OURANOS

ÉVALUATION DE LA NEIGE AU SOL SIMULÉE PAR LE MRCC5 POUR LA BASE DE DONNÉES DE CROQ

Rapport final
Mars 2021

Fonds vert Québec
Hydro Québec Institut de recherche
Mitacs Accelerate

ÉVALUATION DE LA NEIGE AU SOL SIMULÉE PAR LE MRCC5 POUR LA BASE DE DONNÉES DE CROQ

Rapport final

Mars 2021

ÉQUIPE DE RÉALISATION :
Émilie Bresson, UQÀM & Ouranos
Sébastien Biner, Ouranos

Titre du projet Ouranos: CROQ (Climat Reconstruit à Ouranos pour le Québec)

Numéro du projet Ouranos: 350013

Citation suggérée : Bresson, Émilie et Biner, Sébastien (2021). *Évaluation de la neige au sol simulée par le MRCC5 pour la base de données de CROQ*. Rapport présenté par Ouranos, Montréal. Ouranos. 30 p. + annexes.

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

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible grâce à :
L'institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ), le programme Accelerate de MITACS [IT06591] et le Fonds Vert (gouvernement du Québec).

Nous tenons à remercier plus particulièrement pour leur collaboration : Ross D. Brown (ECCC), René Laprise (UQAM), Julie M. Thériault (UQAM), René Roy (IREQ).

RÉSUMÉ

CONTEXTE

L'accumulation de neige au sol peut avoir des répercussions importantes sur de nombreux secteurs, dont l'environnement bâti, le transport, l'énergie, le tourisme, etc. Pour évaluer l'impact des changements climatiques, le climat passé doit être bien connu. Au Québec, surtout au nord de la vallée du St-Laurent, il est difficile de caractériser le climat passé car les observations météorologiques sont éparses dans le temps et dans l'espace, et disponibles sur des périodes trop courtes. Le projet CROQ (Climat reconstruit à Ouranos pour le Québec) a été développé pour produire une base de données historiques de différentes variables météorologiques, dont la neige au sol, sur l'ensemble de la province, à partir des simulations du modèle régional canadien du climat (MRCC5) utilisé à Ouranos pour produire des simulations climatiques régionales.

OBJECTIFS

- Évaluer la capacité du MRCC5 à reproduire la neige au sol pour les simulations historiques produites dans le cadre du projet CROQ à une résolution spatiale de 15 km sur le Québec.
- Évaluer un ensemble de données historiques de neige afin de mieux cerner l'incertitude sur les observations.
- Fournir une étude détaillée et utile aux usagers.

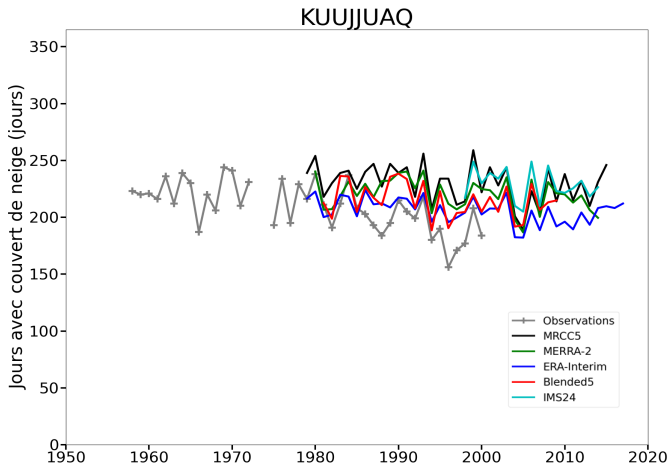
DÉMARCHE

- Compilation de données historiques disponibles;
- Évaluation de la distribution spatiale de la neige au sol du MRCC5 pour l'ensemble de la province par comparaison avec les observations;
- Évaluation du cycle annuel de la neige au sol sur trois régions d'intérêt au Québec;
- Évaluation de la saisonnalité de la neige au sol;
- Évaluation de la variation interannuelle à l'aide d'une comparaison aux observations pour chaque année de l'étude (1980-2014) en six points représentant la variété de topographie et climatologie pouvant se retrouver dans cette région.

RÉSULTATS

La compilation de différentes bases de données historiques disponibles fait ressortir une disparité dans la répartition spatiale de la neige au sol au Québec, en particulier dans le secteur nord. Ceci démontre la difficulté de dresser un portrait fiable de la neige, sans compter les nombreuses données manquantes. Dans cette étude, nous évaluons la neige au sol simulée par le MRCC5 à une résolution de 15 km sur un domaine couvrant le Québec. La répartition spatiale simulée est comprise dans l'enveloppe des possibilités proposées par l'ensemble d'observations considéré. De plus, dans les zones où l'on trouve un meilleur consensus entre les diverses observations, le MRCC5 produit une bonne estimation tant pour la durée de la saison de neige que pour les maximas annuels de neige au sol.

En comparant aux données de six stations d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) réparties sur l'est du Canada (Montréal, Kuujjjuaq, Kuujjuarapik, St John's, Wabush Lake et Geraldton), on trouve que le MRCC5 a une bonne cohérence temporelle avec les séries annuelles observées du maximum de neige au sol (en équivalent en eau) avec toutefois une légère surestimation. Quant au nombre de jours par année avec de la neige au sol, le MRCC5 reproduit généralement bien la série annuelle observée à chacune des six stations bien qu'une légère surestimation soit constatée.



Cette Figure présente le nombre de jours avec un couvert de neige à Kuujjuaq pour les observations de surface d'ECCC (gris), simulé par le MRCC5 (noir) et dans les bases de données MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (un mélange de 5 bases de données; rouge) et IMS-24 (cyan). La période commune de disponibilité commune des données est 1998 – 2010.

Le modèle MRCC5 a une variabilité interannuelle similaire aux autres bases de données et sa dispersion est contenue dans l'enveloppe des autres bases de données.

Ces résultats, validés avec les données disponibles, peuvent ainsi servir de base de données pour la neige au sol avec une résolution fine et une couverture homogène sur l'ensemble du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements **3**
Résumé ..... **i**
Table des matières ..... **i**
Liste des figures ..... **iii**
Liste des tableaux ..... **v**
Liste des abréviations, sigles et acronymes ..... **vi**
1. Introduction **7**
2. Contexte et objectifs **9**
2.1 Contexte 9
2.2 Objectif 9
3. Méthodologie **10**
3.1 Données 10
3.1.1 Simulation 10
3.1.2 Bases de données pour comparaison 10
3.1.2.1 MERRA-2 10
3.1.2.2 IMS-24 11
3.1.2.3 ERA-Interim 12
3.1.2.4 Blended-5 12
3.1.2.5 CMC 12
3.1.2.6 ECCC 13
3.2 Métriques considérées 13
3.3 Domaines d'étude 14
3.3.1 Régions d'intérêt 14
3.3.2 Villes étudiées 15
4. Résultats **16**
4.1 Distribution spatiale 16
4.1.1 Jours de couvert de neige 16
4.1.2 Maximum annuel moyen d'équivalent en eau de la neige 18
4.2 Cycle annuel et saisonnalité 20
4.3 Variabilité interannuelle 24
5. Conclusion et discussion **27**
Références **28**

Annexe I. Comparaison des différentes bases de données aux observations ECCC ... 31
Annexe II. Cohérence des variables de neige dans le MRCC5 ... 34
Annexe III. Variabilité interne et pilotage spectral ... 37

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Topographie sur le domaine QC11 du MRCC5. Régions Sud (bleu), Centre (magenta) et Nord (cyan). Les stations de surface ECCC d'intérêt sont signalées par les losanges noirs. 14
Figure 2 – Nombre de jours de couvert de neige (JCN) pour MRCC5 (a), IMS-24 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et MERRA-2 (e) durant la période 1998-2010. 17
Figure 3 – Différence de nombre de jours de couvert de neige entre pour MRCC5 et IMS-24 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et MERRA-2 (d). 18
Figure 4 – Maximum annuel d'équivalent en eau de la neige (mm) moyenné pour la période 1998-2010 pour MRCC5 (a), MERRA-2 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et CMC (e). 19
Figure 5 – Différence du maximum annuel d'équivalent en eau de la neige moyenné pour la période 1998-2010 entre MRCC5 et MERRA-2 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et CMC (d). 20
Figure 6 – Cycle annuel moyen du EEN maximum mensuel pour les sous-domaines : Nord (a), Centre (b) et Sudd (c) pour MRCC5 (noir), MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (rouge) et CMC (jaune) durant la période 1998-2010. 21
Figure 7 – Différence du nombre de jours de couvert de neige entre le 1er août et le 31 janvier (JCN_d) de l'année suivante, entre MRCC5 et MERRA-2 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et IMS-24 (d), moyenne pour la période 1998-2010. 22
Figure 8 – Différence du nombre de jours de couvert de neige entre le 1er février et le 31 juillet (JCN_f), entre MRCC5 et MERRA-2 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et IMS-24 (d), moyenne pour la période 1999-2011. 23
Figure 9 – Série temporelle de JCN annuels (jours) pour la période 1998-2010 pour les stations de Geraldton (a), Montréal (b), Kuujjuaq (c), Kuujjuarapik (d), Wabush Lake (e) et St. John's (f). Les bases de données considérées sont : MRCC5 (noir), MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (rouge), IMS-24 (cyan), et les observations d'ECCC (gris). 25
Figure 10 – Série temporelle de EEN maximum annuels (mm) pour la période 1998-2010 pour les stations Geraldton (a), Montréal (b), Kuujjuaq (c), Kuujjuarapik (d), Wabush Lake (e) et St. John's (f)). Les bases de données considérées sont : MRCC5 (noir), MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (rouge), CMC (jaune), et les observations d'ECCC (gris). 26
Figure 11 – Diagramme de dispersion des jours de couvert de neige (jours) pour MRCC5 (a), MERRA-2 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et IMS-24 (e) en fonction des observations d'ECCC. 32
Figure 12 – Diagramme de dispersion de l'EEN maximal annuel (mm) pour MRCC5 (a), MERRA-2 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et CMC (e) en fonction des observations d'ECCC. 33
Figure 13 – Cartes du nombre d'évènements constants pour *snw* sur des tuiles de mer (a) et du nombre d'évènements constants sur les tuiles de terre (b). Carte du nombre d'évènements occasionnels pour *snw* (c) et pour *snd* (d). La figure (e) présente l'évolution temporelle de *snw, snd* et *snc* lors de l'évènement occasionnel avec les plus grandes valeurs de *snw* et *snd*. Le moment de l'évènement est indiqué par un « x » rouge 36

Figure 14 – Différence des JCN annuels moyennés entre 1998 et 2010 pour un EEN > 4 mm pour les différentes simulations MRCC5 : bbs-bbr (variabilité interne), bbt-bbr (pilotage spectral) et bbq-bbt (variabilité interne avec pilotage spectral) 38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Description de la simulation utilisée dans les travaux 10
Tableau 2 – Description des bases de données utilisées dans les travaux 11
Tableau 3 – Liste des variables liées à la neige dans le MRCC5.....34
Tableau 4 – Description des quatre simulations CROQ.....37

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CEPMMT	Centre Européen de Prévision Météorologiques à Moyen Terme
CMC	Centre Météorologique Canadien
CROQ	Climat Reconstruit à Ouranos pour le Québec
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
EEN	Équivalent en Eau de la Neige
GEOS	Goddard Earth Observation System
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
IFS	Integrated Forecasting System
IMS	Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System
JCN	Jours de Couvert de Neige
MERRA	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
MRCC5	Modèle Régional Canadien de Climat, version 5
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Services
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SD	Snow Depth (épaisseur de neige)
SNODAS	SNOw Date Assimilation System

1.INTRODUCTION

Au Québec, le réseau d'observations météorologiques est réparti de manière éparse sur le territoire et propose une quantité limitée de données météorologiques disponibles sur des périodes variables, et souvent courtes, selon les stations. Cette couverture incomplète tant spatialement que temporellement rend difficile l'estimation d'un portrait précis du climat québécois. Ceci est encore plus marqué dans les territoires nordiques et pour les variables autres que la température. Il est pourtant nécessaire de posséder un climat historique bien établi et de connaître au mieux le milieu actuel et ses vulnérabilités pour pouvoir évaluer les impacts des changements climatiques, particulièrement pour les variables hydrologiques.

La demande d'un accès à une base de données de qualité pour le développement de modèles d'impacts sur le Québec se faisant plus pressante, le projet CROQ a été mis en place et a fait partie de la programmation d'Ouranos 2015—2020, appuyé par plusieurs partenaires dont Hydro-Québec. La 5^{e} version du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5) est utilisée pour ce projet (Martynov et al., 2013; Šeparović et al., 2013) et permet de produire une climatologie complète du territoire du Québec pour les dernières décennies. L'analyse et la validation des différentes données météorologiques sont indispensables pour utiliser cette climatologie comme une approximation valable du climat passé. Ces étapes sont nécessaires pour que les résultats des simulations soient considérés comme des quasi-observations représentant le climat passé du Québec.

