de petites quantités d’ÉEN selon une décroissance exponentielle. Cette méthode n’est pas appliquée sur le début de la saison étant donné que les MRC reproduisent mieux le début de saison que la fin (McCrary et al., 2022). Nous avons donc appliqué la méthode de décroissance progressive sur toutes les simulations sélectionnées, pour finalement utiliser un *quantile mapping* (Michel et al., 2023). Les détails sont présentés dans l’Annexe B.

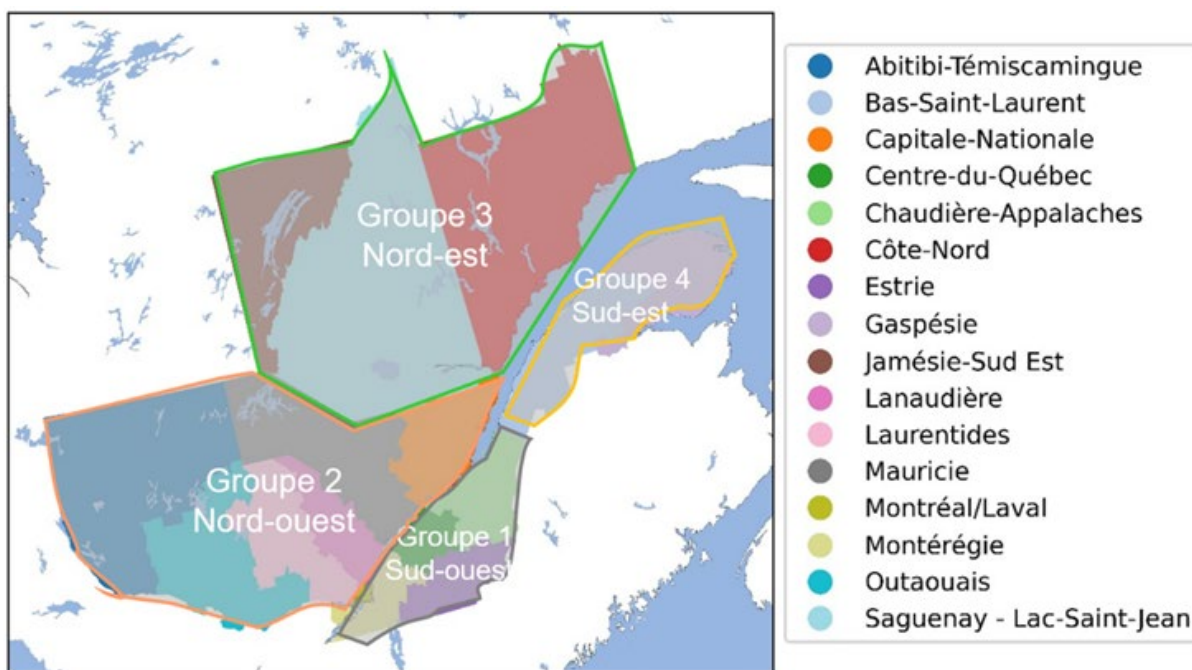
## 2. RÉGIONS D’INTÉRÊT DE L’ASSQ

Les stations de ski membres de l’ASSQ sont présentes dans 16 régions administratives du Québec (Tableau 4). Dans l’étude globale, il a été décidé de ne considérer qu’une partie des régions administratives Côte-Nord et Nord-du-Québec, puisqu’elles ont de grandes étendues et comprennent peu de stations de ski (respectivement, deux et une stations). Ceci permet d’éviter de diluer les résultats des moyennes régionales sur des domaines très vastes. Ces découpages ont été renommés, respectivement, Côte-Nord et Jamésie-Sud Est. Les 16 régions d’intérêt forment le domaine Québec-ski, sur lequel les portraits des huit indicateurs de neige naturelle au sol sont présentés.

Ces 16 régions ont aussi été réparties en 4 grands Groupes climatiques (Tableau 4, Figure 2) pour lesquels des messages clés sont décrits. Ces 4 grands Groupes résultent de l'analyse de la climatologie en climat récent et futur des quatre aléas prioritaires du sous-projet "Diagnostic de la vulnérabilité du système ski québécois aux changements climatiques".

Tableau 4 – Répartition des régions administratives du Québec visées par l'étude globale par Groupe climatique.

1	Abitibi-Témiscamingue	4	Centre-du-Québec	Groupe 1 Sud-Ouest
2	Bas-Saint-Laurent	5	Chaudière-Appalaches	
3	Capitale-Nationale	7	Estrie	
4	Centre-du-Québec	13	Montérégie	
5	Chaudière-Appalaches	14	Montréal Laval	
6	Côte-Nord	3	Capitale-Nationale	Groupe 2 Nord-Ouest
7	Estrie	15	Outaouais	
8	Gaspésie	10	Lanaudière	
9	Jamésie-Sud Est	11	Laurentides	
10	Lanaudière	12	Mauricie	Groupe 3 Nord-Est
11	Laurentides	1	Abitibi-Témiscamingue	
12	Mauricie	9	Jamésie-Sud Est	
13	Montérégie	16	Saguenay - Lac-Saint-Jean	Groupe 4 Sud-Est
14	Montréal Laval	6	Côte-Nord	
15	Outaouais	2	Bas-Saint-Laurent	Groupe 4 Sud-Est
16	Saguenay - Lac-Saint-Jean	8	Gaspésie	



# IV. Résultats

La structure des figures est la même pour l'ensemble de cette sous-section :

- Chaque figure présente une moyenne sur 30 ans sur le domaine Québec-ski;
- Chaque colonne correspond à un horizon temporel (1991-2020, 2021-2050, 2041-2070);
- La colonne de gauche contient uniquement la moyenne d'ensemble des simulations;
- Pour chaque RCP, les figures présentent la moyenne, le maximum et le minimum de l'ensemble pour chaque point de grille. Les résultats pour l'ensemble de simulations avec le RCP 4.5 (RCP 8.5) sont présentés dans la moitié supérieure (inférieure);
- Les points rouges sont les stations de l'ASSQ participant au projet; les points mauves sont les autres stations de ski membres de l'ASSQ.

Les résultats sont présentés avec les minimum, moyenne et maximum, car l'ensemble est restreint et l'utilisation de centiles ne serait pas statistiquement correcte.

Les résultats moyennés pour chaque Groupe d'intérêt sont présentés en Annexe C.

## 3. COUVERT DE NEIGE NATURELLE AU SOL

Les Figure 3, Figure 4 et Figure 5 présentent respectivement la durée, le début, et la fin du couvert continu de neige naturelle. La Figure 6 représente le nombre annuel de jours sans couvert de neige naturelle.

Sur le domaine Québec-ski, en 1991-2020, la durée du couvert continu de neige naturelle au sol est d'environ 169.8 jours (Figure 3). La durée du couvert continu est plus courte dans le sud (110 jours) que dans le nord (230 jours) du domaine. Les principaux massifs (Charlevoix, Chic-Chocs, Monts-Valin) ressortent du portrait avec des durées plus longues, de l'ordre de 200 jours en moyenne, que pour les plaines proches des rives. Sur l'ensemble du domaine, la durée du couvert diminue en moyenne de 16.4 [20.1] jours pour l'horizon 2041-2070 pour l'ensemble RCP 4.5 [RCP 8.5]. Les diminutions sont de l'ordre de 20 jours dans les régions montagneuses. Pour la période 1991-2020, les portraits des dates de début et de fin du couvert continu de neige naturelle au sol sont assez similaires, avec des débuts [fins] de saison plus tardifs [hâtives] dans le sud (début décembre [début avril]) que dans le nord du domaine et sur les massifs nommés précédemment (fin octobre [début juin]) (Figure 4 et Figure 5). Ce portrait se maintient dans les projections, avec un retard du début et un avancement de la fin du couvert continu de neige naturelle au sol en moyenne sur le domaine Québec-ski, de l'ordre de 10 jours en 2041-2070 (début de saison : +8.1 [+9.5] jours, RCP 4.5 [RCP 8.5]; fin de saison : -8.6 [-10.2] jours, RCP 4.5 [RCP 8.5]). Pour la majorité des régions, la fin de saison est un peu plus hâtive que le début de la saison n'est tardif. Ces différences sont de l'ordre de 4 jours au maximum, quels que soient l'horizon et le RCP considérés. Les autres régions, comme le Bas-Saint-Laurent et de la Côte-Nord, ont un retard du début de la saison un peu plus marqué que le devancement de la fin de saison, de l'ordre de 1 à 2 jours.

Le nombre de jours sans couvert de neige naturelle a un portrait similaire à celui de la durée du couvert continu de neige naturelle au sol, avec un nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol plus grand dans le sud que dans le nord (Figure 6). En 1991-2020, en moyenne sur le domaine Québec-ski, 193.0 jours sont sans couvert de neige naturelle au sol. En 2041-2070, cette valeur augmente de +16.7 [+20.3] jours avec le RCP 4.5 [RCP 8.5]. Au sud [nord] du domaine, le nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol peut être de l'ordre de 250 [150] jours. Il augmente dans les mêmes ordres de grandeur que la diminution de la durée du

couvert continu de neige naturelle au sol. Ceci laisse à penser que la saison du couvert continu de neige naturelle au sol n'aura pas beaucoup plus de jours sans couvert que dans la période historique, et donc que la saison continue ne sera pas beaucoup plus morcelée que dans le passé.

### Durée du couvert continu de neige naturelle au sol annuel

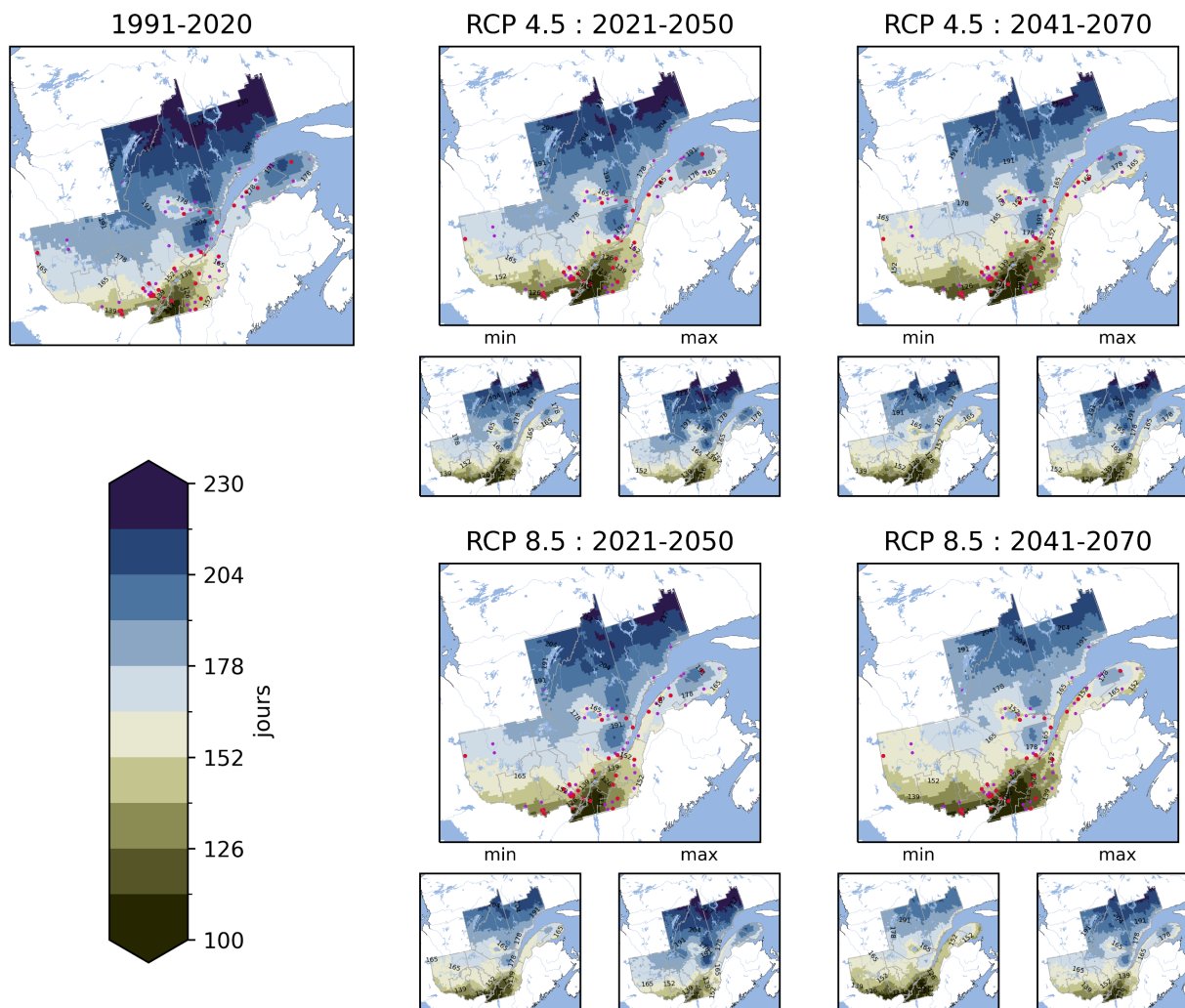


Figure 3 – Conditions simulées de la durée (jours) du couvert continu de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

