

Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik

Produit par Ouranos

Pour le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

Rapport préparé par :

Isabelle Charron Ph.D.

OCTOBRE 2015

Version finale

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX SUR LE PROJET

Numéro de projet :	40032
Titre du projet :	Élaboration du portrait climatique régional en soutien à l'analyse des vulnérabilités et au développement du Nunavik
Nom du gestionnaire de projet	Diane Chaumont, Ouranos
Nom du chercheur principal	Isabelle Charron, Ph.D., Ouranos
Date de soumission du rapport :	29 septembre 2015
Date de commencement et d'achèvement du projet :	15 septembre 2014-15 septembre 2015
Organismes partenaires et représentants identifiés comme collaborateurs principaux:	Ouranos : Patrick Grenier, Caroline Larrivée, Jean-Pierre Savard, Sébastien Biner Environnement Canada : Ross Brown MDDELCC : Éric Larrivée IREQ : Frédéric Guay INRS-ETE: Alain Mailhot RNCAN/SCF : Dan McKenney CEN/ArcticNet : Carl Barrette
Membres du comité de suivi :	Jean-François Bergeron (MFFP), Claude Morneau (MFFP), Éric Larrivée (MDDELCC), Geneviève Labrie (MDDELCC), Anick Guimond (MTQ), Yvon Jodoin (MSP), Diane Frappier (MAMOT), Jean-François Gravel (SHQ), Michael Barrett (ARK), Catherine Pinard (ARK), Jocelyn Gosselin (MFFP), Maxime Bélanger (MERN)

Citation suggérée : Charron, I. (2015). Élaboration du portrait climatique régional du Nunavik, Ouranos, Montréal, 86pp.

REMERCIEMENTS

L’auteure souhaite remercier le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) qui a assuré le financement de ce projet. Un remerciement particulier est offert à M. Jean-François Bergeron qui a offert une aide précieuse afin de coordonner les rencontres et discussions entre les partenaires impliqués dans ce projet. Nous remercions également les membres du comité de suivi ainsi que les collaborateurs du projet qui ont fourni des avis servant à bonifier les résultats présentés dans ce document.

Des remerciements particuliers sont offerts à M. Éric Larrivée de la Direction du suivi de l’état de l’environnement au ministère du Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) pour son aide avec l’analyse des bioclimats, à M. Pierre-Yves St-Louis du groupe Climatologie & gestion des données du MDDELCC pour l’obtention des données d’observations aux stations au nord du Québec, ainsi qu’à M. Maxime Bélanger et M. Frédéric Guay pour leur apport dans la production d’une cartographie conforme aux normes de ce ministère. Nous remercions aussi M. Ross Brown, d’Environnement Canada, pour ses précieux conseils qui ont largement guidé l’analyse des bases de données de neige, ainsi que messieurs Vincent Brodeur et Philippe Raymond du MFFP, qui ont offert des commentaires sur le rapport final du projet. L’état des connaissances sur les vents repose en grande partie sur les travaux d’Hélène Côté d’Ouranos que nous tenons aussi à remercier.

Enfin, merci à deux collègues de l’équipe Scénarios et Services climatiques chez Ouranos, soit à Blaise Gauvin St-Denis qui a téléchargé les données et partagé son expertise sur les bases de données climatiques ainsi qu’à Travis Logan pour la préparation du Tome 2 de ce rapport.

Les coûts relatifs aux travaux sont assumés par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d’action 2013-2020 sur les changements climatiques du Gouvernement du Québec ainsi que par Ouranos.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Le territoire nordique du Québec possède un grand potentiel de développement susceptible d'être exploité au cours des prochaines décennies. Pour bien encadrer ces activités économiques et les infrastructures qui les soutiennent, il est important de comprendre et caractériser le climat régional actuel ainsi que son évolution. Ceci est aussi primordial pour la protection de l'environnement biophysique, la pérennité des infrastructures existantes et l'identification des vulnérabilités socio-économiques de la région.

L'identification et l'analyse des vulnérabilités liées au climat de même que la recherche de solutions d'adaptation pour faire face à son changement requièrent des données sur le climat récent en premier lieu puis sur le climat futur. Or, pour caractériser le climat récent, la disponibilité de séries de données d'observations suffisamment longues et bien réparties sur le Québec nordique s'avère un enjeu majeur. En effet, alors qu'on peut compter depuis longtemps sur un réseau de stations météorologiques relativement important dans le sud du Québec, celui du nord est peu dense et principalement localisé le long de la côte. Afin de pallier la rareté des observations dans la région nordique, il est possible de compter sur quelques jeux de données alternatifs soit les données interpolées par krigeage des stations existantes ou encore les données de réanalyses. Pour ce projet, le mandat d'Ouranos était centré sur l'évaluation des différentes sources de données alternatives afin de mieux caractériser le climat récent (1981-2010) sur le territoire nordique québécois, au nord du 55^e parallèle. Un second objectif visait à évaluer le potentiel des réanalyses pour l'estimation des quantiles de pluies extrêmes.