Dans cette sous-partie du projet, l'intérêt se porte sur la neige au sol. Cette variable a des conséquences importantes sur les activités humaines : perturbations sur les réseaux électriques et routiers, impact sur la foresterie en sont des exemples typiques (Dore, 2003). De nombreux domaines peuvent être affectés par le couvert de neige. Par exemple : les infrastructures, les transports, les villes, l'électricité (Clavet-Gaumont et al., 2017; Rousseau et al., 2014), le tourisme (Bleau et al., 2014), la foresterie (Duchesne et al., 2012; Rossi et al., 2011) ou encore l'agriculture (Bélanger et al., 2002).
Des études sur le climat passé et futur ont montré que la couverture de neige a diminué au Canada en particulier au printemps et à l'automne et les projections vont dans le même sens; une diminution du maximum d'équivalent en eau de la neige (Brown, 2000; Brown et al., 2003, 2011; Canada, 2018; Diaconescu et al., 2018; Mudryk et al., 2014, 2020; Pulliainen et al., 2020). De plus, il n'existe pas une base de de données meilleure que les autres tant pour l'équivalent en eau de la neige que pour le nombre de jours couvert de neige. Aussi une combinaison de différentes bases de données est à considérer pour les études de neige au sol (Mortimer et al., 2020; Mudryk et al., 2017, 2018). Dans cette étude, cinq bases de données seront utilisées pour l'évaluation.

L'étude de la neige au sol nous offre aussi l'opportunité de valider les précipitations liquides et la température de surface d'un point de vue différent. En effet sans précipitations, il ne pourra y avoir de neige au sol. Son étude servira donc aussi de validation supplémentaire des précipitations et de la température de surface dans CROQ.

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

2.1 CONTEXTE

Deux aspects importants de la couverture neigeuse sont sa distribution spatiale et sa variabilité interannuelle. Les moyens investis peuvent varier significativement en fonction de ces paramètres. On peut par exemple penser aux stations de ski devant produire plus ou moins de neige artificielle par le biais de canons à neige, au besoin en sel pour les routes et au nombre de sorties des déneigeuses commanditées par les municipalités, la gestion des sites de déchargement de la neige, les ressources hydroélectriques liées à la neige, la gestion des inondations … Bref, les projections des changements de comportement de la neige au sol sont un élément indispensable pour l'adaptation aux changements climatiques et pour ce faire, la climatologie de la région étudiée doit être connue. Ceci permet d'avoir un portrait du climat passé-récent mais aussi de valider des modèles de climat ou d'hydrologie.
Au Québec, plus particulièrement au nord de la province, le nombre de stations d'observations de surface est très faible et les stations se situent principalement sur les côtes, laissant de grandes étendues sans observations de surface. Il existe des produits satellitaires ainsi que des réanalyses ou des données sur grille interpolées pour la neige au sol (Brown et al., 2010a; Dee et al., 2011; Helfrich et al., 2007; Molod et al., 2015; Mudryk et al., 2015). Néanmoins ces données peuvent avoir des résolutions trop grossières pour certaines applications. On notera par exemple que les réanalyses du Centre européen de prévision météorologiques à moyen terme (CEPMMT) (Dee et al., 2011) sont produites à 80km ou le multiensemble Blended-5 (Mudryk et al., 2015) disponible à 1° de résolution. De plus, certains produits telles que les données sur grille interpolées peuvent être fortement biaisées lorsque la zone étudiée se trouve loin d'une station d'observation. À cela s'ajoute des séries temporelles pouvant être discontinues pour les données de surface, ne permettant pas de faire des analyses sur un nombre suffisant d'hiver pour une étude rigoureuse d'un point de vue climatique.

2.2 OBJECTIF

L'objectif de cette étude est de valider la base de données de CROQ pour la neige au sol.
La base de données de CROQ est obtenue à partir du MRCC5. Ce modèle a été validé pour différents aspects tels que les précipitations totales (Biner 2016) ou encore la pluie verglaçante (Bresson et al., 2017).
La densité maximale, l'extension, la synchronicité et les variations interannuelles de la neige au sol sur l'ensemble du Québec sont étudiées et comparées aux différentes bases de données existantes.
La variable *équivalent en eau de la neige* (EEN) est utilisée comme une estimation de la quantité de neige. Cette variable est plus simple à utiliser puisque, contrairement à l'épaisseur de neige, elle ne dépend pas du type de neige et donc de sa densité. L'intérêt se porte sur le maximum d'EEN annuel pour évaluer la base de données CROQ sur la quantité maximale annuelle de neige au sol.
L'indicateur du nombre de *jours de couvert de neige* (JCN) est considéré pour donner de l'information sur la durée du couvert de neige ainsi que son extension.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 DONNÉES

3.1.1 SIMULATION

La base de données CROQ est constituée de quatre simulations du MRCC5.
La simulation bbr est la simulation de référence (Tableau 1) et les autres simulations sont décrites dans l'Annexe III (Tableau 4), et ont été utilisées pour étudier la variabilité interne et l'effet du pilotage spectral sur la simulation de référence. Les résultats étant suffisamment similaires, seule la simulation bbr est présentée par la suite. Dans la suite du document bbr est nommée MRCC5.

Tableau 1 – Description de la simulation utilisée dans les travaux

Nom	Modèle	Grille	Pilotage spectral	Période	Commentaires
bbr	MRCC5 v3.3.3.1	QC@.11deg	Non	01/01/1979 – 31/12/2014	Simulation CROQ version alpha, 1979-2014

3.1.2 BASES DE DONNÉES POUR COMPARAISON

Plusieurs bases de données sont considérées dans la présente étude (Tableau 2). Une description plus détaillée est fournie dans la suite du document. La sélection de bases de données a été faite en fonction des données disponibles au moment de l'étude, en se basant sur des discussions avec Ross Brown et sur la littérature (Brown et al., 2018). ERA-Interim a aussi été utilisée pour comparer MRCC5 à son pilote et une comparaison des bases de données avec l'ensemble des observations valides de neige au sol d'ECCC est présentée en Annexe I.

3.1.2.1 MERRA-2

La réanalyse Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) est une réanalyse atmosphérique basée sur la dernière ère satellitaire produite par le Global Modelisation and Assimilation Office de la NASA (GMAO, 2015; Bosilovich et al., 2016; Molod et al., 2015). Elle est basée sur une mise à jour du modèle GEOS (Goddard Earth Observation System) et du schéma d'analyse. Les variables de neige sont diagnostiquées par le modèle physique de neige. Cette réanalyse contient des améliorations par rapport à la première version en particulier pour la cryosphère avec l'assimilation de nouveau types de données satellitaires.
Au sud du 42.5°N, les précipitations sont directement dérivées des observations. Au nord du 62.5°N, les précipitations sont issues du modèle MERRA-2. Entre les deux, les précipitations sont issues d'une combinaison des observations et des sorties du modèle.
Les données d'EEN journalier sont disponibles à partir de 1980.

3.1.2.2 IMS-24

La base de données Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) du Nationale Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS) de la NOAA fournit des cartes de JCN pour l'hémisphère nord entre février 1997 et aujourd'hui (USNIC, 2008; Helfrich et al., 2007). Le produit combine des données d'observations in-situ et de produits satellitaires. Les données sont disponibles à 24, 10 et 4 km. Nous avons sélectionné la version à 24 km. Cette base de données sera nommée IMS-24 par la suite.
Basé sur les analyses du jour précédent, l'image satellite dans le visible, les observations de surface d'épaisseur de neige, les données satellite en micro-ondes passives, d'autres produits tels que SNODAS et CMC et la climatologie. Le tout est analysé par un analyste, grâce à différents outils et à l'analyse de la température et des précipitations. Ce produit est construit sur une expérience de plusieurs dizaines d'années, qui assimile de nombreuses sources de données. Néanmoins, cette base de données est inhomogène du fait des données satellitaires plus fréquentes et à plus fine résolution au cours des années. De plus, une tendance à avoir des jours sans neige plus tard qu'il ne faudrait dans les régions avec des couverts nuageux importants a été mise de l'avant par (Brown et al., 2007).

Tableau 2 – Description des bases de données utilisées dans les travaux

Nom	Type de données	Résolution / nombre de station	Période	Variables / indices disponibles	Référence
MERRA-2	Réanalyse	0.5° lat – 0.6° lon	01/01/1980 – 31/12/2014	EEN journalière	Molod et al., 2015
IMS-24	Produit basé sur des données satellitaire, observations, analyses et climatologie	24 km	01/01/1998 – 31/12/2015	JCN	Helfrich et al., 2007
ERA-Interim	Réanalyse	≈ 80 km	01/01/1979 – 31/12/2017	EEN aux 6 h	Dee et al., 2011
Blended-5	Produit basé sur un multiensemble de bases de données	1° x 1°	01/01/1981 – 31/12/2010	EEN journalière	Mudryk et al., 2015
CMC	Analyse et reconstruction	24 km	01/08/1998 – 31/07/2015	EEN mensuelle	Ross D Brown et al., 2003
ECCC	Observations de surface manuelles ou automatiques	312 stations	Dépendant des stations	Épaisseur de neige journalière	

3.1.2.3 ERA-Interim

Le jeu de données ERA-Interim est une réanalyse globale produite par le Centre européen de prévision météorologiques à moyen terme (Dee et al., 2011). Cette réanalyse est basée sur la version Cy31r2 du modèle IFS du CEPMMT disponible en 2006. Le système comprend une assimilation aux 12 heures des observations de type 4D-Var (analyse variationnelle quadridimensionnelle). La résolution horizontale est d'environ 80 km (T255) et 60 niveaux verticaux sont répartis de la surface jusqu'à 0.1 hPa. Les données d'EEN sont disponibles entre le 1er janvier 1979 et le 31 août 2019 à une fréquence de 6 h.

Il y.a des problèmes connus avec ces données, ils sont dus à des lacunes dans la méthode d'analyse et dans le traitement des données. En particulier, les informations d'épaisseur de neige et d'EEN ne sont pas cohérentes dans le temps (Brown & Derksen, 2013). Une reconstruction basée sur les températures et les précipitations aurait pu être faite ici (Brown et al., 2018) mais l'objectif ici était de comparer MRCC5 avec son pilote.

3.1.2.4 Blended-5

Blended-5 est un produit obtenu à partir d'un multiensemble de cinq bases de données d'EEN journalière interpolées sur une grille commune de 1°x1° (Mudryk et al., 2015; 2016). Les bases de données sont : GlobSnow, ERA-Interim/Land, MERRA, Crocus et GLDAS-2. Les données d'EEN journalière sont disponibles de 1981 à 2010.

Les bases de données produites à partir de multiensembles donnent souvent de meilleurs résultats qu'une base de données unique. Ceci permet aussi d'avoir un indicateur d'incertitude et potentiellement une estimation plus robuste de la signification de la tendance.

Un multiensemble peut néanmoins perdre en performance si une des bases de données présente dans données aberrantes. L'interpolation des différentes bases de données peut conduire à des valeurs incorrectes sur certaines régions : par exemple sur les côtes, les valeurs de Blended-5 sont trop faibles.

3.1.2.5 CMC

Les données du Centre Météorologique Canadien (CMC) est le résultat d'une analyse objective de l'épaisseur de neige mesurée in-situ qui utilise comme première approximation le champ d'épaisseur de neige estimé par un simple modèle température – indice de neige. Les données disponibles sont les EEN mensuelles moyens sur l'hémisphère nord entre le 1er août 1998 et le 31 décembre 2019 (Brown et al., 2010b; Brown et al., 2003). La résolution horizontale est de 24 km x 24 km.

Cette base de données n'est pas homogène à cause de changements dans la résolution du modèle utilisé. Elle présente des anomalies spatiales, considère des données spatialement et temporelles inhomogènes et principalement obtenues sur des sites ouverts.

3.1.2.6 ECCC

Les données d'ECCC sont des hauteurs de neige quotidiennes mesurées au sol par des stations de surface. Ces données peuvent fournir de l'information sur le nombre de jours de couvert de neige. Les stations ECCC possèdent des couvertures temporelles et spatiales variables avec des grands manques, en particulier au nord du Québec.

Les observations peuvent être issues de deux types de mesures. Premièrement des mesures manuelles faites par un observateur à l'aide d'une règle sur plusieurs points au niveau de la station pour avoir une valeur moyenne mesurée de la hauteur de neige. Ces mesures suivent les mêmes protocoles depuis les années 1950. Deuxièmement les mesures automatiques faites par senseur soniques. Les capteurs automatiques mesurent systématiquement moins de neige que les observations humaines. Les stations automatiques peuvent aussi engendrer des données de mauvaise qualité en raison de la neige soufflée par le vent. Les stations sont placées dans des zones typiquement ouvertes et exposées (pour plus de simplicité pour la cueillette des données et l'entretien), ce qui ne représente pas tous les types de couverts.

3.2 MÉTRIQUES CONSIDÉRÉES

L'analyse des bases de données est faite pour la période commune de **1998-2010**. Cette période relativement courte permet tout de même d'avoir un aperçu de la capacité du MRCC5 à reproduire les cycles interannuels ainsi que l'intensité des EEN sur l'ensemble du Québec, c'est-à-dire être dans l'enveloppe de dispersion des autres bases de données considérées.

Comme les observations aux stations d'ECCC fournissent l'épaisseur de neige (SD) au lieu de l'EEN nous avons fait la conversion de SD en EEN en utilisant l'équation suivante:

$$EEN = SD * \rho_n \qquad (\textit{Équation 1})$$

Où ρ_n est la densité de la neige. Pour nos analyses nous avons suivi les conseils de Ross Brown (communication personnelle) et utilisé une valeur de ρ_n de 200 kg m^{-3} qui correspond à une densité de neige légèrement humide. En utilisant cette valeur de ρ_n on obtient qu'une épaisseur de neige de 1 cm donne une valeur d'EEN de 2 kg m^{-2}. Notons que les valeurs d'EEN peuvent également être exprimée en mm d'épaisseur d'eau en utilisant la densité de l'eau de 1000 kg m^{-3}. Des travaux ont été réalisés pour avoir la meilleure correspondance possible entre les stations et le facteur d'ajustement de l'EEN (Mekis & Vincent, 2011), néanmoins dans la présente étude pour des fins de simplification, le facteur a été choisi constant.