Le Groupe 1 Sud-Ouest, qui comprend les régions au sud du domaine, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, possède le couvert continu de neige naturelle au sol le plus tardif avec la fin la plus hâtive (donc la saison la plus courte), ainsi que le plus de jours sans couvert de neige naturelle au sol. Pour la période 1991-2020, le couvert continu dure en moyenne 138.3 jours, débute en moyenne fin novembre et finit à la mi-avril, et cette région présente en moyenne 224.8 jours sans couvert de neige naturelle au sol. La saison du couvert continu



commence 9.0 [9.7] jours plus tard et termine 10.3 [11.5] jours plus tôt et le nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol augmente de 18.4 [22.1] jours en 2041-2070 (RCP 4.5 [RCP 8.5]) (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8, Annexe C).

### Date du début du couvert continu de neige naturelle au sol annuel

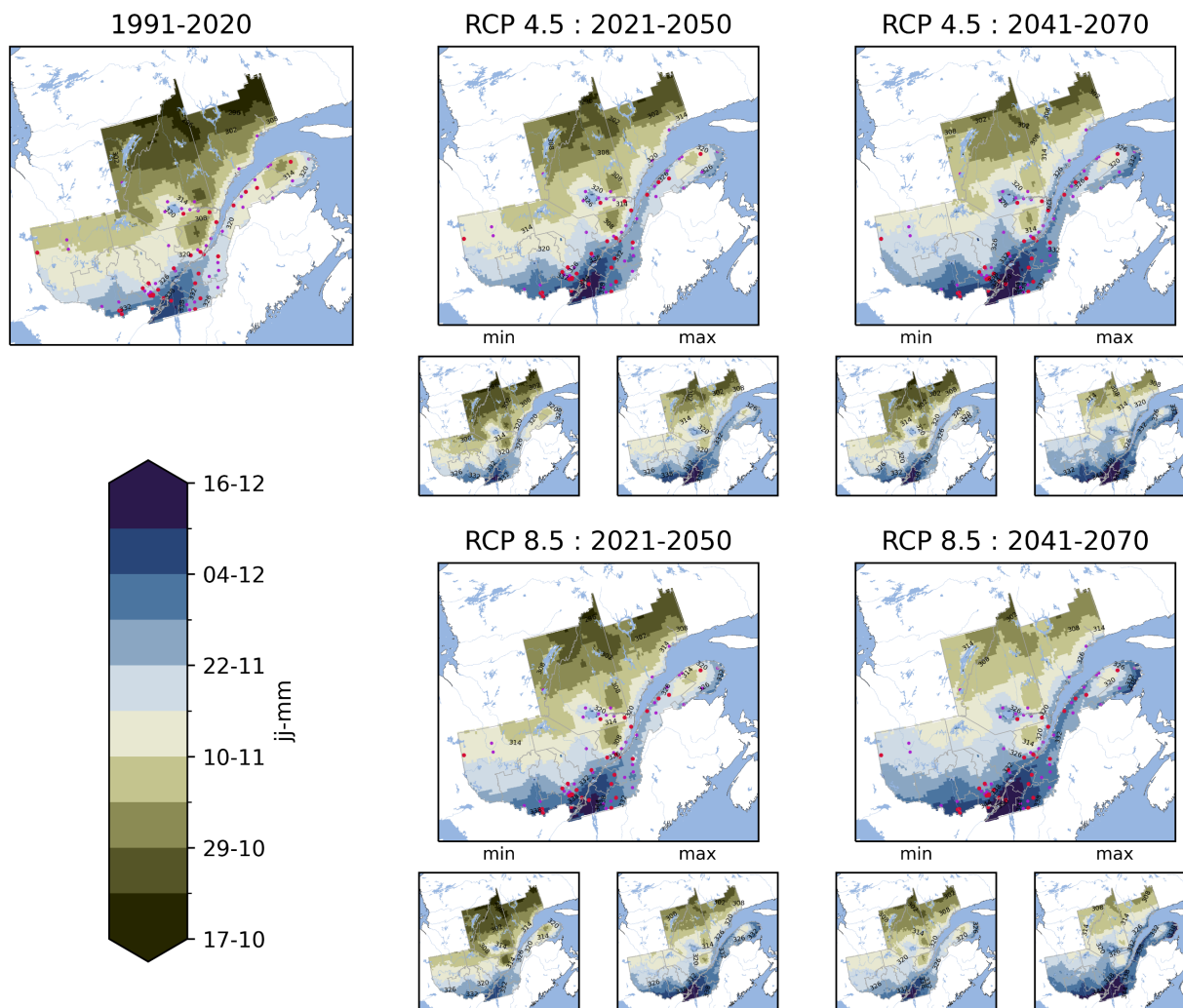


Figure 4 – Conditions simulées de la date du début du couvert continu de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

Le couvert continu de neige naturelle au sol du Groupe 2 Nord-Ouest commence mi-novembre, achève début mai et dure 172.7 jours en moyenne, en 1991-2020. En 2021-2050, le couvert continu commence environ 4 jours plus tard, pour se finir 4.9 à 6.2 jours plus tôt. En 2041-2070, il commence 7.1 à 8.6 jours plus tard et termine 8.7 à 10.1 jours plus tôt par rapport à la période 1991-2020. Le Groupe 2 a 190.2 jours sans couvert de neige



naturelle au sol, qui tend à augmenter à 200.9 [199.0] jours en 2021-2050 et 206.2 [209.2] jours en 2041-2070 pour le RCP 4.5 [RCP 8.5] (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8, Annexe C).

### Date de la fin du couvert continu de neige naturelle au sol annuel

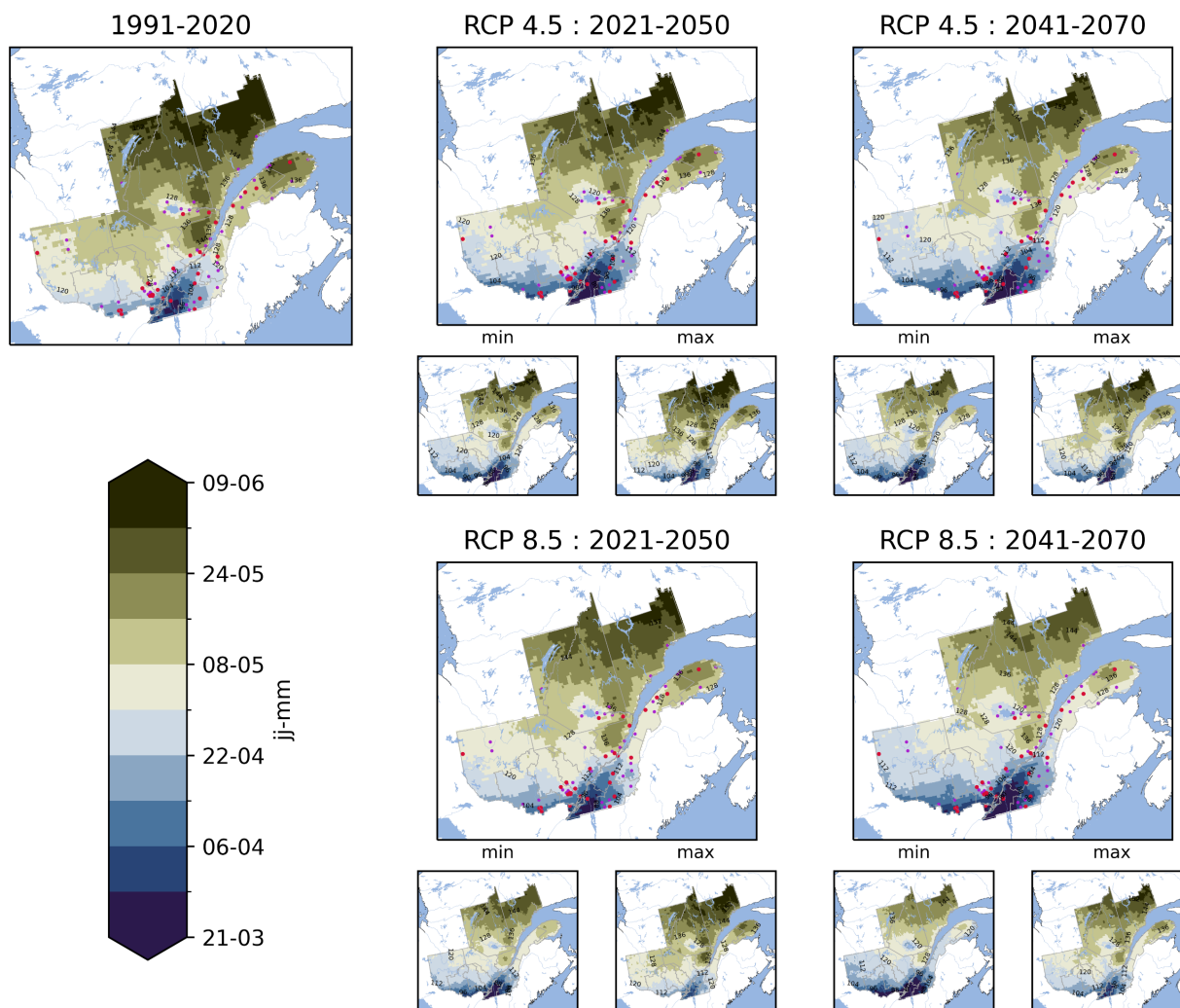


Figure 5 – Conditions simulées de la date de fin du couvert continu de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

Le Groupe 3 Nord-Est a la durée de couvert continu de neige naturelle au sol la plus longue de tous les Groupes climatiques avec 207.0 jours en moyenne en 1991-2020, 199.0 [198.2] jours en 2021-2050 et 193.0 [188.2] jours en 2041-2070 (RCP 4.5 [RCP 8.5]). La saison commence fin octobre en 1991-2020, puis au premier tiers de novembre en 2041-2070. La fin de la saison, initialement fin mai, se décale progressivement vers mi-mai en 2041-2070. Le nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol passe de 155.5 jours en 1991-

2020, à 164.3 [164.2] jours en 2021-2050 et 170.5 [174.6] jours en 2041-2070 (RCP 4.5 [RCP 8.5]) (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8, Annexe C).