Potentiel des réanalyses

- Comparées aux autres types de données, les réanalyses offrent un avantage certain pour calculer les indicateurs climatiques d'intérêt et produire une cartographie du climat du Nunavik;

- L'intérêt d'appliquer un post-traitement sur les réanalyses et de les utiliser pour l'estimation des intensités de pluies extrêmes dans le nord du Québec est aussi démontré;
- L'avantage d'appliquer un post-traitement sur les réanalyses est relié au faible nombre de stations météorologiques et de l'immensité du territoire nordique.

Indicateurs climatiques

Plus d'une centaine de cartes d'indicateurs clés ont été produites et le calcul de l'évolution des indicateurs sur une période de référence de 1981 à 2010 a été fait. En résumé, l'analyse montre que pour cette période :

- les températures moyennes annuelles augmentent;
- la durée de la saison sans gel s'allonge;
- le nombre annuel d'événements de gel-dégel change peu, mais tend à augmenter à l'automne et diminuer au printemps;
- la moyenne annuelle des degrés-jours de gel diminue;
- la moyenne annuelle des degrés-jours de dégel augmente;
- la saison de croissance s'allonge;
- la moyenne annuelle des degrés-jours de croissance augmente;
- la longueur des périodes où la température quotidienne moyenne oscille autour de 0°C est à la hausse à l'automne, mais à la baisse au printemps;
- les précipitations totales annuelles sont à la hausse;
- les précipitations liquides annuelles sont généralement à la hausse, avec une augmentation plus marquée à l'automne;

- les précipitations solides annuelles changent peu, bien qu’une légère baisse est visible, principalement liée à des diminutions plus importantes au printemps et à l’automne;
- la fraction de neige diminue annuellement;
- l’équivalent en eau de la neige est stable et la durée du couvert nival a diminué.

En contrepartie, notre analyse met en lumière le manque important de données d’observations, autant pour les variables de températures, de précipitations, de neige au sol, que pour d’autres variables utiles telles que le vent et le débit des rivières. Ces observations sont nécessaires pour évaluer de façon plus robuste le potentiel des divers jeux de données alternatives.

Extrêmes de précipitations

Trois réanalyses, ERA, CFSR et MERRA, sont utilisées pour produire des cartes de précipitations extrêmes sur le territoire.

- les réanalyses présentent des biais parfois importants pour les valeurs de précipitations extrêmes, toutefois, la distribution spatiale des valeurs des réanalyses colle très bien au patron suggéré par les valeurs aux stations;
- l’application d’un post-traitement visant à corriger les biais des réanalyses a permis une amélioration sensible des résultats;
- les hauteurs des maxima annuels de précipitations sur 1 jour avec une période de retour de 2 ans et de 20 ans présentent un léger gradient sud-nord sur le territoire, avec des valeurs moins abondantes sur l’extrême nord, selon les différentes combinaisons de réanalyses.

Bioclimats

Une mise à jour de la cartographie des bioclimats au nord du 55^{ième} parallèle a été effectuée avec des données de 1981 à 2010 et offre un portrait plus détaillé que celui présenté en 2001 qui était basé sur des données d'observations aux stations pour la période 1966 à 1996.

- Les nouvelles catégories aident à décrire avec plus de précision certains éléments climatiques et topographiques importants tels que la région montagneuse à la frontière du Labrador.
- La zone subpolaire a pris de l'expansion au nord tandis que la zone polaire est moins étendue.
- Les précipitations sont plus importantes sur tout le territoire comparativement à la carte d'origine.

Important à retenir

Bien que nous ayons produit de nombreuses cartes d'indicateurs et revu la distribution des bioclimats pour le nord du Québec, il faut mettre les utilisateurs de cette information en garde par rapport aux incertitudes associées. En effet, les écarts entre les réanalyses, particulièrement pour les précipitations liquides et sous forme de neige, démontrent à quel point les incertitudes sur l'information climatique du nord québécois demeurent grandes. Il nous est toujours impossible de favoriser l'une ou l'autre des réanalyses étudiées, en grande partie à cause du manque de données d'observations qui pourraient servir à valider les jeux de données. Il faut donc utiliser l'information présentée ici de façon prudente.

TABLE DES MATIÈRES

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX SUR LE PROJET.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
SOMMAIRE EXÉCUTIF	IV
TABLE DES MATIÈRES.....	VIII
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	XIV
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE	1
1.2 OBJECTIFS	5
CHAPITRE 2 : DONNÉES, INDICATEURS CLIMATIQUES ET BIOCLIMATS.....	6
2.1 DONNÉES.....	6
2.2 INDICATEURS CLIMATIQUES.....	10
2.2 BIOCLIMATS.....	15
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE	19
3.1 PÉRIODE SÉLECTIONNÉE POUR LE CLIMAT DE RÉFÉRENCE.....	19
3.2 SÉLECTION DES JEUX DE DONNÉES – TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS.....	19
3.2.1 <i>Résolution et vintage des jeux de données.....</i>	<i>19</i>
3.2.2 <i>Validation avec les données aux stations.....</i>	<i>20</i>
3.3 SÉLECTION DES JEUX DE DONNÉES – COUVERT DE NEIGE.....	23
3.4 FORMATS DE PRÉSENTATION DES INDICATEURS CLIMATIQUES	24
3.4.1 <i>Cartographie.....</i>	<i>24</i>
3.4.2 <i>Tableau synthèse et séries temporelles.....</i>	<i>25</i>
3.5 DISTRIBUTION DES BIOCLIMATS.....	25
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS.....	26