Pour résumer, nous faisons la correspondance suivante pour passer de SD à EEN dans le reste de nos analyses:

$$SD = 1 \text{ cm} \Leftrightarrow EEN = 2 \text{ mm} \qquad (\text{Équation 2})$$

À partir des données EEN nous calculons deux indicateurs qui seront analysés dans ce rapport. Le premier est le maximum annuel de EEN, calculé pour chaque période de 12 mois débutant le 1er août pour la simulation du Tableau 1 et les différentes bases de données du Tableau 2. Notons que pour les analyses CMC le maximum sera sous-évalué car les données d'EEN sont des moyennes mensuelles alors qu'elles sont quotidiennes pour les autres sources. Notons également que nous ne pouvons calculer cet indice pour IMS-24 car seule la variable JCN est disponible.

L'autre indicateur analysé est le nombre de JCN pour chaque période de 12 mois débutant le 1er août ainsi que le nombre de JCN pour le début et la fin de l'année nivale, soit du 1er août au 1er février et du 1er février au 31 juillet respectivement. Cet indicateur est calculé pour les simulations du Tableau 1 et les bases de données du Tableau 2 en posant qu'on a un JCN lorsque EEN ≥ 4 mm (Mudryk et al., 2017). Notons que pour IMS-24 cette étape n'est pas nécessaire car on a directement les JCN.

Les différents indices sont calculés pour les simulations et les bases de données sur leurs grilles horizontales d'origine. Les valeurs sont ensuite interpolées linéairement sur une grille commune, soit celle des simulations.

3.3 DOMAINES D'ÉTUDE

3.3.1 RÉGIONS D'INTÉRÊT

Trois régions ont été définies en raison de leur caractéristique distincte (Figure 1).

- Le domaine Sud inclut le Sud du Québec depuis Ottawa jusqu'au nord de la Gaspésie avec un climat continental humide (domaine bleu);
- Le domaine Centre englobe toute la largeur du Québec et l'ensemble de Terre-Neuve, avec un climat subarctique (domaine magenta);
- Le domaine Nord considère le domaine au nord de Centre, jusqu'à la limite Sud du Nunavut, avec un climat arctique (domaine cyan).

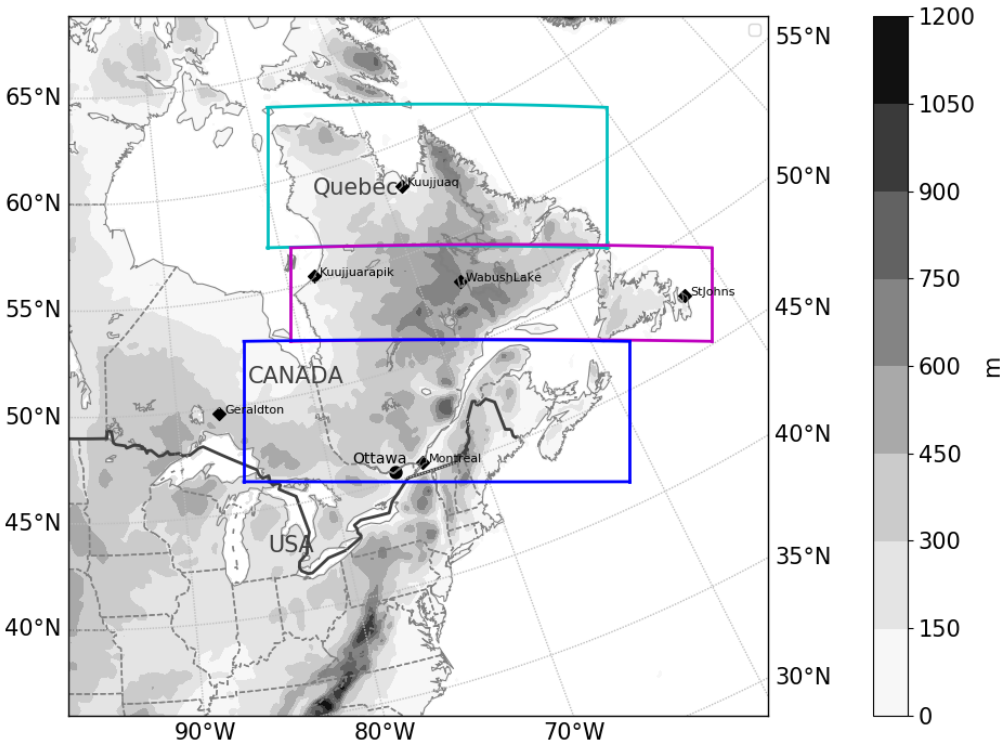


Figure 1 – Topographie sur le domaine QC11 du MRCC5. Régions Sud (bleu), Centre (magenta) et Nord (cyan). Les stations de surface ECCC d'intérêt sont signalées par les losanges noirs.

3.3.2 VILLES ÉTUDIÉES

Six villes sont étudiées et ont été sélectionnées pour représenter un ensemble de climat et de topographie.
En voici la liste :

- Geraldton, dans les terres, proche des Grands-Lacs;
- Montréal, située sur une île dans la vallée du St-Laurent;
- Kuujjuaq, sur la côte au Nord du Québec;
- Kuujjuarapik, sur la baie d'Hudson;
- Wabush Lake, dans les terres, au-dessus du 50°N et en altitude;
- St John's, ville la plus à l'Est et est en bord de mer.

4. RÉSULTATS

La simulation bbr du Tableau 1 et les bases de données du Tableau 2 sont comparées pour la période commune (**1998 – 2010**) avec des valeurs annuelles moyennes pour le nombre de JCN et maximales pour le EEN. Les bases de données ont été interpolées de leur grille native à la grille du MRCC5 à 0.11° sur le Québec. Seuls les points avec un pourcentage de terre supérieur à 85% sont considérés. Pour la base de données Blended-5, les points de côtes avec des valeurs trop basses n'ont pas été retirés.

4.1 DISTRIBUTION SPATIALE

4.1.1 JOURS DE COUVERT DE NEIGE

Un gradient Sud-Nord est notable pour l'ensemble des bases de données, avec des valeurs de JCN allant de 0 au Sud à 365 jours au Nord dans certains cas (Figure 2). Trois catégories sont identifiables, principalement vis-à-vis de leur comportement au nord du 50°N :

- MRCC5 et IMS-24, les JCN au nord du 50°N vont de 150 à 300, avec des valeurs de plus de 225 JCN à partir du 55°N;
- ERA-Interim présente de valeurs n'excédant pas 250 jours entre les 50 et 60°N, et des maximas supérieurs à 350 jours sur la côte Est de l'île de Baffin au Nunavut;
- Blended-5 et MERRA-2 ont entre 225 et 275 JCN selon un gradient sud-nord au nord du 55°N; les valeurs les plus importantes sont au-delà du 57°N.

En termes de différence entre la simulation MRCC5 et les bases de données (Figure 3), on observe :

- Des valeurs très similaires avec IMS-24, avec des différences un peu plus importantes autour de la région de Fort Albany sur la côte de la Baie James;
- Une surestimation principalement le long des côtes et dans le nord de MRCC5 par rapport à ERA-Interim, son pilote;
- Une surestimation sur le nord du Québec par rapport à Blended-5;
- Une surestimation sur l'ensemble du domaine (à l'exception du Nunavut) par rapport à MERRA-2.

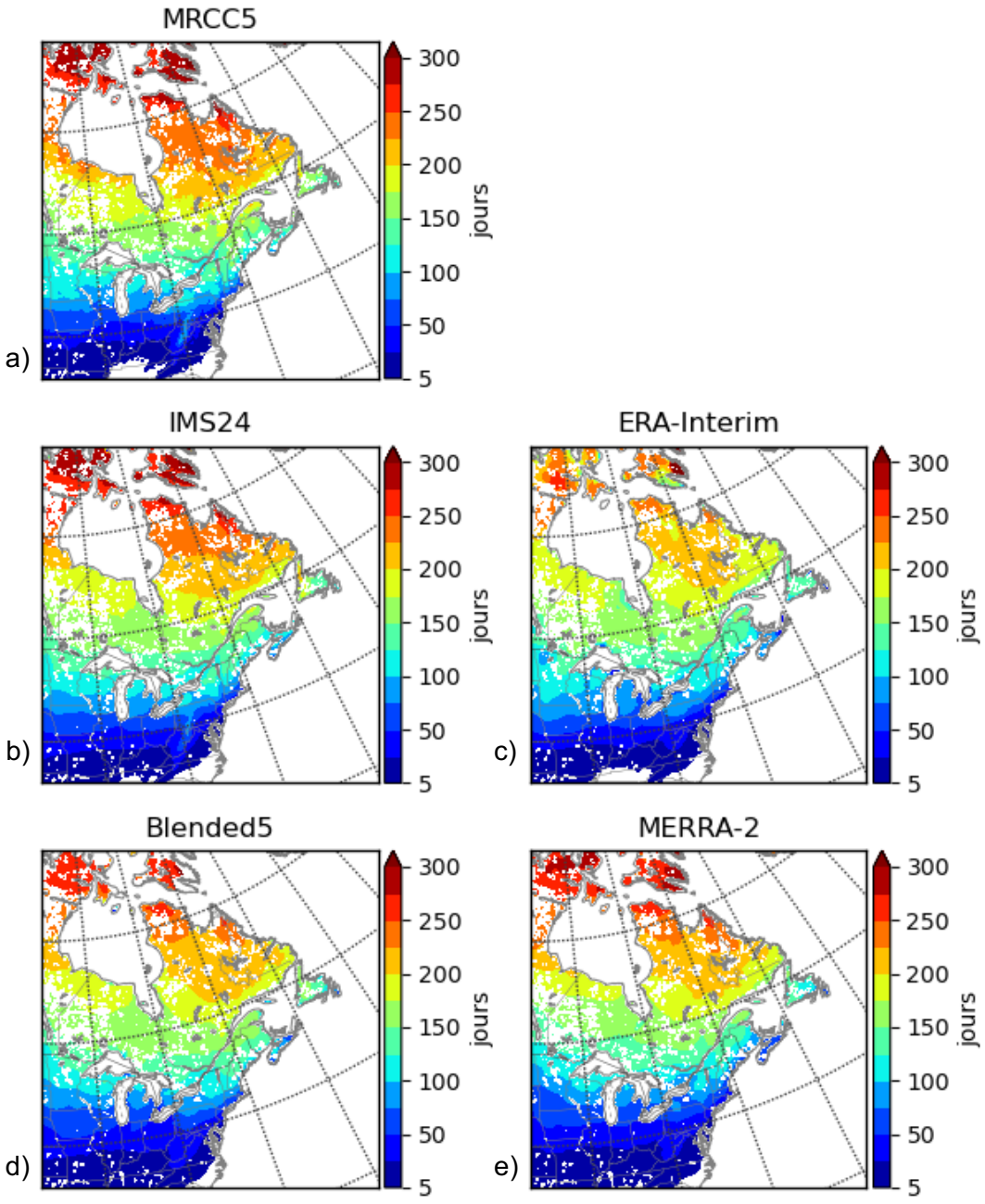


Figure 2 – Nombre de jours de couvert de neige (JCN) pour MRCC5 (a), IMS-24 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et MERRA-2 (e) durant la période 1998-2010.

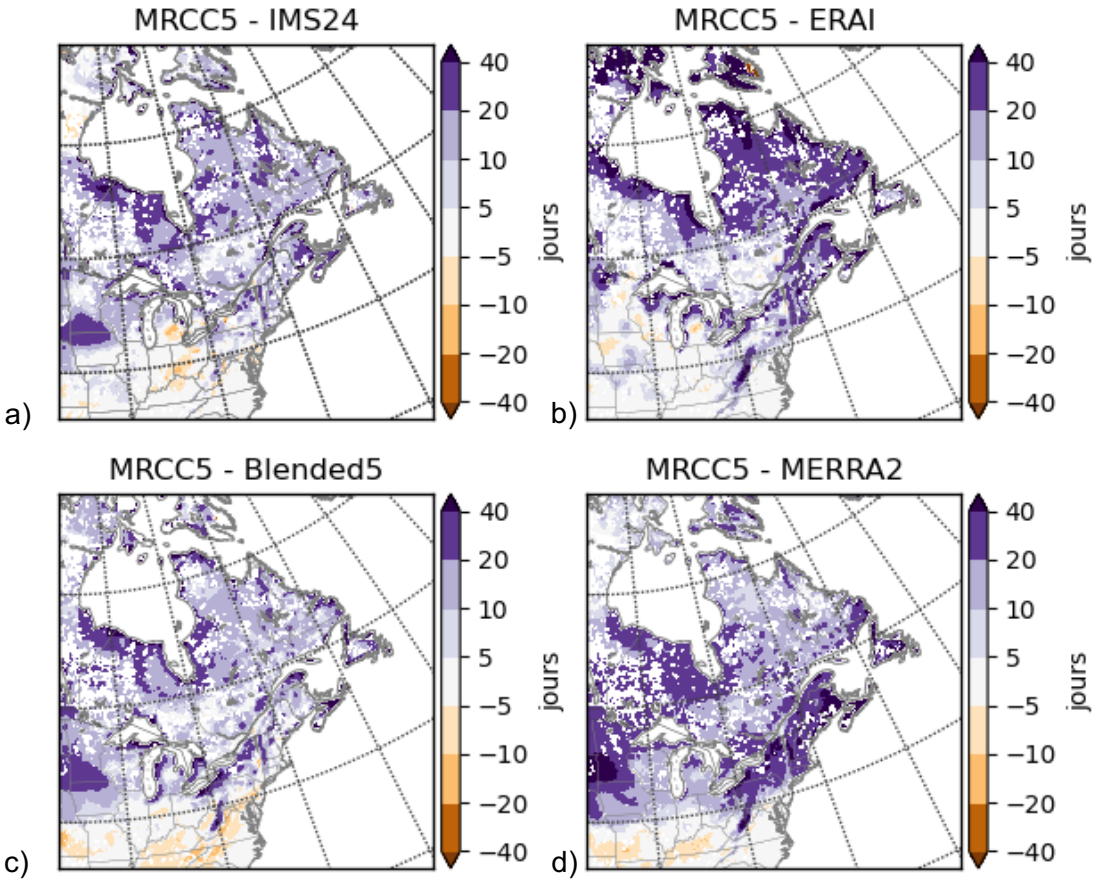


Figure 3 – Différence de nombre de jours de couvert de neige entre pour MRCC5 et IMS-24 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et MERRA-2 (d).