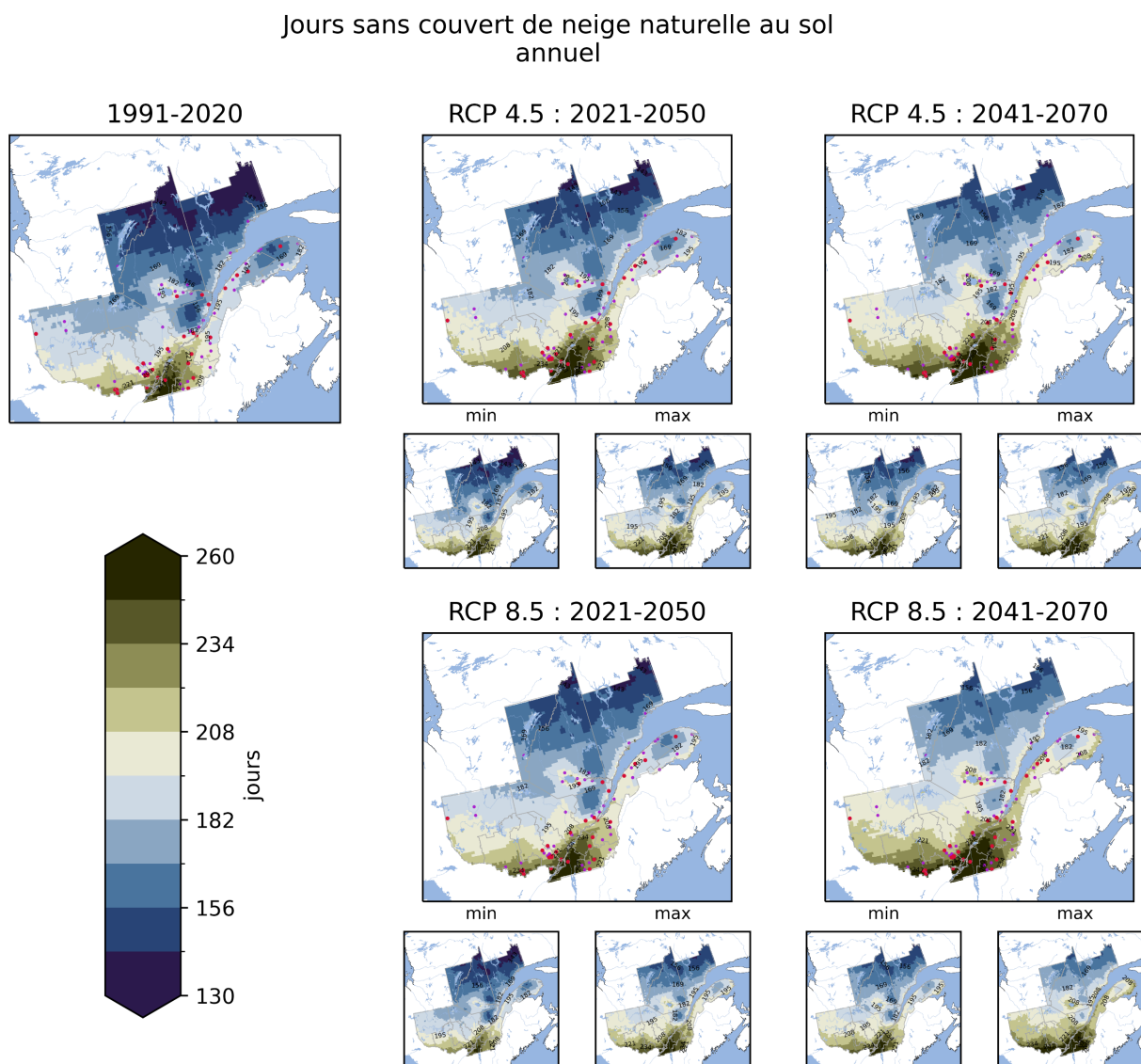


Figure 6 – Conditions simulées du nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

Finalement, le Groupe 4 Sud-Est voit sa durée de couvert continu de neige naturelle au sol diminuer de 184.2 jours en 1991-2020 à 174.4 [173.4] jours en 2021-2050, à 167.6 [162.7] jours en 2041-2070 (RCP 4.5 [RCP 8.5]). Le début de la saison retarde progressivement de mi-novembre en 1991-2020, au deux tiers de novembre en 2041-2071. De même, la fin de la saison initialement mi-mai est devancée progressivement jusqu'au premier tiers de mai en 2041-2070. Les jours sans couvert de neige naturelle quant à eux augmentent

de 178.3 jours à 195.3 [200.1] jours en 2041-2070 avec le RCP 4.5 [RCP 8.5] (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8, Annexe C).

## 4. NOMBRE DE JOURS AVEC COUVERT DE NEIGE NATURELLE AU SOL POUR UNE PÉRIODE SPÉCIFIQUE

Jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de Noël annuel

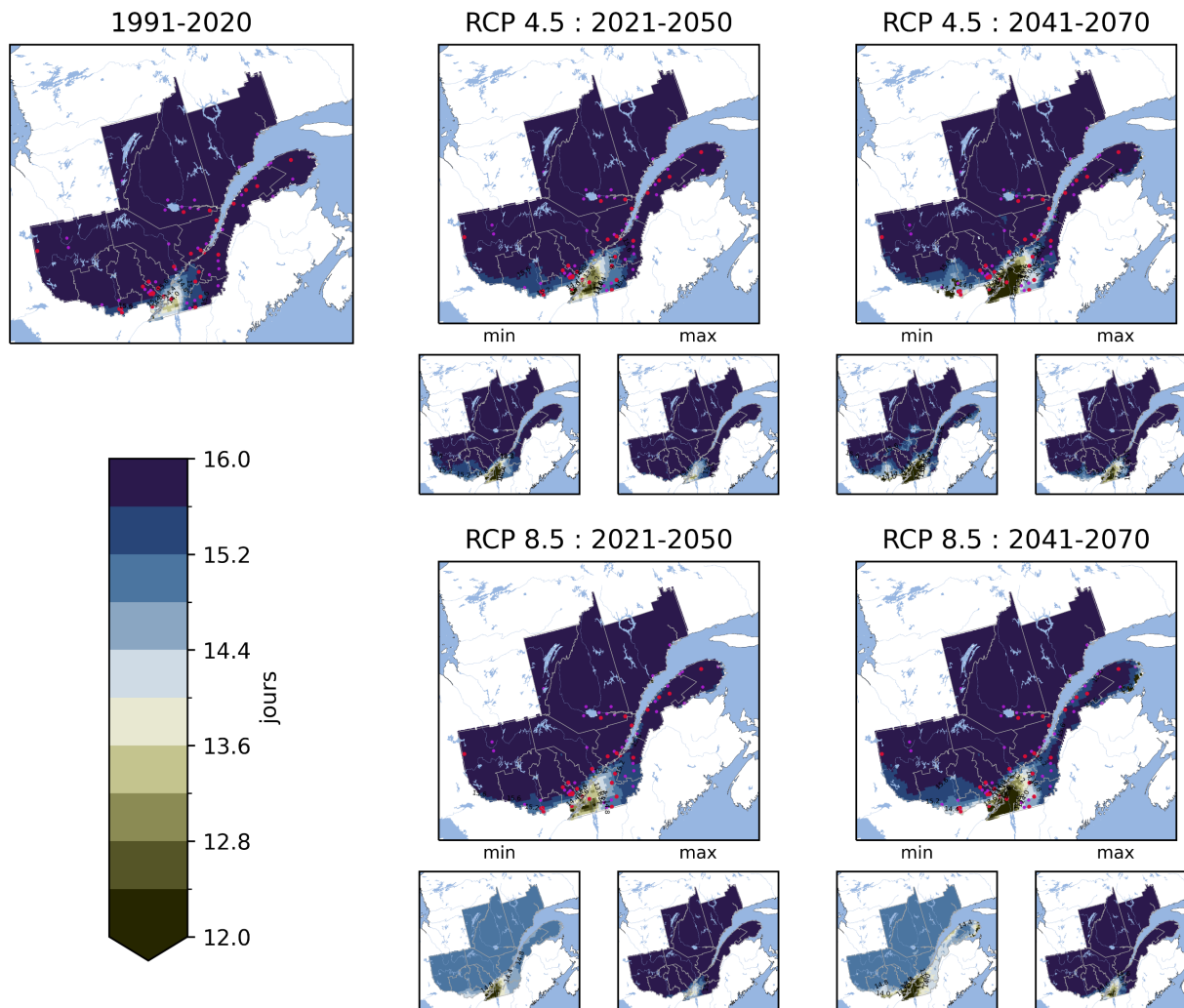


Figure 7 – Conditions simulées du nombre annuel de jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de Noël (entre le 19 décembre et le 3 janvier inclusivement), pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

Pour le Groupe 1 Sud-Ouest, les moyennes sont de 15.0 jours en 1991-2020, jusqu'à 13.5 [13.6] jours en 2041-2070 avec le RCP 4.5 [RCP 8.5] autour du congé de Noël. Les trois autres Groupes climatiques ont des

moyennes de 15.8 ou 15.9 jours en 1991-2020, soit la quasi-totalité de la période considérée, et des diminutions ne dépassent pas 0.3 jour, quels que soient le RCP et l'horizon futur (Tableau 9, Annexe C).

Pour le nombre de jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de la relâche aussi, seul le Groupe 1 Sud-Ouest connaît une diminution dans le futur et quel que soit le RCP considéré. En 1991-2020, la moyenne pour le Groupe 1 est de 29.3 jours, et diminue jusqu'à 27.8 [27.1] jours en 2041-2070 avec le RCP 4.5 [RCP 8.5]. Les trois autres Groupes ont des valeurs de l'ordre de 30.0 jours en moyenne, quels que soient l'horizon et le RCP, soit la totalité de la période considérée. Les maximums et minimums dans ces Groupes sont compris entre 29.7 et 30.0 jours (Tableau 10, Annexe C).

### Jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de la relâche annuel

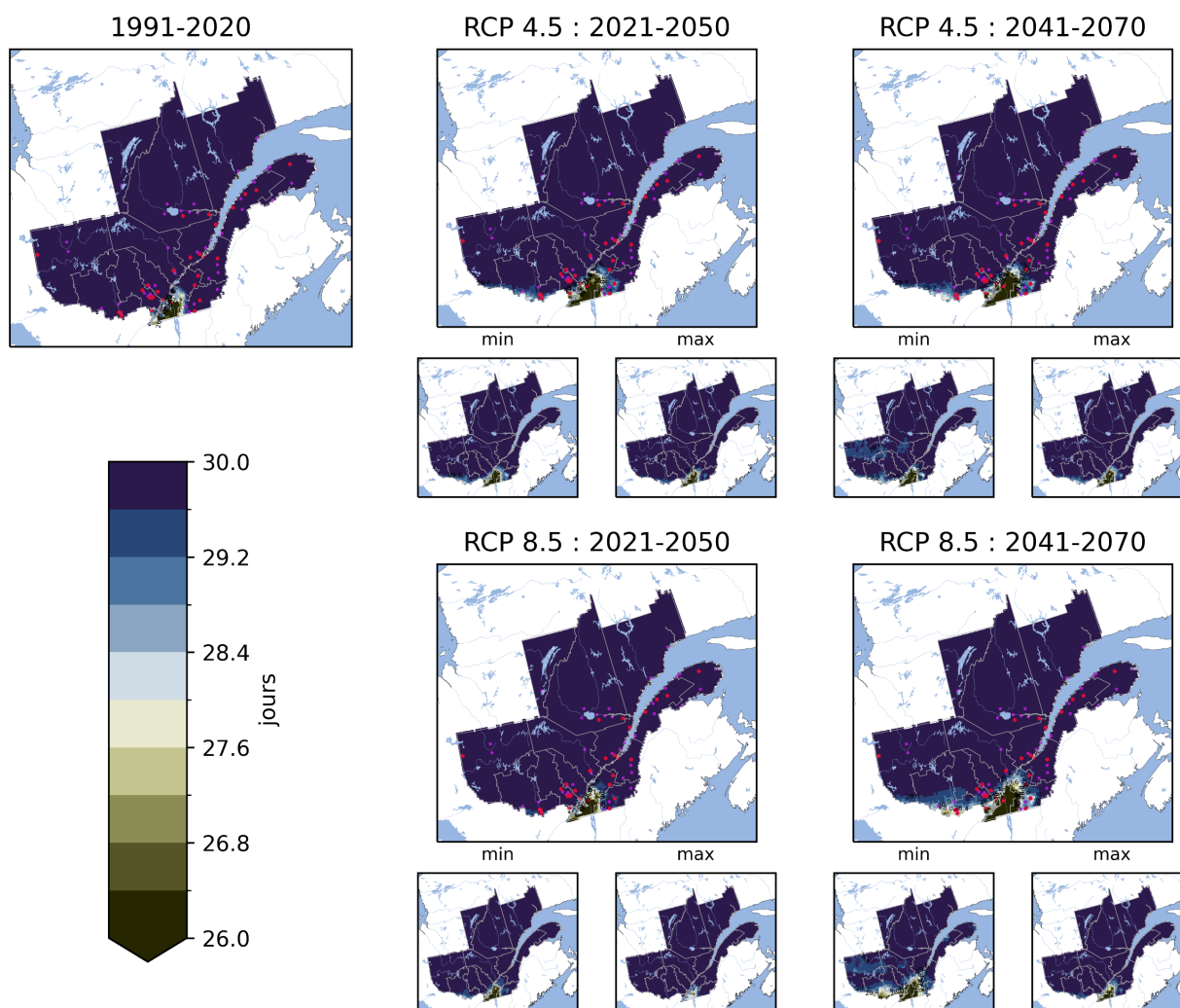


Figure 8 – Conditions simulées du nombre annuel de jours avec un couvert de neige naturelle au sol pendant le congé de la relâche (entre le 19 février et le 20 mars inclusivement), pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de



ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

## 5. MAXIMUM D'ÉÉN

Une diminution du maximum d'équivalent en eau de la neige naturelle est projetée sur l'ensemble du domaine, avec une tendance plus marquée dans le sud (Figure 9), et beaucoup plus intense pour les simulations avec le RCP 8.5 que celles avec le RCP 4.5. La vallée du Saint-Laurent et le sud du domaine ont des valeurs plus faibles de maximum annuel d'ÉÉN dans la période historique (1991-2020) que le reste du sud du Québec.

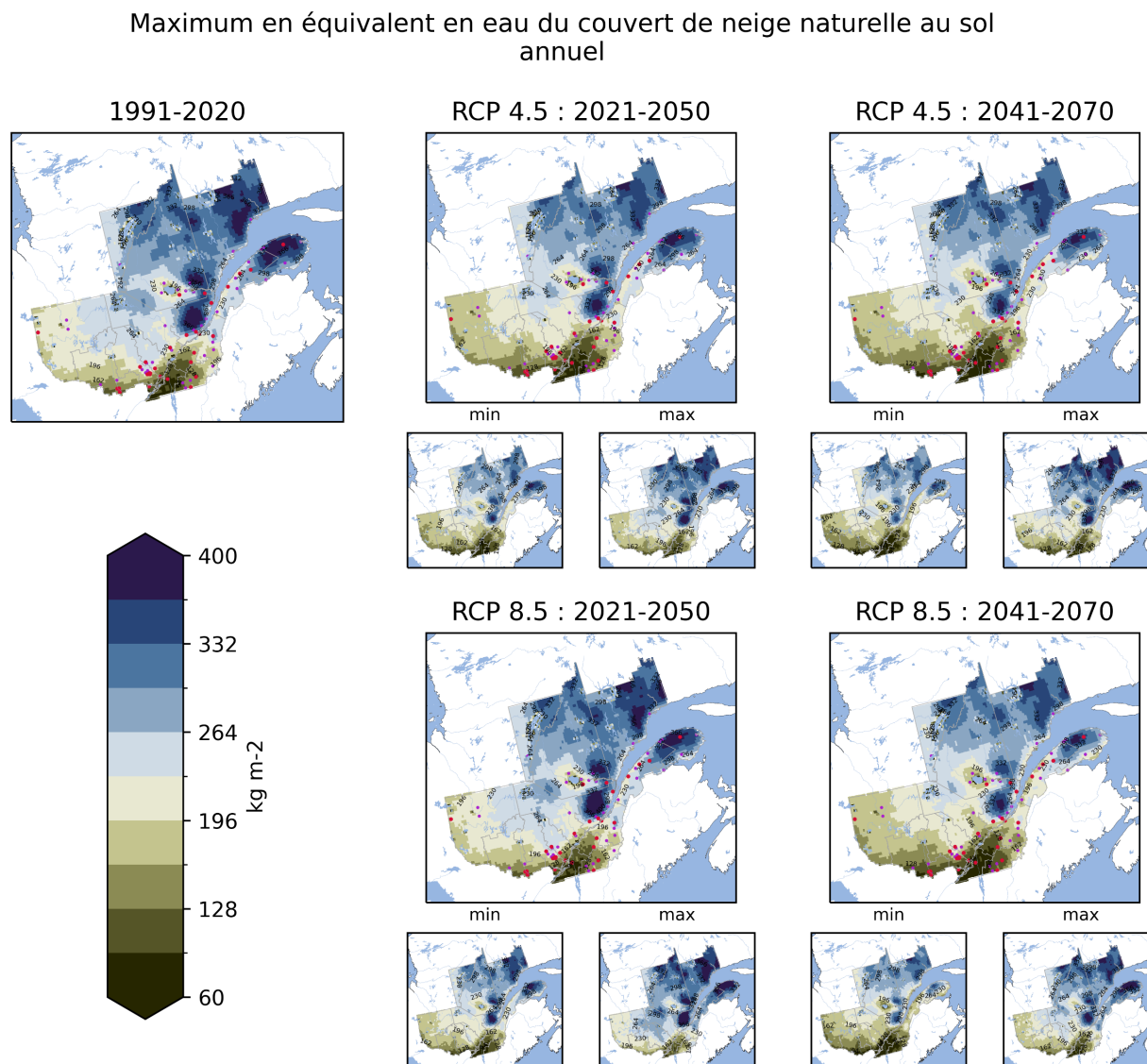


Figure 9 – Conditions simulées du maximum annuel de l'ÉÉN (mm), pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les

stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.

De manière générale, le Groupe 1 Sud-Ouest est celui avec les plus faibles maximums annuels d'ÉEN (de l'ordre de 145 [120] mm en 1991-2020 [2041-2070]), suivi par le Groupe 2 Nord-Ouest (de l'ordre de 230 [200] mm en 1991-2020 [2041-2070]), puis le Groupe 3 Nord-Est (de l'ordre de 290 [275] mm en 1991-2020 [2041-2070]) et enfin le Groupe 4 Sud-Est (de l'ordre de 310 [270] mm en 1991-2020 [2041-2070]). Le Groupe 4 Sud-Est est néanmoins celui pour lequel la diminution est la plus marquée (de l'ordre de 40 mm) suivi des Groupes 1 et 2, puis du Groupe 3 Nord-Est (Tableau 12, Annexe C).

## 6. FORTES ACCUMULATIONS EN UNE JOURNÉE

Jours avec une augmentation en une journée de 10 mm ou plus du couvert de neige naturelle au sol annuel

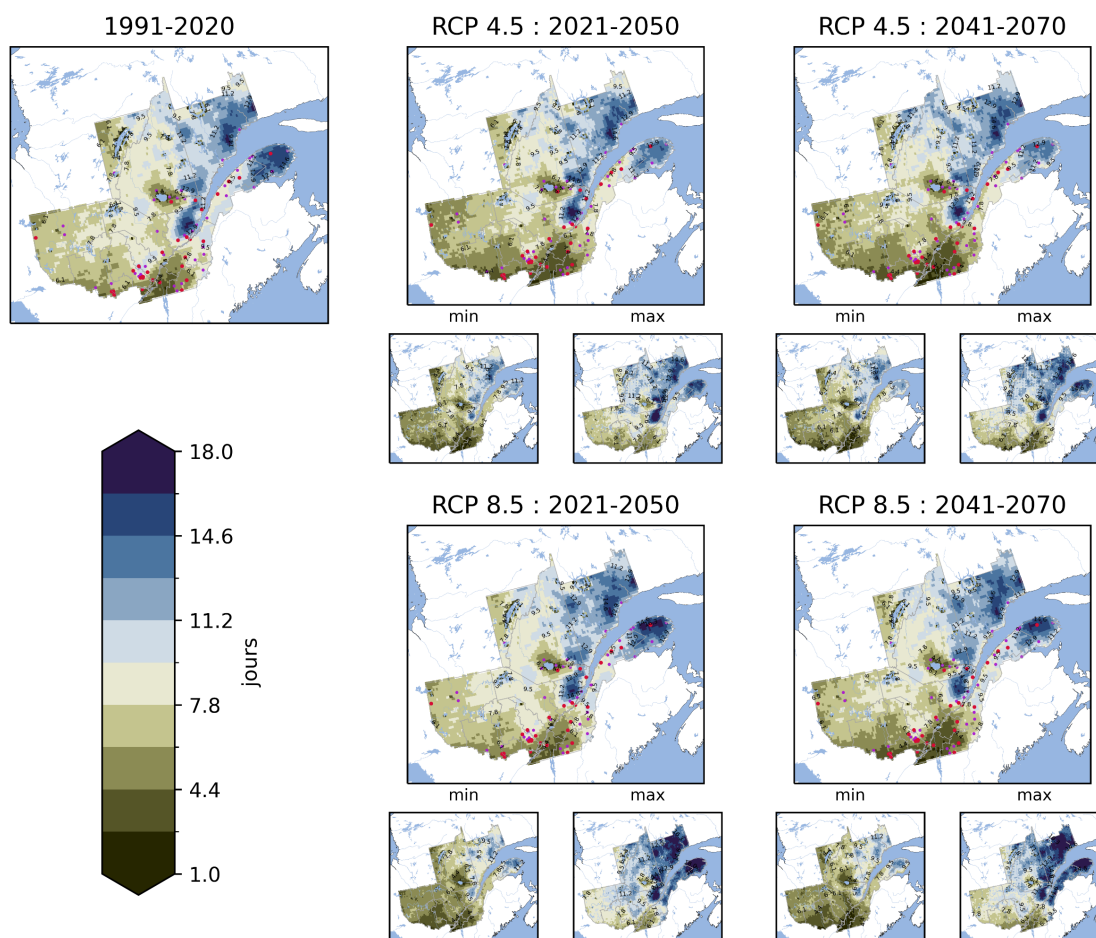


Figure 10 – Conditions simulées du nombre annuel de jours avec une augmentation en une journée de 10 mm et plus du couvert de neige naturelle au sol, pour la période de référence 1991-2020 ainsi que les horizons 2021-2050 et 2041-2070. Le panneau 1991-2020 représente la moyenne des simulations PINS (RCP 4.5 & RCP 8.5 combinés). Pour les horizons 2021-2050 et 2041-2070, les RCP sont présentés individuellement. Le panneau du haut présente la moyenne tandis que les panneaux du bas présentent le minimum et le maximum. Les stations de ski de l'ASSQ impliquées dans le projet sont indiquées par les points rouges, les autres stations de ski membres de l'ASSQ par les points mauves.