4.1 SÉLECTION DES JEUX DE DONNÉES – TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS	26
4.2 SÉLECTION DES JEUX DE DONNÉES – COUVERT DE NEIGE.....	28
4.3 DESCRIPTION DU CLIMAT DU PASSÉ RÉCENT AU NUNAVIK.....	37
4.3.1 <i>Température annuelle moyenne</i>	40
4.3.2 <i>Précipitations totales annuelles</i>	43
4.3.3 <i>Longueur de la saison de croissance</i>	46
4.3.4 <i>Degrés-jours de croissance</i>	51
4.3.5 <i>Couvert de neige</i>	54
4.4 BIOCLIMATS	58
CHAPITRE 5 : ÉTAT DES CONNAISSANCES D'AUTRES VARIABLES CLIMATIQUES	61
5.1 LES VENTS	61
5.2 GLACES MARINES	63
5.3 RÉGIME HYDRIQUE	65
CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DU POTENTIEL DES RÉANALYSES POUR L'ESTIMATION DES INTENSITÉS DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES	68
CHAPITRE 7 : DISCUSSION ET CONCLUSION	76
CHAPITRE 8 : RECOMMANDATIONS.....	80
BIBLIOGRAPHIE.....	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Stations météorologiques du réseau d'Environnement Canada pour lesquelles des données sont disponibles pour plus de 20 ans incluant l'année 2010.	3
Figure 2.	Classification climatique du Québec tirée de Gerardin et McKenney (2001). Notez que bien que la carte présente 15 classes, ces classes ont été regroupées en 12 régions climatiques selon la classification mondiale de Litynski.	18
Figure 3.	Distribution des 46 stations du réseau MDDELCC disponibles dans la région à l'étude. Seules les stations indépendantes en vert sont utilisées pour la validation.	22
Figure 4.	Validation des données alternatives de températures mensuelles moyennes avec les données aux stations du MDDELCC. Le 'n' indique le nombre de séries observées valides pour chaque jeu de données alternatives.	30
Figure 5.	Validation des données alternatives de précipitations mensuelles moyennes avec les données aux stations du MDDELCC. Le 'n' indique le nombre de séries observées valides pour chaque jeu de données alternatives.	31
Figure 6.	Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région au nord approximativement du 59°. Le bioclimat correspond à cette région est présenté à la figure 21.	33
Figure 7.	Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région entre le 58° et 59°. Le bioclimat correspond à cette région est présenté à la figure 21.	34
Figure 8.	Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région entre le 56° et 58°. Le bioclimat correspond à cette région est présenté à la figure 21.	35
Figure 9.	Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région entre le 55° et 56°. Le bioclimat correspond à cette région est présenté à la figure 21.	36
Figure 10.	Le panneau du haut présente la moyenne des températures moyennes annuelles (°C), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.	41
Figure 11.	L'évolution des températures moyennes annuelles et mensuelles (°C) selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude.	42
Figure 12.	Le panneau du haut présente la moyenne des précipitations totales annuelles (mm), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.	44

- Figure 13.** L'évolution des précipitations totales annuelles et mensuelles (mm) selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude. 45
- Figure 14.** Le panneau du haut présente la moyenne de la longueur de la saison de croissance (jours), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) pour la période 1981-2020. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses. 47
- Figure 15.** Le panneau du haut présente la moyenne de la date du début de la saison de croissance (jours juliens), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses. 48
- Figure 16.** Le panneau du haut présente la moyenne de la date de la fin de la saison de croissance (jours juliens), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses. 49
- Figure 17.** L'évolution de la longueur, du début et de la fin de la saison de croissance, selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude. 50
- Figure 18.** Le panneau du haut présente la moyenne du nombre annuel de degrés-jours de croissance, calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses. 52
- Figure 19.** L'évolution du nombre de degrés-jours annuel de de croissance, selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude. 53
- Figure 20.** Le maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige (mm) calculé à partir des données de Liston-Hiemstra (panneau du haut) et de Brown-Derksen (panneau du bas), pour la période 1981-2010. La base de données Liston et Hiemstra ne couvre pas tout le territoire au nord du 55°. 55
- Figure 21.** La durée du couvert de neige (seuil de 1 mm), calculée à partir des données de Liston-Hiemstra (panneau du haut) et de Brown-Derksen (panneau du bas), pour la période 1981-2010. La base de données Liston et Hiemstra ne couvre pas tout le territoire au nord du 55°. 56
- Figure 22.** L'évolution du maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige, du début, de la fin et de la durée de l'enneigement, calculé à partir des données de Liston-Hiemstra et de Brown-Derksen, moyennés pour l'ensemble du territoire à l'étude. 57
- Figure 23.** Classification des bioclimats établie sur la moyenne climatique de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFRS, JRA55, MERRA) disponibles sur une grille de 50 km. La classification suit les critères établis par Litynski tels que présentés dans Gerardin et McKenney (2001). 60
- Figure 24.** Réduction du couvert de glace (% par décennie) pour la période 1968-2010 dans l'arctique canadien. Seulement les tendances statistiquement significatives ($\alpha=0.05$) sont montrées. Adaptée de Derksen et al. 2012. 65