4.1.2 MAXIMUM ANNUEL MOYEN D'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE

Pour le maximum annuel moyen d'EEN, trois catégories sont aussi identifiables (Figure 4) :

- MRCC5 et MERRA-2 présentent des valeurs plus importantes d'EEN au Québec et au Labrador, notamment au niveau de la côte la plus au nord du Labrador avec des maximums d'EEN dépassant 500 mm; la différence entre les deux est au niveau des Adirondacks et de Terre-Neuve qui ont des EEN plus importants pour MRCC5 (> 400 mm) que pour MERRA-2 (< 250 mm);
- ERA-Interim a des EEN maximum de l'ordre de 300 mm et plus sur une grande partie de l'Est du Canada, les états du Minnesota, de l'Iowa et du Missouri, mais des valeurs de l'ordre de 200 mm pour le nord du Nunavik;
- Blended-5 et CMC présentent des valeurs inférieures à 200 mm pour le nord du Nunavik et les régions à l'ouest de la Baie James.

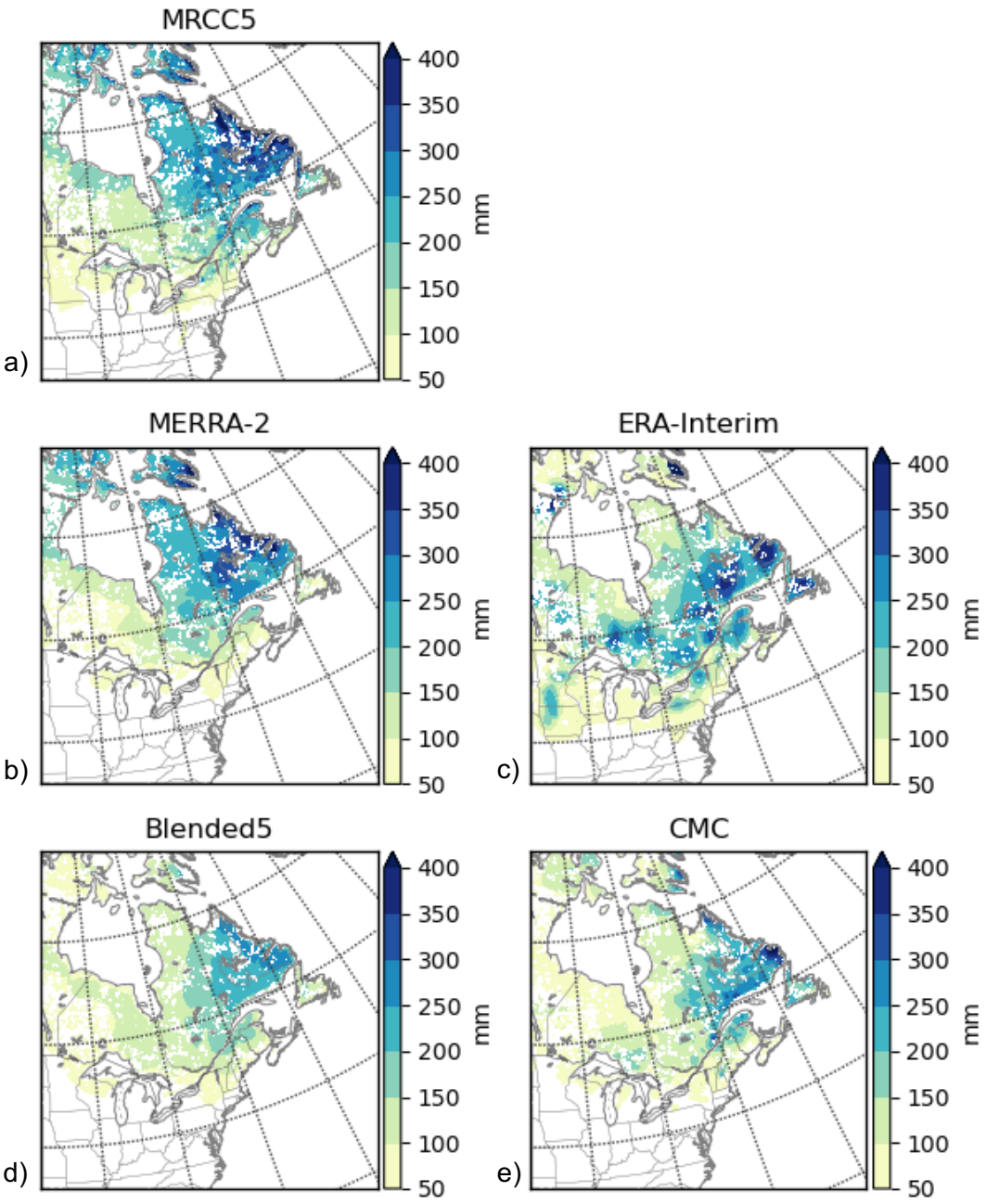


Figure 4 – Maximum annuel d'équivalent en eau de la neige (mm) moyenné pour la période 1998-2010 pour MRCC5 (a), MERRA-2 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et CMC (e).

La comparaison directe de MRCC5 avec les autres bases de données montre (Figure 5) :

- Une surestimation de l'ordre de 300 mm sur les Adirondacks et Terre-Neuve entre MRCC5 et MERRA-2, et des différences plus négligeables sur le reste du domaine; Cette surestimation est confirmée par le diagramme de dispersion de la Figure 11.
  Une sous-estimation et une surestimation respectivement au-dessous du 50°N et au-dessus du 55°N, vis-à-vis d'ERA-Interim;

- Une surestimation par rapport à Blended-5 sur une large partie du domaine;
- Une surestimation au Québec au nord du 50°N par rapport à CMC et sur la côte sud de la baie d'Hudson. On rappelle que CMC donne des valeurs mensuelles moyennes d'EEN ce qui peut conduire à une sous-estimation de l'EEN maximal annuel moyen.

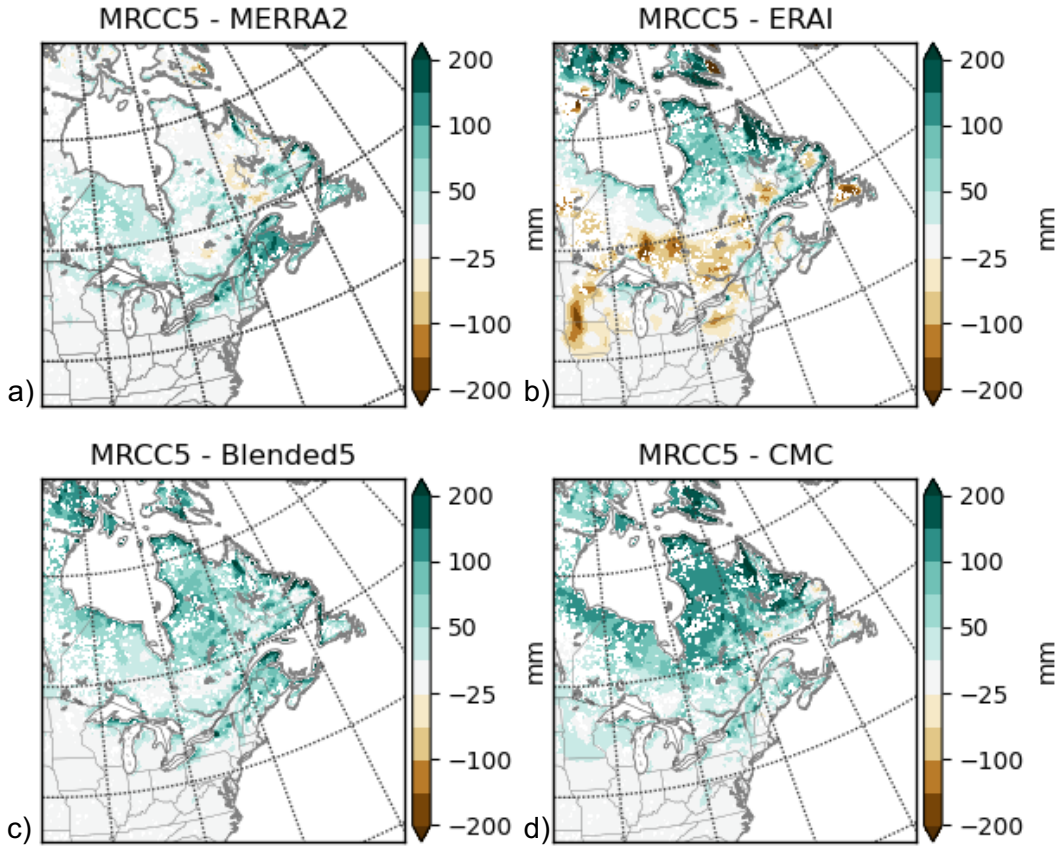


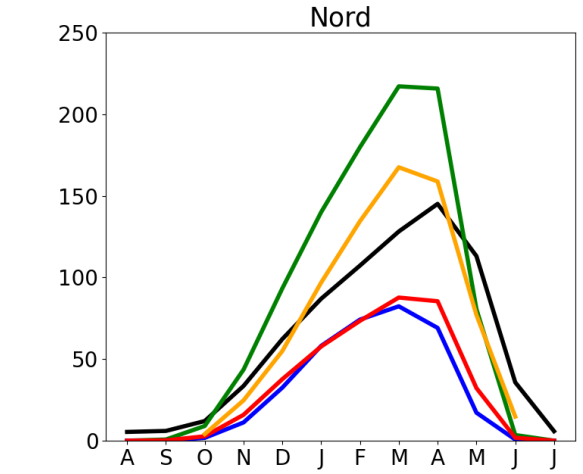
Figure 5 – Différence du maximum annuel d'équivalent en eau de la neige moyenné pour la période 1998-2010 entre MRCC5 et MERRA-2 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et CMC (d).

4.2 CYCLE ANNUEL ET SAISONNALITÉ

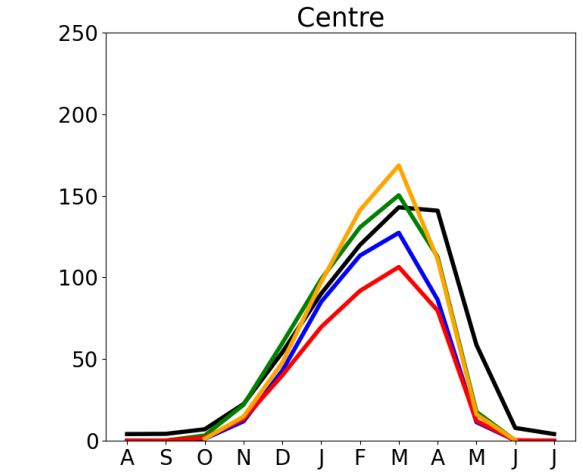
Le cycle annuel, calculé pour les trois zones présentées sur la Figure 1.

Les caractéristiques typiques du Québec sont reproduites avec des EEN plus importants en hiver (de décembre à avril principalement) et des pics entre février et avril (Figure 6).
Les pics sont décalés dans le temps en allant plus au Nord, passant de février/mars pour la zone Sud à mars/avril pour la zone Nord.

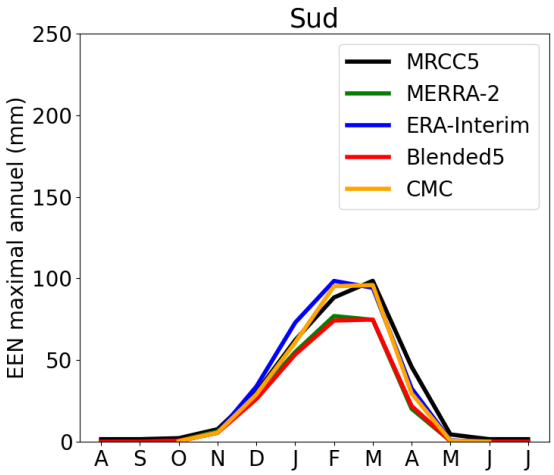
Les bases de données, à l'exception de MRCC5, ont une bonne synchronicité les unes par rapport aux autres, avec des pics au mêmes moments. Pour MRCC5, les maximums sont atteints environ un mois plus tard que les autres bases de données pour toutes les zones. Pour la zone



a)



b)



c)

Figure 6 – Cycle annuel moyen du EEN maximum mensuel pour les sous-domaines : Nord (a), Centre (b) et Sudd (c) pour MRCC5 (noir), MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (rouge) et CMC (jaune) durant la période 1998-2010.

du centre par exemple, au mois d'avril on retrouve pour MRCC5 des valeurs similaires au maximum du mois de mars (de l'ordre de 140 mm) alors que les autres bases de données voient leur maximum décroître à ce moment. La fonte de la neige est plus tardive dans MRCC5 que dans les autres bases de données dans le centre et le Nord du Québec. Il faut noter cependant qu'un décalage d'un mois peut correspondre à un décalage de quelques jours à près de deux mois, étant donné qu'il s'agit de maximums mensuels moyennés.