Sur l'ensemble du domaine Québec-ski, le portrait des fortes accumulations en une journée reste assez semblable entre la période 1991-2020 et les deux horizons futurs. Elles sont les plus nombreuses, avec des valeurs dépassant 14 jours en moyenne (1991-2020) en Gaspésie, autour de la Capitale-Nationale (Mont Ste-Anne, parc de la Jacques-Cartier) et sur la Côte-Nord (Figure 10). Dans ces régions, le portrait reste similaire dans les horizons futurs, quel que soit le RCP considéré. Les régions plus au sud du domaine, en particulier sur la rive sud du fleuve, connaissent quant à elles moins de journées avec des augmentations de 10 mm et plus d'ÉEN en 24 h (6 jours et moins en 1991-2020). Une diminution peu marquée est projetée dans ces régions.

Des comportements similaires à ceux analysés pour les indicateurs présentés précédemment se retrouvent pour les quatre Groupes climatiques. Le Groupe 1 Sud-Ouest expérimente le plus faible nombre de jours avec une augmentation de 10 mm ou plus d'ÉEN en 24 h de tout le domaine avec en moyenne 6 jours en 1991-2020. Ce nombre diminue en moyenne de 0.1 jour (2021-2050, RCP 8.5) à 1.5 jour (2041-2070, RCP 4.5). Le Groupe 2 Nord-Ouest a un nombre de jours avec des augmentations de 10 mm ou plus en 24h, faible, mais plus important que le Groupe 1 Sud-Ouest. Les valeurs moyennes en 1991-2020 sont de l'ordre de 8.1 jours diminuant jusqu'à 7.1 [7.4] jours en 2041-2070 pour l'ensemble RCP 4.5 [RCP 8.5]. Le Groupe 3 Nord-Est vient ensuite, avec des valeurs restant assez stables dans le temps : 9.2 jours en 1991-2020 jusqu'à 9.7 [9.6] jours en 2041-2070 avec l'ensemble RCP 4.5 [RCP 8.5]. Enfin le Groupe 4 Sud-Est a le plus de jours avec des augmentations de 10 mm ou plus en 1991-2020 (12.2 jours). Le nombre de jours reste dans les mêmes ordres de grandeur : 10.5 jours (2021-2050, RCP 4.5) à 12.3 jours (2021-2050, RCP 4.5) (Tableau 13, Annexe C).

## V. Conclusions

Nous avons pour objectif de produire un portrait du couvert de neige naturelle au sol au Québec ajusté statistiquement. Ce portrait comprend 8 indicateurs de neige naturelle au sol.

Un ensemble de simulations initial considéré dans ce projet est composé de 26 simulations climatiques régionales, issues du projet NA-CORDEX et de l'ensemble de simulations produites à Ouranos avec le MRCC5, pour lesquelles la variable de l'équivalent en eau de la neige a été archivée. Le produit sur grille d'équivalent en eau de la neige en période historique servant de référence est ERA5-Land. Dix simulations (ensemble PINS) ont été sélectionnées dans l'ensemble initial de simulations en comparant les début et fin de saison de couvert continu de neige naturelle avec le produit de référence ERA5-Land. Cette sélection a permis de prendre en compte les simulations avec les données plus proches de la référence, et en faisant l'hypothèse qu'elles reproduisent de manière plus cohérente le cycle annuel du manteau neigeux. L'ensemble PINS comprend deux RCP, quatre modèles régionaux de climat et quatre modèles globaux de climat. Deux modèles régionaux de climat font partie de la même famille (version du MRCC5 roulée à Ouranos, et celle roulée à l'UQAM), mais avec des résolutions spatiales différentes.

Le couvert de neige naturelle présente une saisonnalité forte et des valeurs nulles en dehors de la saison. Cela a présenté des défis pour l'ajustement de biais statistique puisque, par exemple, une saison simulée trop courte par rapport à la référence entraîne un ajustement de biais sur des valeurs nulles. La sélection de l'ensemble PINS a permis de minimiser ce problème. Pour aller plus loin, une méthode de décroissance progressive a été appliquée sur l'indicateur de fin de saison continue de l'ensemble PINS. Par la suite, la méthode d'ajustement de biais *quantile mapping* (multiplicative) a été appliquée sur l'ensemble. Nous avons ainsi pu obtenir un portrait de huit indicateurs de neige naturelle au sol pour le domaine Québec-ski.

Les principaux résultats sur le domaine Québec-ski sont :

- Une diminution générale du couvert de neige naturelle projetée pour l'ensemble du domaine Québec-ski; des maximums annuels d'ÉEN plus faibles; la période de couvert continu raccourcissant, en lien avec un début plus tardif et une fin plus hâtive.
- Dans le sud et la vallée du Saint-Laurent, une diminution du couvert de neige naturelle s'accroissant plus la période s'approche de la fin du siècle, et aussi, plus importante avec les simulations avec le RCP 8.5 (scénario d'émissions élevées) que le RCP 4.5 (scénario d'émissions modérées).
- Dans le reste du domaine, une diminution du couvert de neige naturelle moins marquée, avec des régions moins affectées vers le nord du domaine et sur certains reliefs, dont les massifs de Charlevoix, des Monts-Valin et des Chic-Chocs.
- Le patron des jours avec une forte augmentation du couvert de neige naturelle en 24 heures changeant peu, quel que soit le RCP ou l'horizon temporel considéré.

Pour les quatre Groupes climatiques, les messages clés sont présentés ci-dessous pour la période historique 1991-2020. Les valeurs pour l'horizon 2041-2070 sont également indiquées dans les messages clés et sont écrites entre crochets.

**Groupe 1 Sud-Ouest :**  
**Centre-du-Québec, Chaudière-Appalaches, Estrie, Montérégie, Montréal Laval**

Les régions comprises dans ce Groupe possèdent un faible couvert de neige naturelle au sol : les maximums annuels d'ÉEN sont de l'ordre de 145 [120] mm, la saison de couvert continu de neige naturelle au sol dure environ 140 [115] jours, commençant à la fin novembre [premier tiers de décembre] et finissant à la mi-avril [première semaine d'avril]. Le nombre de jours sans couvert est de l'ordre de 225 [245], le nombre de jours de couvert autour du congé de Noël de 15 [13.5] et du congé de la relâche de 29.3 [27.5] (1991-2020 [2041-2070]).

**Groupe 2 Nord-Ouest :**  
**Capitale-Nationale, Outaouais, Lanaudière, Laurentides, Mauricie, Abitibi-Témiscamingue**

Les régions comprises dans ce Groupe ont un couvert de neige naturelle au sol plus important en ce qui concerne la durée et le maximum annuel que celui du Groupe 1 Sud-Ouest. Les maximums annuels sont de l'ordre de 235 [200] mm, le couvert continu commence à la mi-novembre [fin novembre] et achève au début de mai [fin avril], environ 190 [210] jours n'ont pas de couvert de neige naturelle au sol, toute la période des congés de Noël et de la relâche ont un couvert de neige naturelle au sol (1991-2020 [2041-2070]).

**Groupe 3 Nord-Est :**  
**Jamésie-Sud Est, Saguenay – Lac-Saint-Jean, Côte-Nord**

Les régions comprises dans ce Groupe ont le couvert de neige au sol le plus long de tout le domaine Québec-ski. Le couvert continu de neige naturelle au sol dure environ 210 [190] jours, de la fin octobre [premier tiers de novembre] à la fin mai [mi-mai], 150 [175] jours ne présentent pas de couvert de neige naturelle au sol, les périodes autour des congés de Noël ont un couvert de neige naturelle, le maximum annuel d'ÉEN est de l'ordre de 290 [275] mm (1991-2020 [2041-2070]).

**Groupe 4 Sud-Est :**  
**Bas-Saint-Laurent, Gaspésie**

Les régions comprises dans le Groupe 4 Sud-Est ont le maximum annuel d'ÉEN le plus important du domaine Québec-ski, de l'ordre de 310 [265] mm. Pour les autres indicateurs, les régions de ce Groupe se situent entre celles du Groupe 2 Nord-Ouest et celles du Groupe 3 Nord-Est : le couvert continu de neige naturelle au sol est de l'ordre de 185 [170] jours, commençant à la mi-novembre [deux tiers de novembre] et finissant à la mi-mai [premier tiers de mai], 180 [200] jours sont sans couvert de neige naturelle au sol, les périodes autour du congé de Noël et de la relâche ont un couvert de neige naturelle au sol (1991-2020 [2041-2070]).

L'ensemble PINS est le résultat d'une sélection de simulations. Cette sélection est basée sur la capacité des modèles climatiques à reproduire le cycle annuel du manteau neigeux et à tenir compte des incertitudes dues aux différences entre les modèles. Le produit de référence sur grille utilisé pour l'ajustement de biais est, au meilleur de nos connaissances et lors de la réalisation de ce projet, le meilleur produit disponible pour notre région d'intérêt. Ainsi, l'ensemble PINS forme un ensemble de simulations de qualité pour la projection de l'équivalent en eau de la neige naturelle au sol au Québec. Utiliser un ensemble de simulations climatiques pour l'équivalent en eau de la neige et en ajuster statistiquement le biais est un chemin qui a été moins utilisé que l'utilisation d'un modèle externalisé ayant pour intrants des variables atmosphériques ajustées statistiquement pour obtenir un portrait futur du couvert de neige. Néanmoins, ceci est nécessaire afin de mieux prendre en compte les processus physiques et interactions entre l'atmosphère et la surface dans le but de produire et fournir des données climatiques les plus adéquates et rigoureuses possibles. Au-delà des travaux réalisés pour ce projet, l'ensemble PINS offre la possibilité d'étudier différents aspects de la simulation climatique du couvert de neige. Cet ensemble pourrait aussi être bonifié grâce à de nouvelles simulations régionales de climat utilisant comme pilotes, des modèles globaux de la génération CMIP6 ou encore avec des modèles régionaux dont le schéma de neige aura été amélioré.

Le produit de référence ERA5-Land, malgré ses bonnes performances, a aussi des biais sur l'équivalent en eau de la neige naturelle. Que ce soit dû à son fort biais chaud pour sa température quotidienne minimale et son biais froid sur sa température quotidienne maximale; ou par les modèles de neige et de surface qui sont utilisés dans le modèle produisant ERA5-Land. Tout comme les modèles de climat, les produits sur grille comme les réanalyses évoluent, et de nouvelles versions ainsi que de nouveaux produits sont régulièrement rendus disponibles. Il est donc important pour les futurs travaux sur les projections d'équivalent en eau de la neige de rester à jour sur les produits sur grille pouvant servir de référence pour l'ajustement de biais statistique.