- Figure 25.** Cartes du coefficient de la variabilité temporelle des débits annuels de 45 rivières du Nord canadien pour (a) 1970–1990, (b) 1976–1996, (c) 1982–2002, et (d) 1970–2002. Les triangles pointant vers le haut (bas) indiquent une tendance positive (négative); la taille des triangles indique l’ampleur du changement lorsque détectable. Les rivières aménagées par l’homme (réservoirs, barrages, diversion) sont indiquées par des triangles vides..... 67
- Figure 26.** Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour les différentes réanalyses et aux stations..... 70
- Figure 27.** Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour les différentes réanalyses après post-traitement et carte correspondante aux stations. 72
- Figure 28.** Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour les différentes combinaisons de paires de réanalyses après post-traitement et carte correspondante aux stations. 74
- Figure 29.** Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 20 ans pour les différentes combinaisons de paires de réanalyses après post-traitement et carte correspondante aux stations. 75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Liste et caractéristiques des données climatiques observées et interpolées sur grille (température et précipitation).	7
Tableau 2	Liste et caractéristiques des données climatiques de réanalyses (température et précipitation).	8
Tableau 3	Liste et caractéristiques des données du couvert nival provenant de données interpolées.	9
Tableau 4	Liste et caractéristiques des données du couvert nival provenant de données de réanalyses.	9
Tableau 5	Liste, définition et formulation des indicateurs climatiques d'intérêt.	11
Tableau 6	Caractéristiques sommaires de la classification de Litynski (tirées de Gerardin et McKenney 2001).	26
Tableau 7a	Synthèse des indicateurs climatiques à l'étude calculés à partir des variables de températures et de précipitations. Les valeurs représentent la moyenne des quatre réanalyses, moyennées sur tout le territoire au-delà de 55° pour la période 1981-2010, l'écart-type de l'ensemble est donné entre parenthèses.	38
Tableau 7 b.	Synthèse des indicateurs climatiques reliés au couvert nival. Les valeurs représentent la moyenne des jeux de données, moyennées sur tout le territoire au-delà du 55° pour la période 1981-2010. L'écart-type n'est pas calculé étant donné qu'il n'y a que deux jeux de données.	40
Tableau 8.	Liste et caractéristiques des réanalyses retenues.	69
Tableau 9.	Réanalyse (ou paire de réanalyses) offrant le meilleur accord avec les intensités aux stations après post-traitement individuel (ou post-traitement par paire).	73

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

B2003	<i>Brown 2003</i>
CANGRD	<i>Canadian Gridded Temperature and Precipitation Anomalies</i>
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
EC	<i>Environnement Canada</i>
EEN	<i>Équivalent en eau de la neige</i>
ERA	<i>European ReAnalysis</i>
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i>
GPCC	<i>Global Precipitation Climatology Centre</i>
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GISTEMP	<i>Goddard Institute for Space Studies Temperature Analysis</i>
GlobSnow	<i>Global Snow Monitoring for Climate Research</i>
HadCRU	<i>Hadley Center-Climatic Research Unit</i>
JRA55	<i>Japanese 55-year Reanalysis</i>
MERRA	<i>Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications</i>
MFFP	<i>Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs</i>
MDDELCC	<i>Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques</i>
NARR	<i>North American Regional Reanalysis</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
20CR	<i>20 th Century Reanalysis</i>

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Le territoire nordique du Québec possède un grand potentiel de développement susceptible d'être exploité au cours des prochaines décennies. Pour bien encadrer ces activités économiques et les infrastructures qui les soutiennent, il est important de comprendre et caractériser le climat régional actuel ainsi que son évolution. Ceci est aussi primordial pour la protection de l'environnement biophysique, la pérennité des infrastructures existantes et l'identification des vulnérabilités socio-économiques de la région.

Le changement du climat a déjà commencé à provoquer des impacts biophysiques importants dans le nord du Québec. Une analyse approfondie de ces impacts est présentée dans le livre publié par ArcticNet *Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques* (Allard et Lemay, 2013). Par exemple, un impact bien connu est celui lié à la dégradation du pergélisol et les conséquences pour les infrastructures (Allard et Lemay 2013, chap.6). La dynamique de la végétation est aussi en évolution, ceci devrait se poursuivre dans le futur et entraîner une augmentation de la couverture végétale et de la hauteur d'espèces arbustives érigées (Allard et Lemay, 2013, chap.8). Les projections climatiques futures suggèrent la venue de nouveaux impacts, par exemple : l'érosion des côtes associée aux régimes de tempêtes qui provoquent une augmentation des risques de surcotes, les changements au régime hydrologique avec une augmentation du débit annuel moyen (Guay *et al.* 2015) ce qui pourrait entraîner des impacts au niveau du drainage dans les villages ainsi qu'une augmentation des risques naturels.