La dispersion entre les bases de données augmente avec la latitude (Figure 6). Par exemple, la plus grande différence entre les bases de données est de l'ordre de 25mm pour le domaine Sud, contre 150 mm pour le domaine Nord. L'EEN maximum moyen est aussi plus important dans le Nord que dans le Sud.

MRCC5, MERRA-2 et CMC ont des valeurs qui sont plus importantes avec la latitude, contrairement à ERA-Interim et Blended-5 qui gardent des amplitudes similaires sur les trois domaines, avec une diminution pour ERA-Interim au Nord. Ces résultats sont cohérents avec la Figure 4. CMC et MERRA-2 ont des amplitudes maximales similaires pour les domaines Centre et Sud, respectivement 170 mm et 150 mm environ. MRCC5 est dans l'enveloppe des autres bases de données en termes d'amplitude.

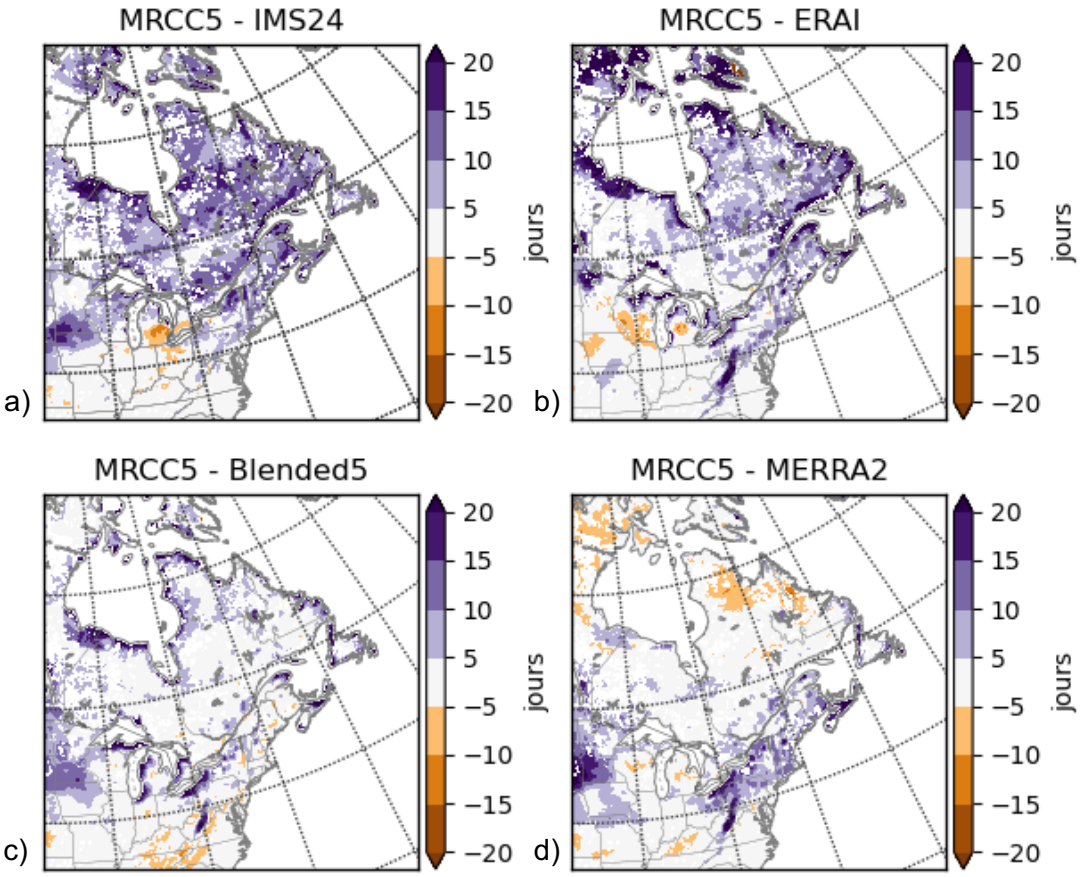


Figure 7 – Différence du nombre de jours de couvert de neige entre le 1er août et le 31 janvier (JCN_d) de l'année suivante, entre MRCC5 et MERRA-2 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et IMS-24 (d), moyenne pour la période 1998-2010.

Les Figure 7 et Figure 8 présentent les différences du nombre de JCN pour la première et la deuxième moitié de l'hiver entre MRCC5 et les autres données.

On note qu'un décalage temporel entre MRCC5 et les autres données est présent dans la première partie de l'hiver, c'est-à-dire du 1er août au 31 janvier de l'année suivante (Figure 7).

- MRCC5 a plus de JCN dans cette première partie de l'année que IMS-24 et ERA-Interim sur le Québec.
- MRCC5 a un nombre de JCN semblable à celui de Blaended-5, sauf sur les côtes, qui sont une région connue pour avoir des problèmes de masques terre/mer entre les différentes composantes de Blended-5.
- MRCC5 a un nombre de JCN inférieur à celui de MERRA2 dans le nord du Québec, similaire dans le centre et le sud, et légèrement supérieur dans le nord-est des USA.

Pour la seconde moitié de l'hiver (Figure 8), MRCC5 a toujours plus de jours de JCN que les autres bases de données. L'écart le moins important est avec IMS-24 et le plus important avec MERRA-2. MRCC5 présente donc une fin de saison du couvert de neige plus tardive que les autres bases de données.

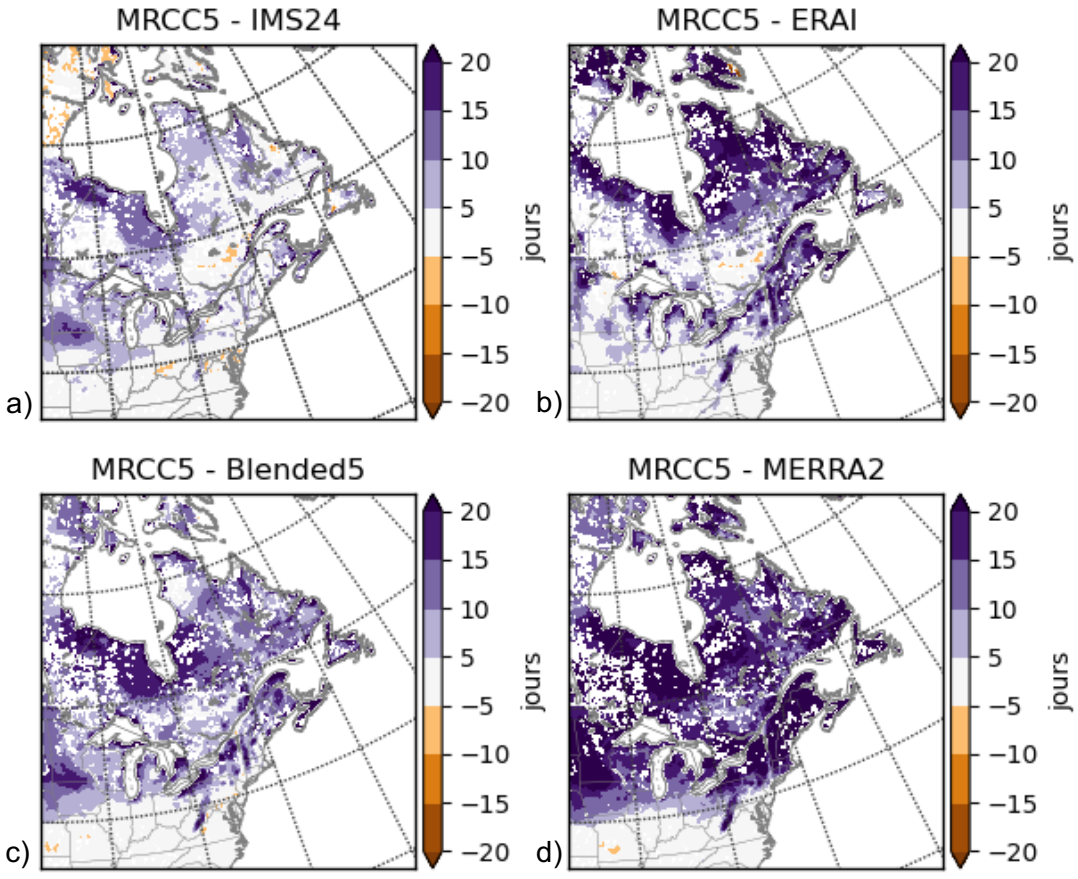


Figure 8 – Différence du nombre de jours de couvert de neige entre le 1er février et le 31 juillet (JCN_f), entre MRCC5 et MERRA-2 (a), ERA-Interim (b), Blended-5 (c) et IMS-24 (d), moyenne pour la période 1999-2011.

4.3 VARIABILITÉ INTERANNUELLE

Pour étudier la variabilité interannuelle, on regarde plus en détail six stations météorologiques réparties dans l'ensemble du domaine et avec des caractéristiques différentes. On peut évaluer la variabilité interannuelle des différentes bases de données et leur corrélation avec les observations quand elles sont disponibles (Figure 9 et Figure 10). Les figures présentées ci-après présentent les séries temporelles pour le point de grille de chaque source de donnée qui coïncide avec la station et qui possède une fraction de terre supérieure à 85%. Pour St John's, le point de référence a été choisi différemment car les valeurs d'EEN sur la côte sont masquées sur la grille originale de CMC. Pour prendre en considération les valeurs de CMC, nous avons sélectionné le point avec plus de 85 % de terre, non masqué dans la grille originale de CMC, le plus proche du point de grille contenant la station. Ce point est utilisé pour les autres bases de données pour la station de St John's et l'EEN.

De manière générale, MRCC5 donne plus de JCN que les autres bases de données à l'exception de la station de Montréal (Figure 9b). La plus grande dispersion est présente à St John's (Figure 9f). Étant le point le plus à l'Est et proche de la côte, les différences entre les bases de données peuvent être attribuables aux domaines et résolutions initiaux variées des bases de données et à l'interpolation sur la grille du MRCC5.

Pour l'EEN maximum annuel, les observations ECCC sont traitées avec un coefficient reprenant l'équation 2. Il est important de noter que ce coefficient a été considéré en fonction de la littérature tout en prenant en considération qu'il est variable sur l'ensemble du territoire et qu'il s'agit là d'une approximation (Mekis & Vincent, 2011).

La variabilité interannuelle pour l'EEN maximum est globalement bien représentée, à l'exception notable de ERA-Interim pour Kuujjuaq et Wabush Lake. La dispersion des différentes bases de données est plus importante pour Kuujjuarapik et reste dans une fourchette de 100 à 150 mm pour les autres bases de données et sites. Pour St John's, les données d'ECCC sont beaucoup plus importantes que celles des autres bases de données.

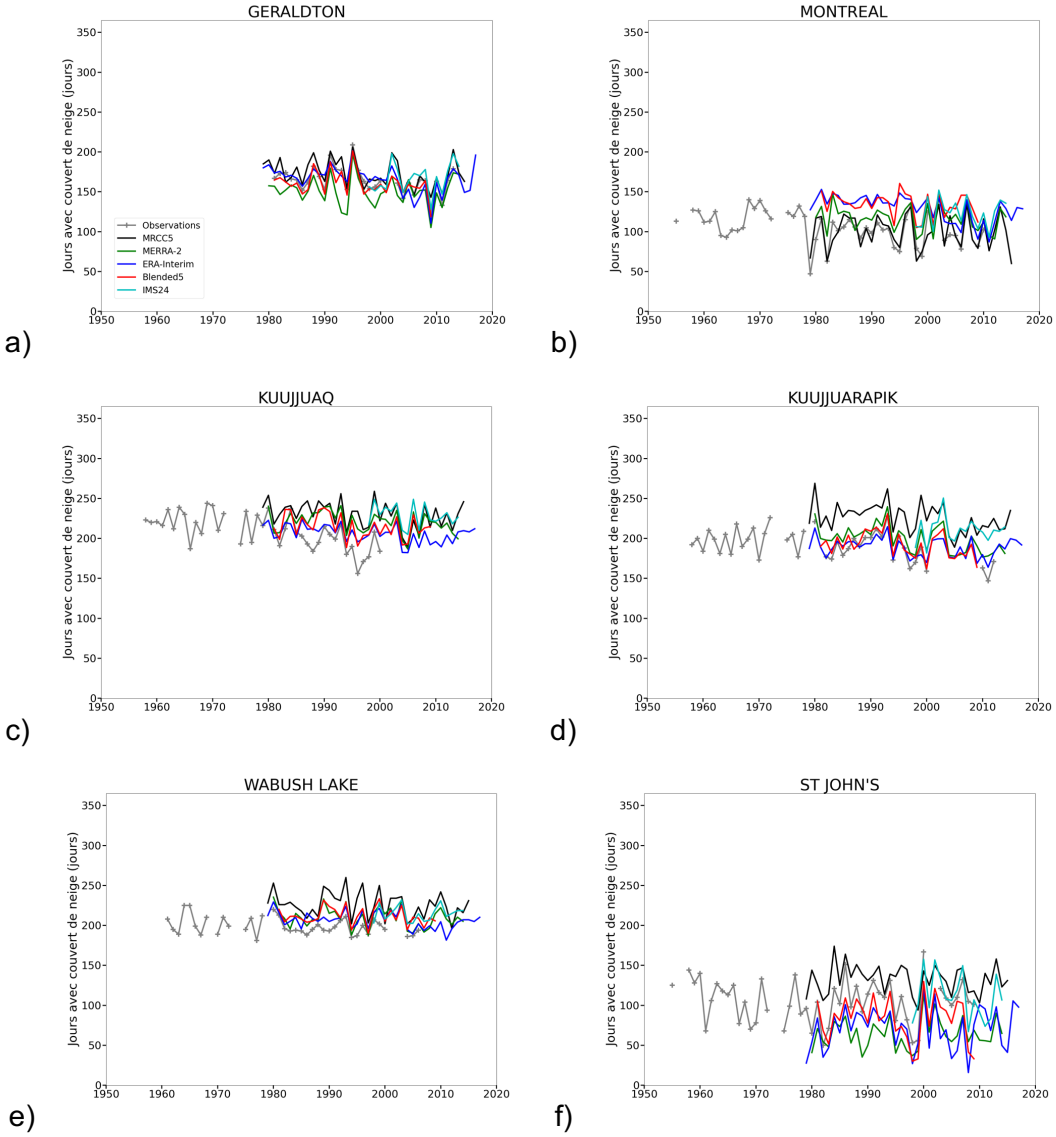


Figure 9 – Série temporelle de JCN annuels (jours) pour la période 1998-2010 pour les stations de Geraldton (a), Montréal (b), Kuujjuaq (c), Kuujjuarapik (d), Wabush Lake (e) et St. John's (f). Les bases de données considérées sont : MRCC5 (noir), MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (rouge), IMS-24 (cyan), et les observations d'ECCC (gris).