# VI. Références

- Aschauer, J., Michel, A., Jonas, T., & Marty, C. (2023). An empirical model to calculate snow depth from daily snow water equivalent: SWE2HS 1.0. *Geoscientific Model Development*, 16(14), 4063–4081. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4063-2023>
- Bourgault, P., Huard, D., Smith, T. J., Logan, T., Aoun, A., Lavoie, J., Dupuis, É., Rondeau-Genesse, G., Alegre, R., Barnes, C., Beaupré Laperrière, A., Biner, S., Caron, D., Ehbrecht, C., Fyke, J., Keel, T., Labonté, M.-P., Lierhammer, L., Low, J.-F., ... Whelan, C. (2023). xclim: xarray-based climate data analytics. *The Journal of Open Source Software*, 8(85), 5415. <https://doi.org/10.21105/joss.05415>
- Bresson, É., & Biner, S. (2021). *Évaluation de la neige au sol simulée par le MRCC5 pour la base de données de CROQ*.
- Da Silva, L., Desrochers, F.-A., Pineault, K., Gosselin, C.-A., Grenier, P., & Larose, G. (2019). *Analyse économique des mesures d'adaptation aux changements climatiques appliquée au secteur du ski alpin au Québec*.
- Matiu, M., & Hanzer, F. (2022). Bias adjustment and downscaling of snow cover fraction projections from regional climate models using remote sensing for the European Alps. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(12), 3037–3054.
- McCrary, R. R., Mearns, L. O., Hughes, M., Biner, S., & Bukovsky, M. S. (2022). Projections of North American snow from NA-CORDEX and their uncertainties, with a focus on model resolution. *Climatic Change*, 170(3), 1–25.
- Mekis, É., & Vincent, L. A. (2011). An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. In *Atmosphere - Ocean*. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.583910>
- Michel, A., Aschauer, J., Jonas, T., Gubler, S., Kotlarski, S., & Marty, C. (2023). SnowQM 1.0: A fast R Package for bias-correcting spatial fields of snow water equivalent using quantile mapping. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2023, 1–28. <https://doi.org/10.5194/gmd-2022-298>
- Morin, S., Samacoïts, R., François, H., Carmagnola, C. M., Abegg, B., Demiroglu, O. C., Pons, M., Soubeyroux, J. M., Lafaysse, M., Franklin, S., Griffiths, G., Kite, D., Hoppler, A. A., George, E., Buontempo, C., Almond, S., Dubois, G., & Cauchy, A. (2021). Pan-European meteorological and snow indicators of climate change impact on ski tourism. *Climate Services*, 22(April). <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100215>
- Mortimer, C., Mudryk, L. R., Derksen, C., Luoju, K., Brown, R. D., Kelly, R., & Tedesco, M. (2020). Evaluation of long-term Northern Hemisphere snow water equivalent products. *The Cryosphere*, 14(5), 1579–1594.
- Mudryk, L. R., Mortimer, C., Derksen, C., Elias Chereque, A., & Kushner, P. J. (2024). Benchmarking of SWE products based on outcomes of the SnowPEX+ Intercomparison Project. *EGUsphere*, 2024, 1–28. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-3014>
- Mudryk, L. R., Derksen, C., Kushner, P. J., & Brown, R. (2015). Characterization of Northern Hemisphere snow water equivalent datasets, 1981-2010. *Journal of Climate*, 28(20), 8037–8051. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0229.1>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

- Scott, D., Steiger, R., Knowles, N., & Fang, Y. (2020). Regional ski tourism risk to climate change: An inter-comparison of Eastern Canada and US Northeast markets. *Journal of Sustainable Tourism*, 28(4), 568–586. <https://doi.org/10.1080/09669582.2019.1684932>
- Sospedra-Alfonso, R., & Merryfield, W. J. (2017). Influences of Temperature and Precipitation on Historical and Future Snowpack Variability over the Northern Hemisphere in the Second Generation Canadian Earth System Model. *Journal of Climate*, 30(12), 4633–4656. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0612.1>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>
- Vionnet, V., Mortimer, C., Brady, M., Arnal, L., & Brown, R. (2021). Canadian historical Snow Water Equivalent dataset (CanSWE, 1928–2020). *Earth Syst. Sci. Data*, 13(9), 4603–4619. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4603-2021>
- Vionnet, V., Mortimer, C., Brady, M., Arnal, L., & Brown, R. (2023). *Canadian historical Snow Water Equivalent dataset (CanSWE, 1928-2022)*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7734616>
- Zahmatkesh, Z., Tapsoba, D., Leach, J., & Coulibaly, P. (2019). Evaluation and bias correction of SNODAS snow water equivalent (SWE) for streamflow simulation in eastern Canadian basins. *Hydrological Sciences Journal*, 64(13), 1541–1555. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1660780>

# VII. Annexes

## A. ÉVALUATION DE LA BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE

La base de données de référence a été évaluée avec les observations disponibles dans CanSWE. La Figure 11 présente l'exemple du maximum annuel d'ÉEN dans la région de l'Outaouais qui comprend 18 stations d'observation. Cette figure représente les données observées annuelles (points de couleurs, et points et tracé bleus pour la moyenne de l'ensemble, enveloppe des valeurs en gris), et les données de ERA5-Land pour la région entière (10e, 50e et 90e percentile, noir).

Les moyennes de CanSWE et de ERA5-Land ont des valeurs très similaires pour le maximum annuel d'ÉEN.

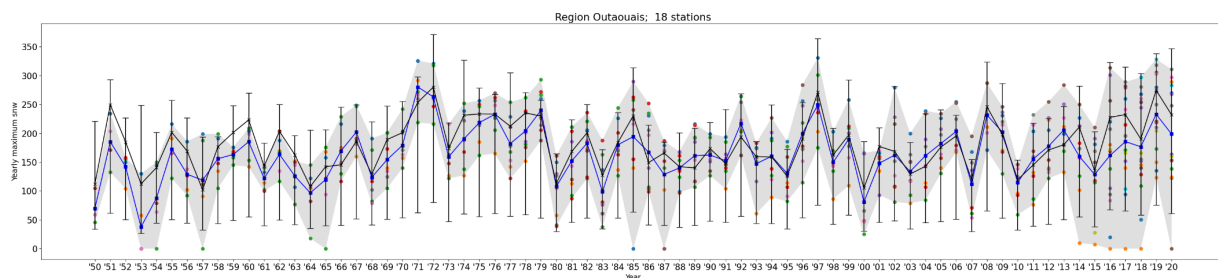


Figure 11 – Maximum annuel d'ÉEN pour la région de l'Outaouais. Stations météorologiques : Observations aux stations de la base de données CanSWE (points colorés), médiane des observations (ligne et points bleus), enveloppe des valeurs (gris). ERA5-Land : médiane sur la région (ligne et points noirs), barres couvrant les 10e et 90e centiles (noir).

## B. PRODUCTION D'UN ENSEMBLE DE SCÉNARIOS D'ÉEN AJUSTÉS STATISTIQUEMENT

L'ajustement de biais statistique de l'ÉEN n'est pas une pratique courante. Une partie de ce projet était donc d'évaluer quelle méthode serait adéquate pour ajuster cette variable à forte variabilité saisonnière. Le fait que le couvert de neige au sol soit nul pendant toute une partie de l'année est un défi en soit. Si l'ÉEN simulé a par exemple une fin de saison hâtive, l'ajustement de biais ne sera pas toujours cohérent puisqu'il s'agira d'ajuster le biais d'une valeur nulle. Basés sur ceci, nous avons décidé :

- D'appliquer une sélection sur l'ensemble de simulations à considérer,
- D'appliquer une méthode de décroissance progressive sur la fin de la saison de fonte pour rallonger cette période de façon artificielle, mais non arbitraire,
- D'utiliser une méthode d'ajustement de biais statistique simple et éprouvée.

Tous ces points sont expliqués dans la suite de cette annexe.



## B.1. Sélection des simulations

Vingt-six simulations climatiques pour lesquelles la variable ÉEN a été archivée étaient disponibles pour l'étude (Tableau 5). Ces simulations sont issues du projet NA-CORDEX ou produites à Ouranos avec le MRCC5.

Tableau 5 – Liste des simulations produites par des MRC pour lesquelles la variable ÉEN a été archivée. Les simulations en gras sont les simulations sélectionnées pour ce projet.

Nom complet	MRC	Résolution	Pilote	RCP
<b>CNRM-CM5 OURANOS CRCM5 RCP 4.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,22°</b>	<b>CNRM-CM5 (r1i1p1)</b>	<b>4.5</b>
CanESM2 CanRCM4 RCP 4.5	CanRCM4	0,22°	CanESM2 (r1i1p1)	4.5
CanESM2 OURANOS CRCM5 RCP 4.5	MRCC5	0,22°	CanESM2 (r1i1p1)	4.5
CanESM2 SMHI SMHI-RCA4 RCP 4.5	RCA4	0,44°	CanESM2 (r1i1p1)	4.5
CanESM2 UQAM CRCM5 RCP 4.5	MRCC5	0,44°	CanESM (r1i1p1)	4.5
<b>GFDL-ESM2M OURANOS CRCM5 RCP 4.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,22°</b>	<b>GFDL-ESM2M (r1i1p1)</b>	<b>4.5</b>
ICHEC-EC-EARTH DMI DMI-HIRHAM5 RCP 4.5	HIRHAM5	0,44°	ICHEC-EC-EARTH (r3i1p1)	4.5
<b>MPI-ESM-LR OURANOS CRCM5 RCP 4.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,22°</b>	<b>MPI-ESM-LR (r1i1p1)</b>	<b>4.5</b>
<b>MPI-ESM-LR UQAM CRCM5 RCP 4.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,44°</b>	<b>MPI-ESM-LR (r1i1p1)</b>	<b>4.5</b>
<b>CNRM-CM5 OURANOS CRCM5 RCP 8.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,22°</b>	<b>CNRM-CM5 (r1i1p1)</b>	<b>8.5</b>
CanESM2 CanRCM4 RCP 8.5	CanRCM4	0,22°	CanESM2 (r1i1p1)	8.5
CanESM2 OURANOS CRCM5 RCP 8.5 1	MRCC5	0,22°	CanESM2 (r1i1p1)	8.5
CanESM2 OURANOS CRCM5 RCP 8.5 2	MRCC5	0,22°	CanESM2 (r2i1p1)	8.5
CanESM2 OURANOS CRCM5 RCP 8.5 3	MRCC5	0,22°	CanESM2 (r3i1p1)	8.5
CanESM2 OURANOS CRCM5 RCP 8.5 4	MRCC5	0,22°	CanESM2 (r4i1p1)	8.5
CanESM2 OURANOS CRCM5 RCP 8.5 5	MRCC5	0,22°	CanESM2 (r5i1p1)	8.5
CanESM2 SMHI SMHI-RCA4 RCP 8.5	SMHI-RCA4	0,44°	CanESM2 (r1i1p1)	8.5
GFDL-ESM2M ISU ISU-RegCM4 RCP 8.5	RegCM4	0,22°	GFDL-ESM2M (r1i1p1)	8.5
<b>GFDL-ESM2M NCAR-WRF RCP 8.5</b>	<b>WRF</b>	<b>0,22°</b>	<b>GFDL-ESM2M (r1i1p1)</b>	<b>8.5</b>
<b>GFDL-ESM2M OURANOS CRCM5 RCP 8.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,22°</b>	<b>GFDL-ESM2M (r1i1p1)</b>	<b>8.5</b>
ICHEC-EC-EARTH DMI DMI-HIRHAM5 RCP 8.5	HIRHAM5	0,44°	ICHEC-EC-EARTH (r3i1p1)	8.5
<b>MOHC-HadGEM2-ES ISU ISU-RegCM4 RCP 8.5</b>	<b>RegCM4</b>	<b>0,22°</b>	<b>HadGEM2-ES (r1i1p1)</b>	<b>8.5</b>
MOHC-HadGEM2-ES NCAR-WRF RCP 8.5	WRF	0,22°	HadGEM2-ES (r1i1p1)	8.5
<b>MPI-ESM-LR OURANOS CRCM5 RCP 8.5</b>	<b>MRCC5</b>	<b>0,22°</b>	<b>MPI-ESM-LR (r1i1p1)</b>	<b>8.5</b>
<b>MPI-M-MPI-ESM-LR NCAR-RegCM4 RCP 8.5</b>	<b>RegCM4</b>	<b>0,22°</b>	<b>MPI-ESM-LR (r1i1p1)</b>	<b>8.5</b>
MPI-M-MPI-ESM-LR NCAR-WRF RCP 8.5	WRF	0,22°	MPI-ESM-LR (r1i1p1)	8.5

Les simulations (0.44° ou 0.22°) ont subi une descente d'échelle afin d'être à la même résolution que le produit de référence (0.1°) grâce à une interpolation bilinéaire.

La Figure 12 présente les proportions de points de grilles pour lesquelles la date de début (ligne du haut) et de la fin (ligne du bas) étaient respectivement dans un intervalle de +/- 10 jours et de +/- 15 jours par rapport à la

référence. Le domaine utilisé pour ce test est le sud du Québec (sous la latitude 50°N). Les simulations ont été sélectionnées lorsque le pourcentage était supérieur à 80% dans pour ces deux dates.