La modification de l'environnement biophysique amplifie aussi les vulnérabilités socio-économiques : les infrastructures existantes et à construire ont très souvent un caractère critique dans la région et leur défaillance peut provoquer des conséquences graves pour la population; l'accès maritime accru grâce au prolongement de la saison sans glace pourrait exacerber des conflits d'usage; la gestion de l'eau potable et des eaux usées

pourrait être complexifiée dans un contexte où l’environnement naturel change et, finalement, le mode de vie et la culture des résidents de la région, très dépendants des ressources et de l’environnement naturel, seront aussi affectés.

L’identification et l’analyse des vulnérabilités liées au climat de même que la recherche de solutions d’adaptation pour faire face à son changement requièrent des données sur le climat récent en premier lieu puis sur le climat futur. Or, pour caractériser le climat récent, la disponibilité de séries de données d’observations suffisamment longues et bien réparties sur le Québec nordique s’avère un enjeu majeur. En effet, alors qu’on peut compter depuis longtemps sur un réseau de stations météorologiques relativement dense dans le sud du Québec, celui du nord est peu dense et principalement localisé le long de la côte (figure 1). Plusieurs projets de recherche sur le climat ont d’ailleurs été confrontés à ces lacunes. Par exemple, dans le livre d’ArcticNet cité plus haut, les analyses climatiques des dernières décennies ont en grande partie été limitées aux six stations météorologiques du réseau d’Environnement Canada disponibles dans la région (Brown et Lemay 2013).

Afin de pallier la rareté des observations dans la région nordique, il est possible de compter sur quelques jeux de données alternatifs soient les données interpolées par krigeage des stations existantes ainsi que les données de réanalyses.

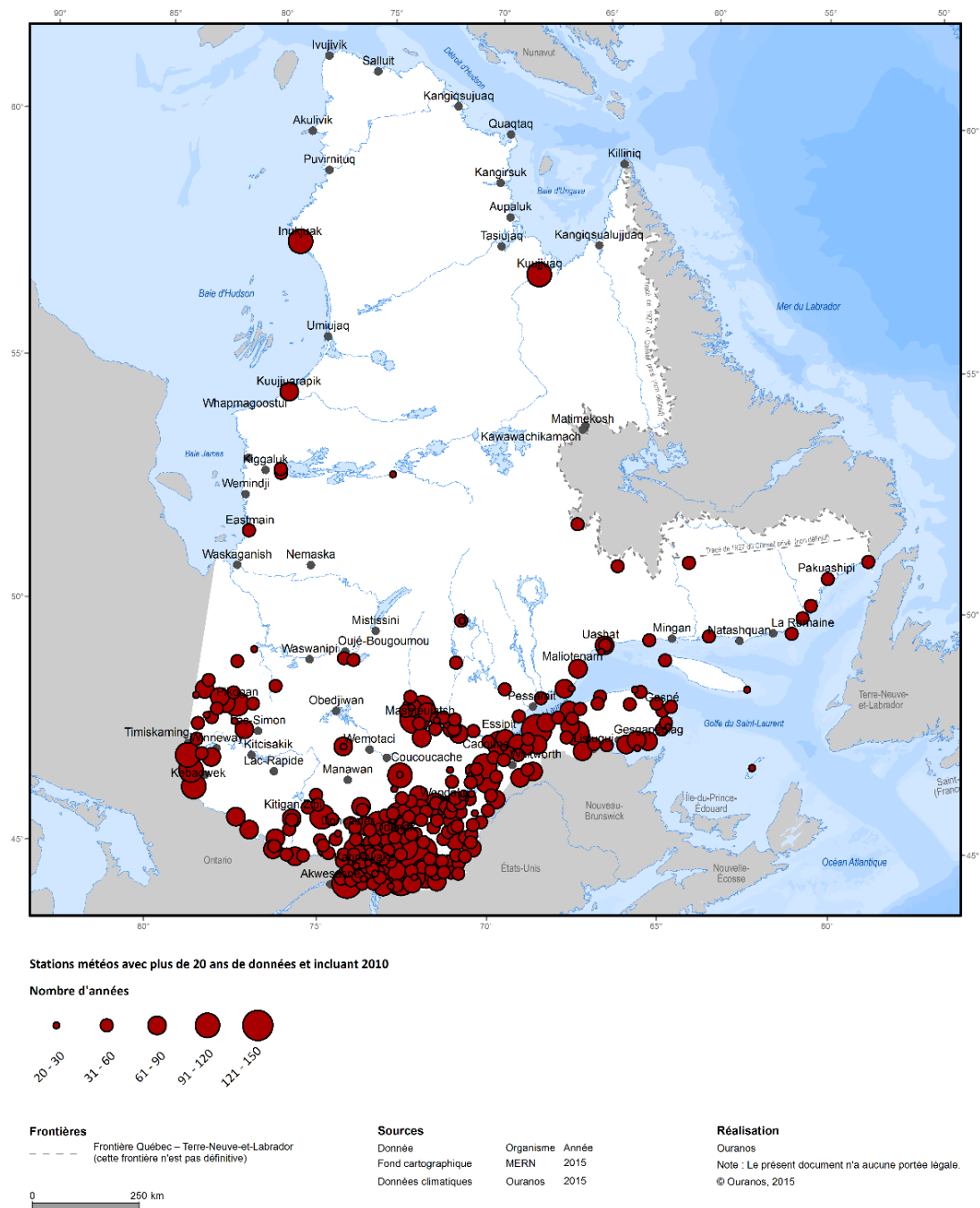
Stations météo d'Environnement Canada

Figure 1. Stations météorologiques du réseau d'Environnement Canada pour lesquelles des données sont disponibles pour plus de 20 ans incluant l'année 2010.