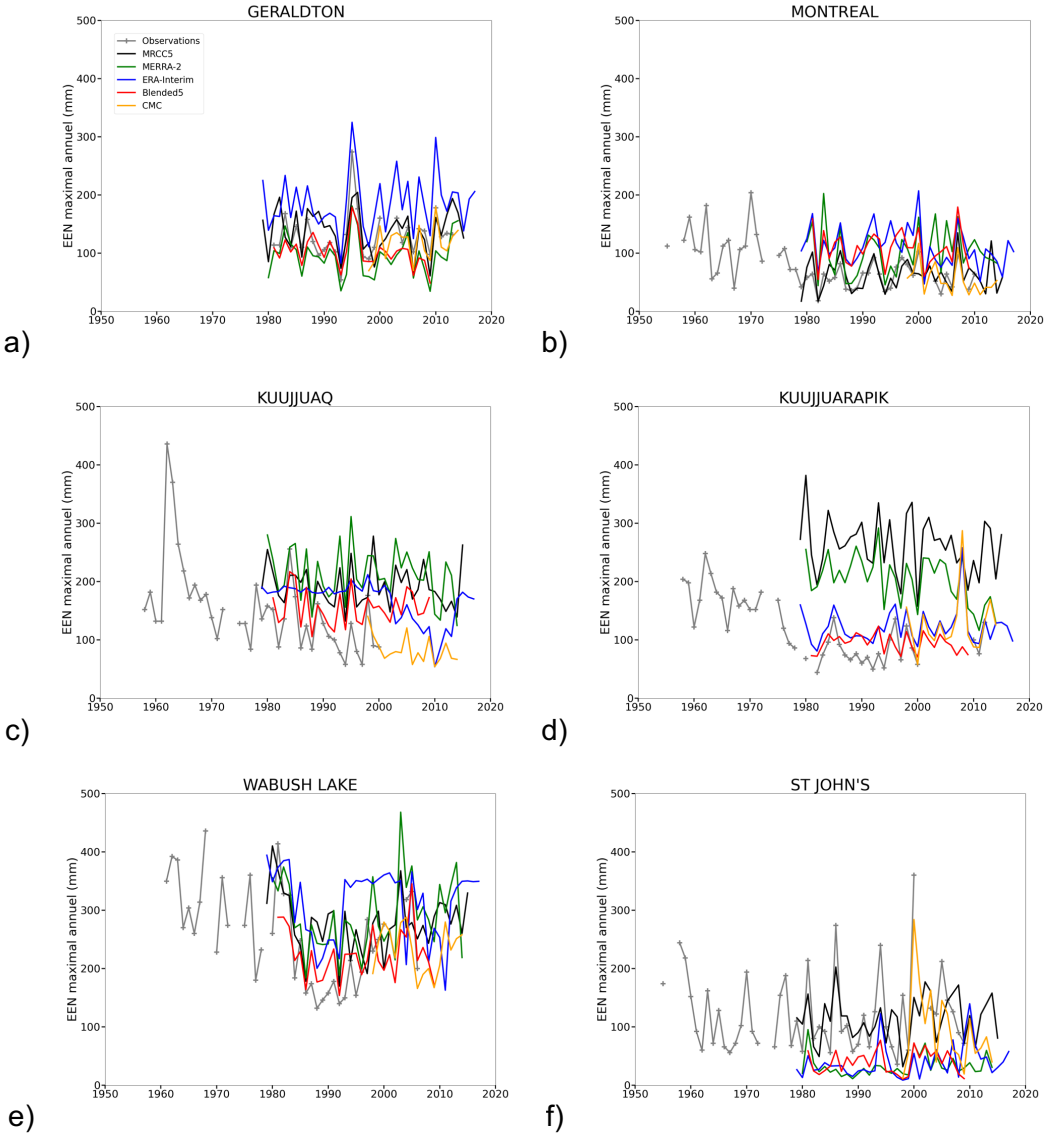


Figure 10 – Série temporelle de EEN maximum annuels (mm) pour la période 1998-2010 pour les stations Geraldton (a), Montréal (b), Kuujjuaq (c), Kuujjuarapik (d), Wabush Lake (e) et St. John's (f)). Les bases de données considérées sont : MRCC5 (noir), MERRA-2 (vert), ERA-Interim (bleu), Blended-5 (rouge), CMC (jaune), et les observations d'ECCC (gris).

5. CONCLUSION ET DISCUSSION

Dans l'ensemble, la base de données de CROQ reproduit bien le comportement de la neige au sol, en se basant sur les valeurs de ERA-Interim, CMC, Blended-5, MERRA-2 et IMS-24, ainsi que sur les observations aux stations d'ECCC. Le MRCC5 est plus proche de MERRA-2 pour les valeurs d'EEN et de IMS-24 pour le nombre de JCN, avec une tendance à être dans la fourchette haute pour le nombre de JCN en particulier.
Un décalage dans la saison est notable, avec des maximum d'EEN en moyenne plus tardif pour MRCC5 que pour les autres bases de données, et une saison du couvert de neige qui s'étend plus tard au printemps. Ceci pourrait être lié au schéma de surface utilisé dans le MRCC5 qui retarderait la fonte de la neige au sol pour des questions de seuils de température, comme beaucoup de schéma de surface qui ont des difficultés à faire dégeler le sol. Ces résultats sont cohérents avec des analyses passées qui montrent des biais froids pour la température de surface et humide pour la précipitation sur le Québec en hiver et au printemps (Biner 2016)

La comparaison des bases de données avec les observations de neige au sol d'ECCC montre une bonne cohérence (cf Annexe I) alors que les cartes de distribution spatiale des différentes variables de neige au sol présentent des différences notables, en particulier dans le nord. La majorité des stations de surface d'ECCC sont localisées dans le sud du Québec, ce qui montre bien l'importance d'utiliser d'autres bases de données pour les études dans ce domaine. Ceci est aussi une des raisons pour lesquelles les bases de données ont beaucoup de différences entre elles dans le nord du Québec.

La présence d'incohérences entre les variables de neige du MRCC5 a été confirmée pour un certain nombre de points de grille (cf Annexe II). La variabilité interne et l'effet du pilotage spectral sur la neige au sol dans le MRCC5 ont aussi été étudié et ne présentent pas de différences notables (cf Annexe III).

RÉFÉRENCES

Bélanger, G., Rochette, P., Castonguay, Y., Bootsma, A., Mongrain, D., & Ryan, D. A. J. (2002). Climate change and winter survival of perennial forage crops in eastern Canada. *Agronomy Journal*, *94*(5), 1120–1130.

Bleau, S., Blangy, S., & Archambault, M. (2014). Adapting Nature-Based Seasonal Activities in Quebec (Canada) to Climate Change BT - Handbook of Climate Change Adaptation. In W. Leal Filho (Ed.), *Handbook of Climate Change Adaptation* (pp. 1–24). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40455-9_44-2

Bosilovich, M. G., Lucchesi, R., & Suarez, M. (2016). *MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1)*. https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Bosilovich785.pdf

Bresson, É., Laprise, R., Paquin, D., Thériault, J. M., & de Elía, R. (2017). Evaluating the Ability of CRCM5 to Simulate Mixed Precipitation. *Atmosphere - Ocean*. https://doi.org/10.1080/07055900.2017.1310084

Brown, R. D. (2000). Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915-97. *Journal of Climate*. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2339:NHSCVA>2.0.CO;2

Brown, R. D., Brasnett, B., & Robinson, D. (2003). Gridded North American Monthly Snow Depth and Snow Water Equivalent for GCM Evaluation. In *ATMOSPHERE-OCEAN* (Vol. 41, Issue 1). http://www.ccin.ca

Brown, R. D., & Derksen, C. (2013). Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environmental Research Letters*, *8*(2), 24006.

Brown, R. D., Derksen, C., & Wang, L. (2007). Assessment of spring snow cover duration variability over northern Canada from satellite datasets. *Remote Sensing of Environment*, *111*(2–3), 367–381.

Brown, R. D., Derksen, C., & Wang, L. (2010a). A multi-data set analysis of variability and change in Arctic spring snow cover extent, 1967-2008. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. https://doi.org/10.1029/2010JD013975

Brown, R. D. and B. Brasnett. (2010b, updated annually). Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1. [Monthly means of estimated snow water equivalent]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3. [January 2016].

Brown, R. D., Groisman, P. Y., Labba, N., Radionov, V., Barry, R. G., Blangy, S., Bradley, R. S., Bulygina, N., Christensen, B. R., Colman, O., Essery, R. L. H., Forbes, B. C., Forch Ihammer, M. C., Froloy, D. M., Golubev, V. N., Grenpell, T. C., Honrath, R. E., Juday, G. P., Ae Melloh, R., … Yang, D. (2011). *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) - 4 Changing Snow Cover and its impacts*.

Brown, R. D., Tapsoba, D., & Derksen, C. (2018). Evaluation of snow water equivalent datasets over the Saint-Maurice river basin region of southern Québec. *Hydrological Processes*, *32*(17), 2748–2764.

Canada, E. et C. climatique. (2018). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement Couverture de neige*. https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/snow-cover/snow-cover-fr.pdf

Clavet-Gaumont, J., Huard, D., Frigon, A., Koenig, K., Slota, P., Rousseau, A., Klein, I., Thiémonge, N., Houdré, F., Perdikaris, J., Turcotte, R., Lafleur, J., & Larouche, B. (2017). Probable maximum flood in a changing climate: An overview for Canadian basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *13*(July), 11–25. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.07.003

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L.,

Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., … Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. https://doi.org/10.1002/qj.828

Diaconescu, E. P., Mailhot, A., Brown, R. D., & Chaumont, D. (2018). Evaluation of CORDEX-Arctic daily precipitation and temperature-based climate indices over Canadian Arctic land areas. *Climate Dynamics*. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3736-4

Dore, M. H. I. (2003). Forecasting the conditional probabilities of natural disasters in Canada as a guide for disaster preparedness. *Natural Hazards*. https://doi.org/10.1023/A:1022978024522

Duchesne, L., Houle, D., & D'Orangeville, L. (2012). Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Québec, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, *162*, 108–114.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). MERRA-2 tavg1_2d_lnd_Nx: 2d,1-Hourly,Time-Averaged,Single-Level,Assimilation,Land Surface Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [January 2016], 10.5067/RKPHT8KC1Y1T

Helfrich, S. R., McNamara, D., Ramsay, B. H., Baldwin, T., & Kasheta, T. (2007). Enhancements to, and forthcoming developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS). *Hydrological Processes*. https://doi.org/10.1002/hyp.6720

Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Šeparović, L., & Dugas, B. (2013). Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: Model performance evaluation. *Climate Dynamics*. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1778-9

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

Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., & Bacmeister, J. (2015). Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*. https://doi.org/10.5194/gmd-8-1339-2015

Mortimer, C., Mudryk, L. R., Derksen, C., Luojus, 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., Derksen, C., Howell, S., Laliberté, F., Thackeray, C. W., Sospedra-Alfonso, R., Vionnet, V., Kushner, P. J., & Brown, R. D. (2018). Canadian snow and sea ice: historical trends and projections. *The Cryosphere*, *12*(4), 1157–1176.

Mudryk, L. R., Derksen, C., Kushner, P. J., & Brown, R. D. (2015). Characterization of Northern Hemisphere snow water equivalent datasets, 1981-2010. *Journal of Climate*. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0229.1

Mudryk, L. R. and C. Derksen. (2016). CanSISE Observation-Based Ensemble of Northern Hemisphere Terrestrial Snow Water Equivalent, Version 1. [SWE]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0229.1. [January 2016].

Mudryk, L. R., Kushner, P. J., & Derksen, C. (2014). Interpreting observed Northern Hemisphere snow trends with large ensembles of climate simulations. *Climate Dynamics*, *43*(1), 345–359.