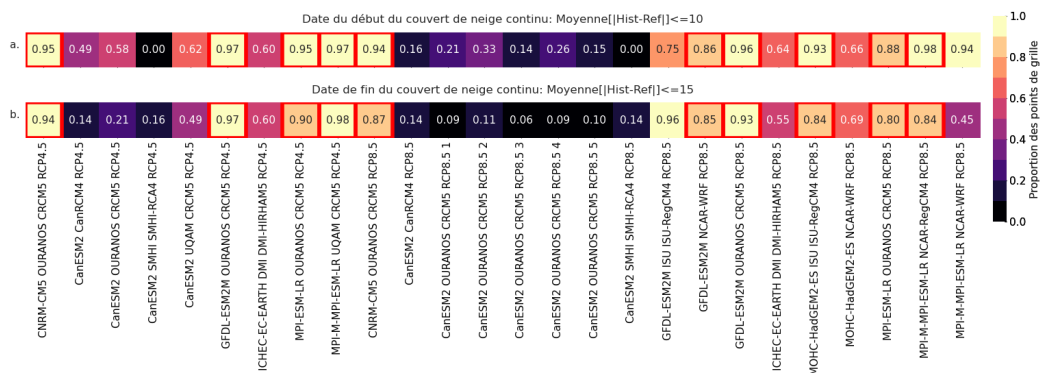


Figure 12 – a) Proportion de points de grille entrant dans l’intervalle de sélection pour le début de la saison avec un couvert de neige continu. b) Même graphique pour la fin de saison.

## B.2. Méthode de décroissance progressive

Cette méthode en quatre étapes a permis de créer une décroissance progressive pour la fin de la période de fonte aidant ainsi l’ajustement statistique de biais avec une saison plus allongée.

- Étape 1 :** La première séquence de l’année de 14 jours, ou plus, où l’ÉEN est inférieur à 1 mm est trouvée. La méthode de décroissance progressive est seulement appliquée à cette période (Figure 13). À noter qu’ici l’année est une année hivernale. Donc cette période correspond à la période de fonte.

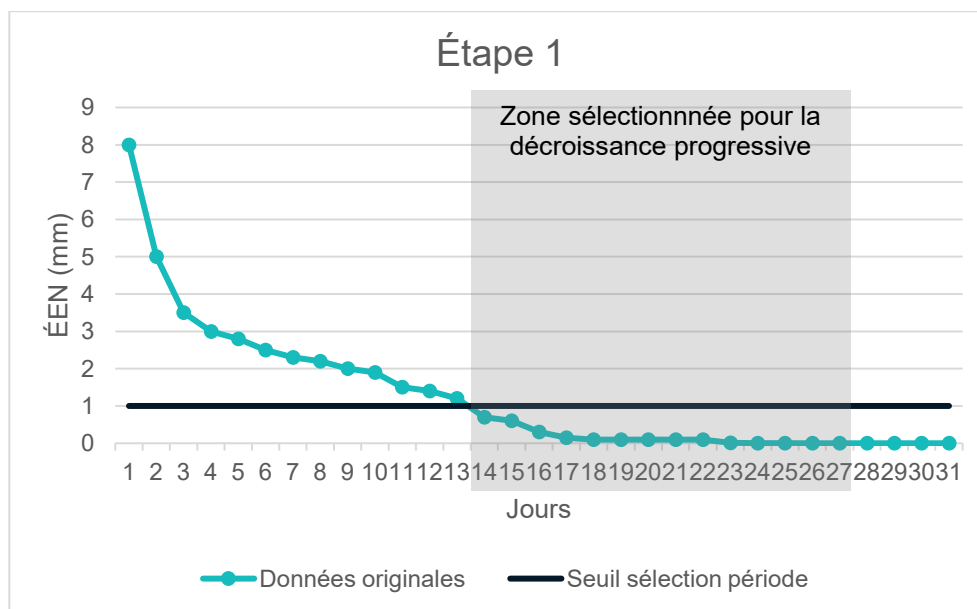


Figure 13 – Exemple d’une série temporelle journalière d’ÉEN (mm) pendant la période de fonte. Les données originales sont en turquoise, la sélection sur laquelle la méthode de décroissance progressive est appliquée par la suite est dans la zone en gris, le seuil de 1mm est en bleu foncé.

**Étape 2 :** Tous les ÉEN inférieurs à 0.001 mm sont mis à 0 (Figure 14 et Figure 15).

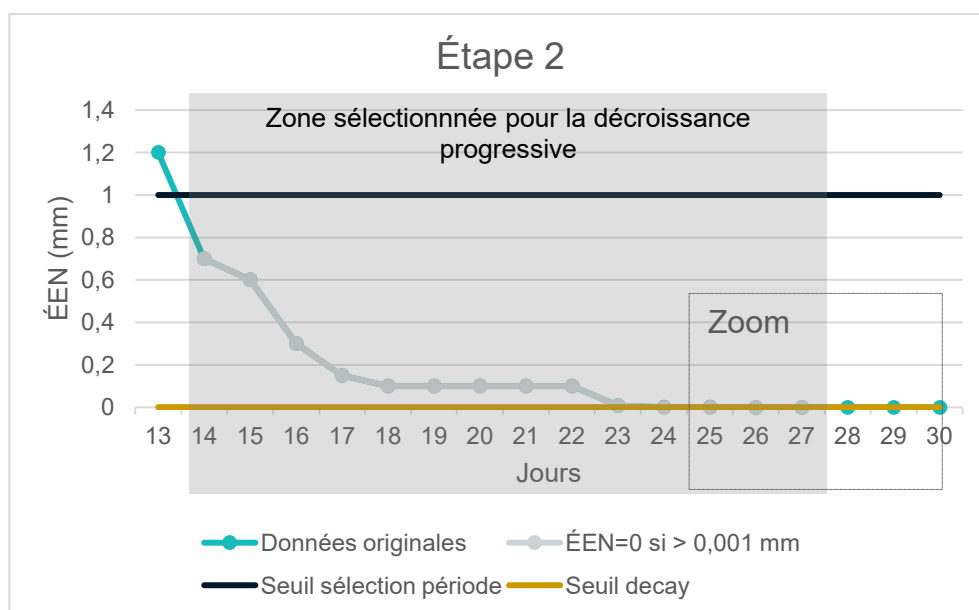


Figure 14 – Zoom sur la période sélectionnée de la série temporelle journalière d'ÉEN. Les données originales sont en turquoise; les données de la période sélectionnée sont en gris et sont mises à zéro lorsqu'elles sont inférieures au seuil de 0.001 mm (orange).

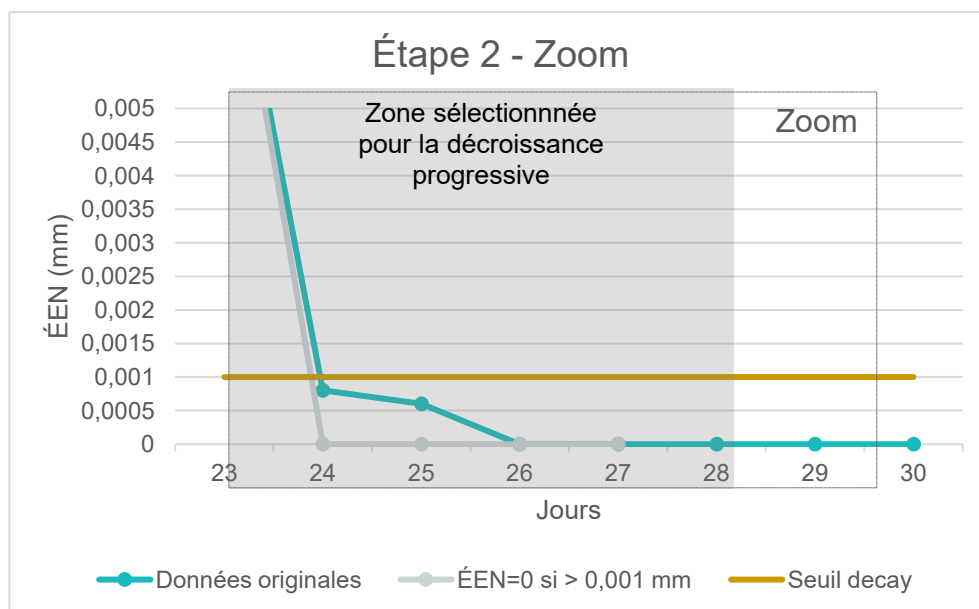


Figure 15 – Zoom de la Figure 14.

**Étape 3 :** Tout ÉEN nul est remplacé par la donnée précédente divisée par deux. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les ÉEN de la période visée, soit non nuls (Figure 16).

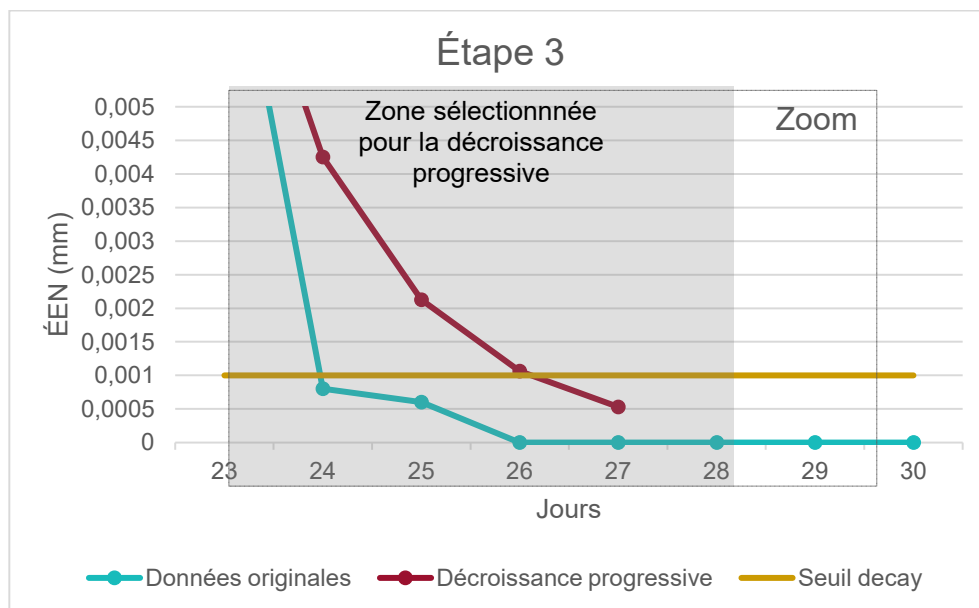


Figure 16 – Les données originales sont en turquoise; les données de la période sélectionnées en gris; les données sur lesquelles la décroissance progressive a été appliquée sont en bourgogne; le seuil de 0.001 mm en orange.