Le krigeage consiste à régionaliser par interpolation spatiale une variable mesurée aux stations météorologiques, par exemple la température, en utilisant une autre variable explicative, par exemple l'élévation. La qualité de ce type de données dépend du nombre de stations météorologiques et de la qualité de leurs données ainsi que de la méthode d'interpolation. Deux points sont importants ici. Premièrement, la résolution spatiale de ces types de données peut varier grandement, résultant en des grilles de quelques kilomètres de côté à des centaines de kilomètres et il peut être difficile de trouver une résolution spatiale assez fine pour bien représenter le climat régional. Deuxièmement, les données sont disponibles sur différentes échelles de temps, allant d'une base journalière à mensuelle. La base mensuelle offre moins d'attrait puisqu'elle limite la variété d'indicateurs climatiques qui peuvent être estimés, plusieurs d'entre eux nécessitant des données quotidiennes (par exemple cumul de degrés-jour, longueur de saison de gel, de croissance, etc.).

La réanalyse est une méthode qui consiste à combiner un modèle de prévision météorologique et des observations existantes pour produire, généralement pour l'ensemble du globe, des archives d'un grand nombre de variables atmosphériques et océaniques sur des grilles à une résolution temporelle de quelques heures pour plusieurs décennies du passé. Ceci s'effectue à l'aide d'un modèle de prévision météorologique ainsi qu'un algorithme d'assimilation des données, pour lesquels il importe de fixer des résolutions horizontale et verticale qui demeurent uniformes pour toute la période revisitée. De nouvelles sources d'observations peuvent même être intégrées à la procédure ce qui permet d'améliorer la représentation du climat. Ce travail est généralement fait pour des périodes où les réseaux d'observations sont variés, denses et fiables. Les réanalyses offrent plusieurs avantages, notamment, elles peuvent couvrir plusieurs décennies, elles sont souvent disponibles sur des résolutions spatiales relativement fines et avec des pas de temps journaliers (ou même plus court).

Les données de réanalyses diffèrent entre elles sur plusieurs aspects. D'abord, bien qu'elles intègrent différentes données d'observations, ces dernières varient selon leur

provenance allant de radiosondages aérologiques, de stations météorologiques de surface, de satellites, de radars, etc. Leurs résolutions tout comme leurs sélections d'observations varient également. Finalement, les réanalyses sont issues de modèles de prévisions différents qui n'utilisent pas les mêmes schémas d'assimilation. De manière générale, les variables pour lesquelles il n'existe pas d'observations présentent potentiellement les plus grandes disparités, car elles sont déterminées uniquement par le modèle de prévision.

Devant la disponibilité des différentes sources de données, il est possible d'envisager de combiner les jeux de données afin de calculer une marge d'erreur autour du climat nordique récent et de le caractériser de manière adéquate pour soutenir les analyses sur les vulnérabilités, les impacts et les stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

1.2 Objectifs

Le mandat d'Ouranos pour ce projet était par conséquent centré sur la caractérisation du climat récent sur le territoire nordique québécois, au nord du 55e parallèle, en analysant les jeux de données disponibles.

Les objectifs spécifiques étaient les suivants :

1. Améliorer le niveau de connaissance du climat du Nunavik et de sa variabilité spatiale et temporelle;
2. Produire des cartes et des tableaux synthèses du climat récent pour différents indicateurs;
3. Produire des cartes synthèses à fine échelle exposant une sélection d'indicateurs clés;
4. Identifier les zones où les marges d'erreur sur la connaissance du climat régional sont les plus importantes;
5. Évaluer le potentiel des données alternatives (réanalyses) pour l'estimation des quantiles de pluies extrêmes;

6. Fournir un état des connaissances sur d'autres variables d'intérêt (régime des vents, hydrologie et couvert de glace);
7. Proposer des recommandations pour des travaux subséquents.

Il faut noter que tous les objectifs, à l'exception du cinquième, étaient sous la responsabilité du consortium Ouranos et sont abordés en détail dans le présent rapport. L'objectif d'évaluer le potentiel des données alternatives (réanalyses) pour l'estimation des quantiles de pluies extrêmes était quant à lui confié à l'équipe de recherche d'Alain Mailhot, de l'INRS-ETE. Un compte-rendu des méthodes utilisées et des principaux résultats est présenté au chapitre 6 du présent rapport alors que les informations plus détaillées font l'objet d'un document technique (Tome 1).