Mudryk, L. R., Kushner, P. J., Derksen, C., & Thackeray, C. (2017). Snow cover response to temperature in observational and climate model ensembles. *Geophysical Research Letters*, *44*(2), 919–926.

Mudryk, L. R., Santolaria-Otín, M., Krinner, G., Ménégoz, M., Derksen, C., Brutel-Vuilmet, C., Brady, M., & Essery, R. (2020). Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble. *The Cryosphere*, *14*(7), 2495–2514.

Pulliainen, J., Luojus, K., Derksen, C., Mudryk, L. R., Lemmetyinen, J., Salminen, M., Ikonen, J., Takala, M., Cohen, J., & Smolander, T. (2020). Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, *581*(7808), 294–298.

Reichle, R. H., Draper, C. S., Liu, Q., Girotto, M., Mahanama, S. P. P., Koster, R. D., & De Lannoy, G. J. M. (2017). Assessment of MERRA-2 Land Surface Hydrology Estimates. *Journal of Climate*, *30*(8), 2937–2960. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0720.1

Rossi, S., Morin, H., & Deslauriers, A. (2011). Multi-scale influence of snowmelt on xylogenesis of black spruce. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *43*(3), 457–464.

Rousseau, A. N., Klein, I. M., Freudiger, D., Gagnon, P., Frigon, A., & Ratté-Fortin, C. (2014). Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of Hydrology*, *519*, 3094–3109.

Šeparović, L., Alexandru, A., Laprise, R., Martynov, A., Sushama, L., Winger, K., Tete, K., & Valin, M. (2013). Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model. *Climate Dynamics*. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1737-5

U.S. National Ice Center (2008, updated daily). IMS Daily Northern Hemisphere Snow and Ice Analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions, Version 1. [24 km]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: https://doi.org/10.7265/N52R3PMC. [January 2016].

ANNEXE I. COMPARAISON DES DIFFÉRENTES BASES DE DONNÉES AUX OBSERVATIONS ECCC

Pour chaque année de la période 1998 – 2010, le nombre de JCN des stations ECCC avec des données valides est comparé à la valeur de JCN de cette année au point de grille contenant la station ECCC et ce pour chaque base de données (Figure 11).

- MRCC5 et MERRA-2 présentent une bonne corrélation avec les observations. MRCC5 présente une surestimation, tandis que MERRA-2 une sous-estimation.
- ERA-Interim, Blended-5 et IMS-24 présentent une plus grande dispersion du nombre de JCN par rapport aux observations.
- Pour certaines valeurs observées inférieures à 50 jours, toutes les bases de données présentent des valeurs très supérieures. Les valeurs observées de plus de 200 jours sont généralement surestimées dans les bases de données.

Les comparaisons entre bases de données avaient montré des résultats similaires pour le nombre de JCN moyen sur la période 1998-2010 pour le MRCC5 et IMS-24. Étant donnés les résultats des comparaisons entre bases de données et observations d'ECCC et la moyenne annuelle de JCN pour les différentes bases de données (Figure 2), on constate bien que la majorité des observations sont disponibles dans la zone la moins problématique, c'est-à-dire le sud du Québec et qu'elles ne sont donc pas suffisantes pour évaluer les différentes bases de données.

Les valeurs d'EEN maximales présentent beaucoup de dispersion entre les bases de données et les observations de surface d'ECCC (Figure 12). Le fait qu'on travaille avec des maximum et une densité constante quelle que soit la station de surface ECCC considérée peut expliquer cette dispersion. CMC a la meilleure corrélation avec les observations, mais une tendance à la sous-estimation et plus de difficultés pour estimer les valeurs importantes observées. Ceci est cohérent avec le fait que les données de CMC sont des moyennes mensuelles.

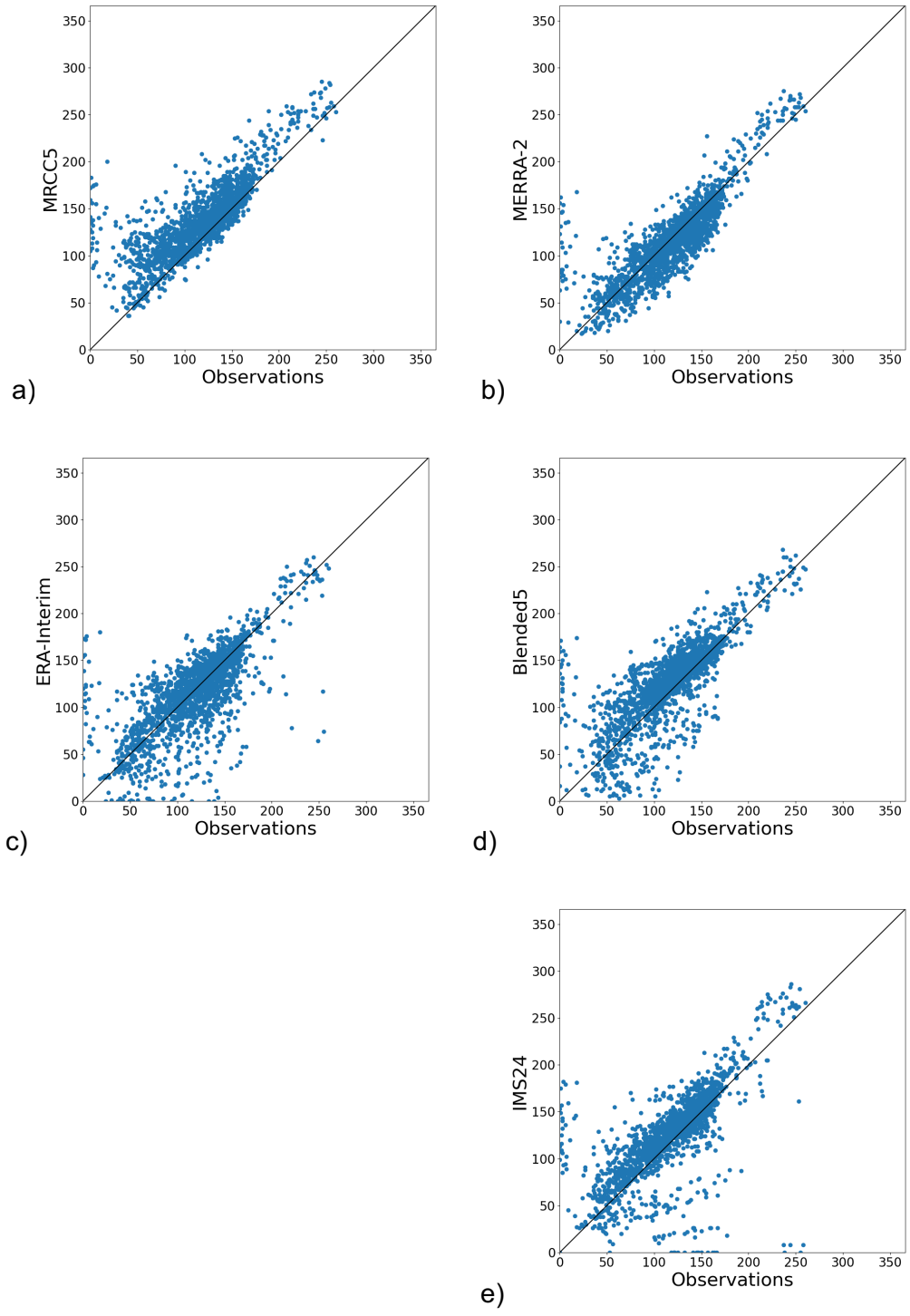


Figure 11 – Diagramme de dispersion des jours de couvert de neige (jours) pour MRCC5 (a), MERRA-2 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et IMS-24 (e) en fonction des observations d'ECCC.

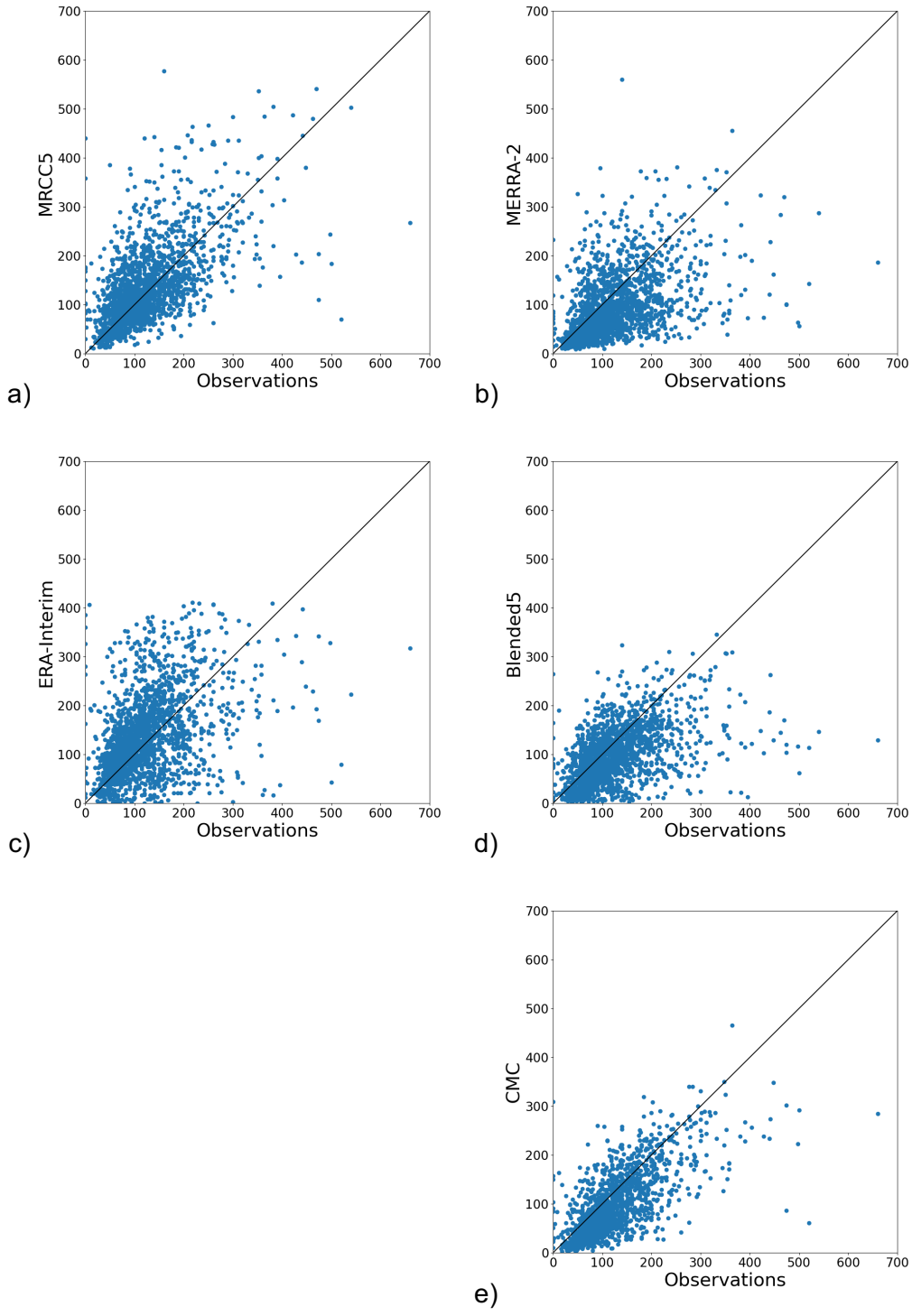


Figure 12 – Diagramme de dispersion de l'EEN maximal annuel (mm) pour MRCC5 (a), MERRA-2 (b), ERA-Interim (c), Blended-5 (d) et CMC (e) en fonction des observations d'ECCC.

ANNEXE II. COHÉRENCE DES VARIABLES DE NEIGE DANS LE MRCC5

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé l'équivalent en eau de la neige (EEN) produit par le Modèle régional canadien du climat 5^{e} version (MRCC5). Le MRCC5 peut également fournir d'autres variables communes liées à la neige (Tableau 3). Notons que les détails sur les variables se retrouvent dans le document de référence des variables (https://projets.ouranos.ca/attachments/download/4538/list_outputs_CRCM5_Ouranos_en_v6.pdf)

Tableau 3 – Liste des variables liées à la neige dans le MRCC5

Description de la variable	Nom dans les fichiers netCDF	Unités
Équivalent en eau de la neige	*snw*	kg m^{-2}
Épaisseur de la neige	*snd*	m
Fonte de la neige	*snm*	kg m^{-2} s^{-1}
Fraction de la tuile couverte par la neige	*snc*	%

Pour une tuile donnée du MRCC5 ces variables sont censées être valides pour la partie de la tuile couverte par de la terre seulement et on s'attend à avoir une cohérence entre les variables pour ces tuiles. Par exemple, on ne devrait pas avoir de valeur de *snw* positives lorsque *snc* est nulle.

Cependant, lors de la préparation des analyses réalisées pour ce rapport nous avons noté certaines incohérences entre les variables de neige et d'autres usagers l'ont noté également. Nous avons fait quelques analyses supplémentaires pour documenter la situation et nous en présentons les résultats dans cette annexe.