**Étape 4 :** Tous les ÉEN inférieurs à 0.001 mm sont mis à 0 à nouveau (Figure 17).

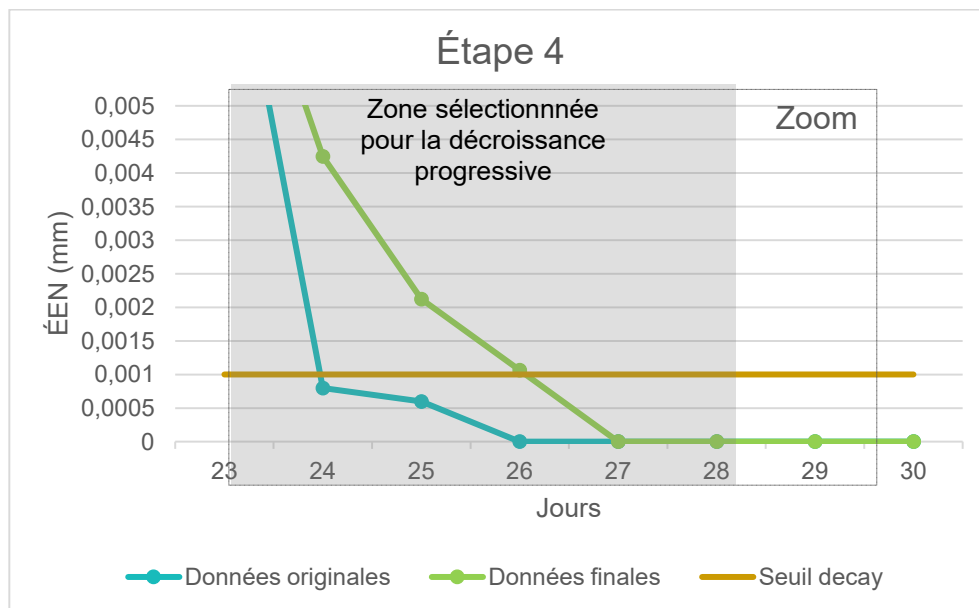


Figure 17 – Les données originales sont en turquoise; les données finales en vert; le seuil de 0.001 mm en orange.

### B.3. Méthode d'ajustement statistique de biais

La méthode statistique d'ajustement de biais est un *quantile mapping*, dont les caractéristiques techniques sont décrites ci-après. Cette méthode est disponible dans la librairie `xclim` (voir [ici](#) pour les détails). Ce choix a été fait en accord avec la méthodologie proposée dans Michel et al. (2023).

1. Quantile mapping:
  - Quantiles = (5,7, 9, ...,99)
  - Groupement : Jour de l'année
  - Fenêtre mobile : 15 jours
2. L'ajustement multiplicatif calcule les valeurs de "ref/hist" pour trouver des facteurs d'ajustement. Le choix d'un ajustement multiplicatif, et non additif, est dû au caractère borné (variable toujours positive ou nulle) de l'ÉEN. Pour éviter des divisions par 0, de petites valeurs aléatoires autour de  $1e-8$  mm sont ajoutées en bruit de fond à "hist" (fonction `jitter_under_thresh`).
3. Adaptation de fréquence (fonction `adapt_freq`) (Thiemeßl et al., 2012): Lorsque le modèle a une plus grande fréquence de jours sans neige que la référence, l'ajustement par quantiles crée un biais vers les jours avec neige. La fraction de jours sans neige est ramenée à celle de la référence en ajoutant aléatoirement de petites valeurs de neige entre 0 et  $1e-4$  mm (seuil choisi).

## C. MOYENNES SPATIALES DES INDICATEURS SUR LES QUATRE GROUPES CLIMATIQUES

Les calculs de statistiques sont faits comme suit.

- Pour les figures de la partie Résultats :
  - o Pour chaque simulation, une moyenne temporelle de 30 ans est faite pour chaque horizon d'intérêt;
  - o Pour chaque ensemble de simulations avec le même RCP (4 simulations pour RCP 4.5 et 6 pour RCP 8.5),
    - La moyenne de l'ensemble est calculée à partir des moyennes temporelles sur 30 ans;
    - Le minimum [maximum] de cet ensemble est calculé pour chaque point de grille.
- Pour les tableaux de statistiques par Groupe climatique :
  - o La moyenne spatiale correspond à la moyenne d'ensemble moyennée spatialement sur le Groupe climatique;
  - o Le minimum [maximum] correspond à la moyenne spatiale du minimum [maximum] de l'ensemble;
  - o Les statistiques sont faites pour une fréquence annuelle.

Tableau 6 – Moyennes spatiales pour les quatre Groupes climatiques pour la durée du couvert continu de neige naturelle au sol (jours)

Durée du couvert continu de neige naturelle au sol					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	126.9 (131.1   123.5)	124.8 (128.7   119.9)	129.0 (136.4   122.0)	119.2 (125.4   114.7)	116.5 (129.9   107.0)
Groupe 2 Nord-Ouest	163.7 (166.6   160.6)	163.0 (166.6   159.7)	163.4 (169.1   156.5)	157.2 (161.0   153.2)	153.9 (159.8   147.7)
Groupe 3 Nord-Est	198.9 (202.3   196.0)	199.0 (203.3   194.5)	198.2 (204.3   191.1)	193.0 (197.5   189.2)	188.2 (194.0   182.4)
Groupe 4 Sud-Est	174.8 (178.6   170.4)	174.4 (179.0   168.2)	173.4 (179.4   165.7)	167.6 (172.4   161.8)	162.7 (172.2   153.3)

Tableau 7 – Comme Tableau 6 pour la date de début du couvert continu de neige naturelle au sol (jours juliens).

Date de début du couvert continu de neige naturelle au sol					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	332.7 (334.4   330.8)	337.9 (341.4   334.7)	337.8 (341.8   333.2)	341.7 (345.8   337.5)	342.4 (346.5   337.6)
Groupe 2 Nord-Ouest	318.4 (320.0   316.8)	322.2 (325.0   319.4)	322.7 (325.6   319.4)	325.5 (329.2   321.5)	327.0 (330.7   323.2)
Groupe 3 Nord-Est	302.5 (304.0   301.2)	306.8 (309.7   303.6)	306.6 (310.1   303.1)	309.9 (313.9   306.1)	312.1 (315.1   309.1)
Groupe 4 Sud-Est	317.2 (318.9   315.5)	322.9 (326.5   319.0)	323.1 (328.6   319.0)	326.9 (330.8   323.0)	328.7 (334.4   322.4)

Tableau 8 – Tableau 6 pour la date de fin du couvert continu de neige naturelle au sol (jours juliens).

Date de fin du couvert continu de neige naturelle au sol					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	106.3 (108.1   104.3)	97.8 (100.0   95.6)	102.5 (108.4   97.2)	96.0 (98.9   93.0)	94.8 (103.1   88.2)
Groupe 2 Nord-Ouest	126.5 (128.1   124.6)	120.3 (122.8   116.6)	121.6 (125.2   117.3)	117.8 (119.9   115.5)	116.4 (120.1   112.3)
Groupe 3 Nord-Est	145.6 (147.3   143.6)	141.7 (144.3   137.7)	140.8 (143.2   138.1)	138.7 (140.6   136.5)	136.6 (139.1   134.2)
Groupe 4 Sud-Est	136.6 (138.6   133.8)	132.3 (134.3   129.2)	131.9 (134.5   127.3)	129.6 (131.5   127.2)	126.9 (130.2   120.2)

Tableau 9 – Comme Tableau 6 pour le nombre annuel de jours sans couvert de neige naturelle au sol (jours).

Nombre de jours sans couvert de neige naturelle au sol					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	224.9 (226.2   223.1)	238.5 (243.7   234.9)	233.6 (240.6   225.9)	243.2 (247.9   237.4)	246.9 (256.5   233.7)
Groupe 2 Nord-Ouest	190.2 (192.2   188.4)	200.9 (204.3   197.7)	199.0 (205.1   193.9)	206.2 (209.8   203.0)	209.2 (215.4   203.5)
Groupe 3 Nord-Est	155.5 (157.5   153.7)	164.3 (169.4   160.4)	164.3 (169.9   159.4)	170.5 (174.0   166.6)	174.6 (179.2   169.7)
Groupe 4 Sud-Est	178.3 (181.4   176.4)	188.4 (194.3   184.3)	188.5 (194.2   182.5)	195.3 (201.2   190.6)	200.1 (208.1   191.3)

Tableau 10 – Comme Tableau 6 pour le nombre annuel de jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de Noël (jours). Le maximum de jours possible est de 16 jours.

Jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de Noël					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	15.0 (15.3   14.5)	14.4 (15.0   13.6)	14.3 (15.1   13.5)	13.5 (14.2   12.3)	13.6 (14.7   12.3)
Groupe 2 Nord-Ouest	15.8 (16.0   15.3)	15.8 (15.9   15.6)	15.7 (15.9   14.9)	15.6 (15.8   15.4)	15.6 (15.9   14.8)
Groupe 3 Nord-Est	15.9 (16.0   15.4)	16.0 (16.0   16.0)	15.8 (16.0   15.0)	16.0 (16.0   15.9)	15.8 (16.0   15.0)
Groupe 4 Sud-Est	15.9 (16.0   15.4)	15.9 (16.0   15.9)	15.7 (16.0   14.9)	15.9 (16.0   15.6)	15.6 (16.0   14.4)

Tableau 11 – Comme Tableau 6 pour le nombre de jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de la relâche (jours). Le maximum de jours possible est de 30 jours.

Jours avec un couvert de neige naturelle au sol autour du congé de la relâche					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	29.3 (29.4   29.0)	28.4 (28.6   28.1)	29.0 (29.6   28.3)	27.8 (28.4   26.9)	27.1 (28.7   25.4)
Groupe 2 Nord-Ouest	30.0 (30.0   30.0)	29.9 (30.0   29.9)	30.0 (30.0   29.9)	29.9 (29.9   29.7)	30.0 (30.0   30.0)
Groupe 3 Nord-Est	30.0 (30.0   30.0)	30.0 (30.0   30.0)	30.0 (30.0   30.0)	30.0 (30.0   29.9)	30.0 (30.0   30.0)
Groupe 4 Sud-Est	30.0 (30.0   29.9)	30.0 (30.0   30.0)	30.0 (30.0   30.0)	30.0 (30.0   29.9)	30.0 (30.0   29.8)



Tableau 12 – Comme Tableau 6 pour le maximum annuel d'ÉEN (mm).

Maximum annuel d'ÉEN					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	146.3 (154.7   139.5)	131.0 (146.6   115.9)	148.6 (167.9   126.6)	120.1 (135   97.7)	120.5 (151.7   100.9)
Groupe 2 Nord-Ouest	233.6 (242.5   225.3)	208.4 (220.5   195.5)	231.6 (259.1   208.6)	198.5 (212.1   185.2)	199.0 (223.6   181.7)
Groupe 3 Nord-Est	291.5 (299.8   282.7)	277.1 (290.1   261.1)	288.4 (303.1   273.5)	276.5 (297.3   259.5)	274.4 (289.6   261.2)
Groupe 4 Sud-Est	309.2 (318.2   300.2)	284.7 (293.7   274.9)	299.3 (329.3   279.4)	271.8 (291.3   248.0)	262.2 (318.8   228.8)

Tableau 13 – Comme Tableau 6 pour le nombre annuel de jours avec une augmentation en une journée de 10 mm et plus du couvert de neige naturelle au sol (jours).

Nombre annuel de jours avec une augmentation en une journée de 10 mm et plus du couvert de neige naturelle au sol					
	1991-2020	2021-2050		2041-2070	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Groupe 1 Sud-Ouest	6.0 (7.1   4.9)	4.9 (6.2   3.8)	5.9 (7.5   4.4)	4.5 (5.3   3.6)	4.9 (6.9   3.5)
Groupe 2 Nord-Ouest	8.1 (9.5   6.5)	7.2 (8.5   6.0)	8.0 (9.9   5.4)	7.1 (8.2   6.1)	7.4 (9.0   5.4)
Groupe 3 Nord-Est	9.2 (11.0   7.4)	9.3 (10.6   8.0)	9.6 (11.8   7.3)	9.7 (11.2   8.4)	9.6 (11.9   7.3)
Groupe 4 Sud-Est	12.2 (14.6   9.8)	10.7 (12.4   9.4)	12.3 (15.6   9.5)	10.5 (12.2   9.3)	11.7 (15.6   9.1)



550, rue Sherbrooke Ouest, Tour Ouest, 19<sup>e</sup> étage  
Montréal (Québec) H3A 1B9

T.  
@. [info@ouranos.ca](mailto:info@ouranos.ca)

514 282-6464

[ouranos.ca](http://ouranos.ca)