CHAPITRE 2 : DONNÉES, INDICATEURS CLIMATIQUES ET BIOCLIMATS

2.1 Données

Tel que mentionné plus haut, un des principaux objectifs de ce projet était d'évaluer la possibilité d'utiliser des jeux de données alternatifs, soient les données de stations météorologiques interpolées sur grilles ou les réanalyses pour pallier au manque de stations météorologiques dans le nord québécois. Plusieurs bases de données de températures et de précipitations offraient un potentiel, elles sont présentées aux tableaux 1 (données interpolées sur grille) et 2 (réanalyses), tandis que les tableaux 3 et 4 présentent les jeux de données disponibles pour le couvert nival.

Tableau 1 Liste et caractéristiques des données climatiques observées et interpolées sur grille (température et précipitation).

Nom	Période	Résolution spatiale	Domaine	Variables	Pas de temps	Références
CLIMATOLOGIE	1925-présent	Observations	Québec	Tmax, Tmin, Tmoy, PCP	Quotidien	MDDELCC 2014
CANGRD	1900-2010	50 km polaire stéréographique	Canada	Tmoy/PCP	Mensuel	Zhang et al. 2000
CRU TS3.1	1901-présent	0.5° lat-lon	global terrestre	Tmoy/PCP	Mensuel	Harris et al. 2013
Willmott-Matsuura	1900-2010	0.5° lat-lon	global terrestre	Tmoy/PCP	Mensuel	Willmott et Matsuura 1995
GPCC v6	1900-2010	0.5° lat-lon	global terrestre	PCP	Mensuel	Schneider et al. 2013
GPCP v2	1979-présent	2.5° lat-lon	global	PCP	Mensuel	Adler et al. 2003
HadCRUT3v	1850-présent	5° lat-lon	global	Anomalie Tmoy	Mensuel	Brohan et al. 2006
CRUTEM4v	1850-présent	5° lat-lon	global terrestre	Anomalie Tmoy	Mensuel	Jones et al. 2012
GISTEMP	1850-présent	1° lat-lon	global	Anomalie Tmoy	Mensuel	Hansen et al. 2010
NRCan	1950-2014	10 km	Canada	Tmoy/PCP	Quotidien	Hutchinson et al. 2009

Tableau 2 Liste et caractéristiques des données climatiques de réanalyses (température et précipitation).

Nom	Période	Résolution spatiale	Domaine	Variables	Références
NCEP2	1979-présent	2.5° lat-lon	Global	Tmoy/PCP	Kanamitsu et al. 2002
NARR	1979-présent	32 km	Amérique du Nord regional	Tmoy/PCP	Mesinger et al. 2006
MERRA	1979-présent	0,5° lat 0,67° lon	Global	Tmoy/PCP	Rienecker et al. 2011
ERA-Interim	1979-présent	0.75° lat-lon	Global	Tmoy/PCP	Dee et al. 2011
ERA40	1958 -2002	1.25° lat-lon	Global	Tmoy/PCP	Uppala et al. 2005
JRA25	1979-2007	1.25° lat-lon	Global	Tmoy/PCP	Onogi et al. 2007
CFSR	1979-2009	~38 km	Global	Tmoy/PCP	Saha et al. 2010
20CR	1871-2010	2° lat-lon	Global	Tmoy/PCP	Compo et al. 2011

Note : Tous ces jeux de données sont disponibles à un pas de temps quotidien.

Tableau 3 Liste et caractéristiques des données du couvert nival provenant de données interpolées.

Nom	Période	Résolution	Domaine	Pas de temps	Références
CLIMATOLOGIE	1965-2005	Observations	Stations	quotidien	MDDELCC 2014
B2003	1979-1997	30 km	Amérique du nord	quotidien	Brown et al. 2003
GlobSnow	1979-2012	25 km	Global	quotidien	Takala et al. 2011
CMC snow depth analysis	1999-2012	30 km	Hémisphère nord	quotidien	Brown et Brasnett 2010

Tableau 4 Liste et caractéristiques des données du couvert nival provenant de données de réanalyses.

Nom	Période	Résolution	Domaine	Pas de temps	Références
MERRA	1980-2012	75 km-réanalyse	Global	quotidien	Rienecker et al. 2011
ERA-interim	1980-2012	75 km-réanalyse	Global	quotidien	Dee et al. 2011
CFSR	1979-2009	~38 km	Global	quotidien	Saha et al. 2010
NCEP reconstruction	1948-2004	50 km polaire stéréographique	Québec	quotidien	Brown 2010
Brown-Derksen	1979-2012	75 km réanalyse (ERA-interim)	Hémisphère nord (nord du 30°)	quotidien	Brown et Derksen (2013)
Liston-Hiemstra	1979-2009	10 km x 10 km	Hémisphère nord (nord du 50°N)	quotidien	Liston et Hiemstra (2011)

Il faut préciser que les deux derniers jeux de données du tableau 4 (Brown-Derksen et Liston-Hiemstra) diffèrent des autres réanalyses à l'étude, car elles utilisent en fait une réanalyse afin de piloter un modèle de neige. La série Brown-Derksen utilise la réanalyse ERA-Interim comme pilote, tandis que la série Liston-Hiemstra utilise MERRA.