Pour nos analyses nous avons utilisé les variables de neige *snw, snd* et *snc* de la simulation bbt pour la période 1980-1989 (Tableau 1). Nous avons choisi cette période et cette simulation pour des raisons purement pratiques et n'avons aucune raison de penser que les résultats obtenus sont particuliers à ce choix. Nous avons utilisé les données de *snw, snd* et *snc* à l'heure 00 de chaque journée. Pour *snd* nous avons suivi les recommandations de la documentation des variables mentionnée précédemment et retenu le champ de *snd* valide sur la fraction de terre des tuiles. Nous n'avons pas utilisé la variable *snm* car elle n'était pas archivée. À partir des variables *snd, snw* et *snc* de chacune des journées nous avons répertorié les évènements où les valeurs de *snd* ou *snw* étaient non-nulles alors que les valeurs de *snc* étaient nulles (c. à d. $snd, snw \neq 0$ et $snc = 0$). Nous avons ensuite compté le nombre d'évènements pour chaque tuile et retenu les tuiles pour lesquelles on en comptait au moins un. Nous avons fait ces analyses pour *snd* et *snw* séparément.

Pour présenter les résultats obtenus nous séparons les tuiles retenues en différentes catégories (Figure 13) :

- les tuiles de mer, qui sont entièrement couvertes d'océan (c. à d. *sftlf* = 0) (Figure 13a),
- les tuiles de terre qui sont partiellement couvertes de terre (c. à d. *sftlf* > 0) (Figure 13b),
- les tuiles pour lesquelles il y a des évènements constants, c'est-à-dire qui sont présents pour tous les jours analysés (Figure 13a et b),
- les tuiles pour lesquelles il y a des évènements occasionnels (Figure 13c et d).

4985 tuiles de mer ont des évènements constants pour *snw*, c. à d. *snw* ≠ 0 et *snc* = 0 pour toutes les journées analysées (Figure 13a). Ces points se trouvent le long des côtes et sur les lacs.
Soixante-neuf tuiles de terre ont avec des évènements constants pour *snw* et *snd* (Figure 13b). Pour toutes les tuiles avec des évènements constants les valeurs de *snw* et *snd* sont constantes dans le temps mais varient d'un point à l'autre et peuvent avoir des valeurs importantes (c. à d. plusieurs centaines de kg m^{-2} pour *snw* et plusieurs mètres pour *snd*).
Il n'y a aucune tuile de mer avec des évènements occasionnels pour *snw* ou *snd* (Figure 13c et d). 2461 tuiles de terre ont au moins un évènement occasionnel pour *snw* (Figure 13c). Un examen de ces évènements montre que la grande majorité des tuiles n'ont qu'un évènement sur 10 ans de données quotidiennes et que les valeurs de *snw* lors de ces derniers sont relativement petites. 29429 tuiles de terre ont des évènements occasionnels pour *snd* (Figure 13d). Notons que pour la majorité de ces évènements les valeurs de *snd* sont très petites.
L'évolution des variables *snw* et *snd* est présentée pour l'évènement occasionnel avec les valeurs de *snw* et *snd* les plus élevées, 0,17 kg m^{-2} et 0,14 m respectivement (Figure 13e). Cet évènement arrive au même moment, le 11 décembre 1985, et sur la même tuile pour les deux variables. C'est le début d'une période d'accumulation de *snw* et d'augmentation de *snd* alors que la variable *snc* est encore nulle.

En résumé, nos résultats confirment qu'il y a des incohérences entre les variables de neige du MRCC5.
Il y a plus de 5000 tuiles de mer et de terre de la simulation bbt qui ont des incohérences systématiques entre *snw* et *snc*. La majorité de ces tuiles sont des tuiles de mer et peuvent donc être éliminées en utilisant un masque terre/mer. Pour les 69 tuiles de terre qui restent, les valeurs de *snw* et *snd* peuvent être importantes mais restent raisonnables (c. à d. pas aberrantes) et le nombre de tuiles et leurs localisations au nord du domaine en limite l'effet dès qu'on s'intéresse à un domaine de taille importante. Au niveau des incohérences occasionnelles entre *snw, snd* et *snc*, elles arrivent sur un nombre important de tuiles de terre sur l'ensemble du domaine. Par contre, ces incohérences sont relativement rares pour une tuile donnée (une dizaine de jours sur dix ans au pire) et les valeurs de *snw* et *snd* lors de ces évènements sont très faibles.

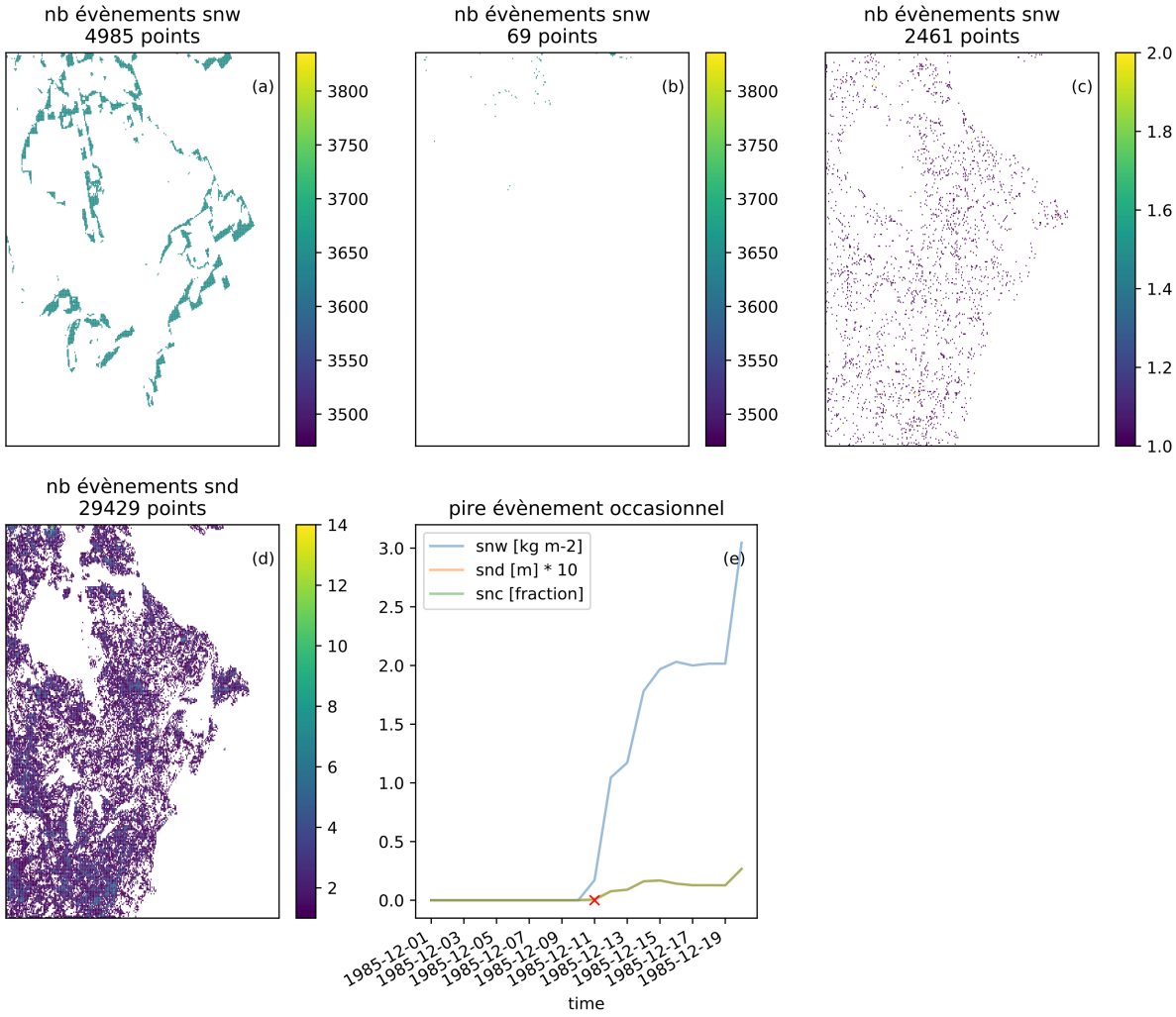


Figure 13 – Cartes du nombre d'évènements constants pour *snw* sur des tuiles de mer (a) et du nombre d'évènements constants sur les tuiles de terre (b). Carte du nombre d'évènements occasionnels pour *snw* (c) et pour *snd* (d). La figure (e) présente l'évolution temporelle de *snw, snd* et *snc* lors de l'évènement occasionnel avec les plus grandes valeurs de *snw* et *snd*. Le moment de l'évènement est indiqué par un « x » rouge.

ANNEXE III. VARIABILITÉ INTERNE ET PILOTAGE SPECTRAL

La base de données CROQ est constituée de quatre simulations du MRCC5 (Tableau 4).
La simulation bbr est la simulation de référence appelée MRCC5 par le rapport.
La simulation bbs est la jumelle de bbr et vise à évaluer la variabilité interne du modèle.
La simulation bbt a été produite à partir de la bbr et en ajoutant un pilotage spectral.
La simulation bbq est la jumelle de la bbt, créée pour prendre en compte la variabilité interne avec pilotage spectral.

Tableau 4 – Description des quatre simulations CROQ

Nom	Modèle	Grille	Pilotage spectral	Période	Commentaires
bbr	MRCC5 v3.3.3.1	QC@.11deg	Non	01/01/1979 – 31/12/2014	Simulation CROQ version alpha, 1979-2014
bbs	MRCC5 v3.3.3.1	QC@.11deg	Non	01/02/1979 – 31/12/2014	Jumelle de bbr
bbt	MRCC5 v3.3.3.1	QC@.11deg	Oui	01/01/1979 – 31/12/2014	bbr avec pilotage spectral
bbq	MRCC5 v3.3.3.1	QC@.11deg	Oui	01/02/1979 – 31/12/2014	Jumelle de bbt

De manière générale, les différences entre les trois simulations bbr, bbs et bbt sont peu significatives. La Figure 14 présente la différence entre les JCN annuels moyennés entre 1998 et 2010. Les différences les plus importantes sont au niveau de l'utilisation ou non du pilotage spectral. Une différence est notable à la frontière sud du domaine lors que le pilotage spectral est utilisé. Néanmoins, ceci n'a pas d'impact sur la zone d'intérêt, c'est-à-dire la province du Québec et l'est du Canada.

On notera aussi que les conclusions sur l'effet de la variabilité interne sur les simulations avec pilotage spectral sont semblables à celle sur les simulations sans pilotage spectral.

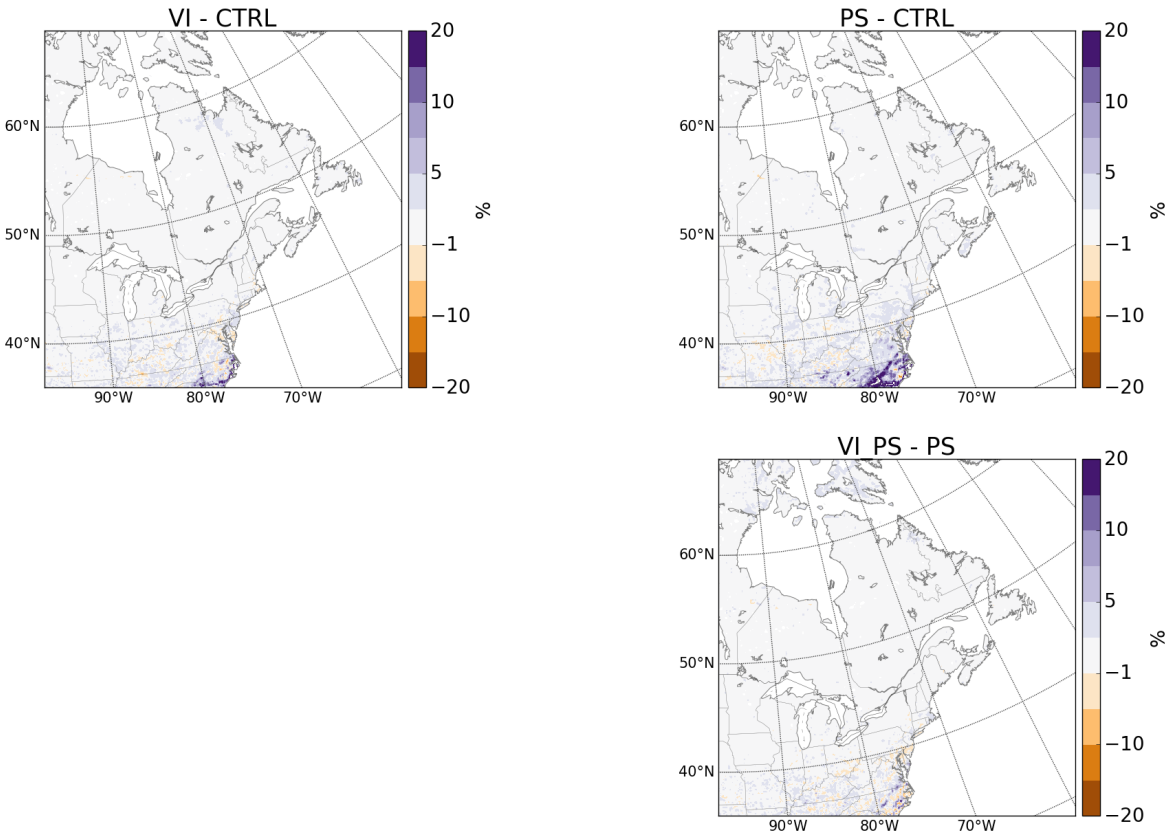


Figure 14 – Différence des JCN annuels moyennés entre 1998 et 2010 pour un EEN > 4 mm pour les différentes simulations MRCC5 : bbs-bbr (variabilité interne), bbt-bbr (pilotage spectral) et bbq-bbt (variabilité interne avec pilotage spectral)

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