2.2 Indicateurs climatiques

La caractérisation du climat au nord de 55° est basée sur les variables de températures, précipitations et neige au sol auxquelles s'ajoute un grand nombre d'indicateurs climatiques, calculés à partir des trois variables de base. Ces indicateurs permettent de faire des liens entre le climat et des problématiques appliquées. Notons qu'une première liste de variables et d'indicateurs a été établie dans la proposition de projet en collaboration avec le MFFP et le comité de suivi, alors que de nouveaux indicateurs se sont ajoutés en cours de projet. Ces ajouts sont le fruit d'échanges avec certains membres du comité de suivi et collaborateurs du projet. Le tableau 5 présente tous les indicateurs à l'étude ainsi que leurs définitions et les formules utilisées pour les calculer.

Tableau 5 Liste, définition et formulation des indicateurs climatiques d'intérêt.

Indicateur	Définition	Formule
Température moyenne annuelle	Moyenne annuelle des températures moyennes quotidiennes	$Tmoy_{ann} = \frac{\sum_i^N Tmoy_j}{N}$ $Tmoy_j$: Température moyenne de chaque journée (j) N : Nombre de jours dans une année
Température moyenne mensuelle	Moyenne mensuelle des températures moyennes quotidiennes	$Tmoy_{mois} = \frac{\sum_i^{Nmen} Tmoy_j}{Nmen}$ $Tmoy_j$: Température moyenne de chaque journée (j) Nmois : Nombre de jours dans un mois
Début de la saison sans gel (printanier)	Le premier jour suivant l'hiver où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à un seuil de température gélive T_{gel} selon une moyenne mobile de 10 jours	$DDG_{Tgel} = \max\{j \mid T_{min_j} \leq T_{gel}\}$ $T_{gel} = \{0\text{ °C}\}$
Fin de la saison sans gel (automnal)	Le premier jour de l'automne où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à un seuil de température gélive T_{gel} selon une moyenne mobile de 10 jours	$DPG_{Tgel} = \min\{j \mid T_{min_j} \leq T_{gel}\}$ $T_{gel} = \{0\text{ °C}\}$
Longueur de la saison sans gel	Le nombre de jours entre le premier et le dernier gel de l'année (voir 2 définitions précédentes) selon un seuil T_{gel}	$LSS_{gel} = DPG_{Tgel} - DDG_{Tgel}$

Nombre mensuel de gel-dégel	Les journées avec un événement de gel/dégel sont celles où la température oscille autour de 0 °C en 24 heures. Plus spécifiquement, un événement quotidien de gel-dégel est observé lorsque $T_{\min}$ de la journée est inférieure à 0 °C et $T_{\max}$ de la même journée est supérieure à 0 °C	$Gel-Dégel_{mois} = \sum_{i=1}^{N_{mois}} (Tx_i > 0^{\circ}C) \text{ et } (Tn_i < 0^{\circ}C)$ Tx_i : Température maximum quotidienne pour une période de 24 heures Tn_i : Température minimum quotidienne pour une période de 24 heures i : une journée donnée N_{mois} : Nombre de jours dans un mois
Degrés jours de de gel et de dégel mensuel	Cumul du nombre de degrés au-dessus de 0 °C et cumul du nombre de degrés-jours au-dessous de 0 °C	$DJDG_{mois} = \sum_{i=1}^{N_{mois}} Tmoy_i - Tbase,0$ $DJG_{mois} = \sum_{i=1}^{N_{mois}} Tbase,0 - Tmoy_i$ $Tmoy_i$: Température moyenne du jour i $Tbase$: Température de base (0 °C) i : une journée donnée N_{mois} : Nombre de jours dans un mois
Degrés-jours de croissance	L'écart, en degrés Celsius, qui sépare la température moyenne quotidienne d'une valeur de base de 5°C. Si la valeur est égale ou inférieure à 5°C, la journée à zéro degré-jour de croissance. Les valeurs quotidiennes de degré-jours sont cumulées sur une base annuelle.	$DJC = \sum_{i=1}^{365} Mas(Tmoy_i - Tbase,5)$ DJC : Le nombre total de degrés-jours de croissance par année $Tmoy_i$: La température moyenne du jour i $Tbase$: La température de base de 5°C i : une journée donnée
Début de la saison de croissance	La saison de croissance débute lorsque la température quotidienne moyenne est égale ou supérieure à 5 °C pendant 5 jours consécutifs à partir du 1 ^{er} mars. (Cette définition est utilisée pour définir les bioclimats du Québec)	$DSC = \min\{j \mid TC5_j > 5^{\circ}C\}$ $TC5_j = (Tmoy(j-4) + Tmoy(j-3) + Tmoy(j-2) + Tmoy(j-1) + Tmoy(j))/5$ j : jour julien 60

		TC5 : température quotidienne au-dessus de 5°C
Fin de la saison de croissance	La saison de croissance se termine quand la température quotidienne moyenne est inférieure à -2 °C à partir du 1 ^{er} août. (Cette définition est utilisée pour définir les bioclimats du Québec)	FSC = Fin de la saison de croissance $FSC = \min\{k \mid T_k < -2 \text{ °C}\}$ k : jour julien 213
Longueur de la saison de croissance	Voir les deux définitions précédentes	$LSC = DSC - FSC$ LSC : La longueur de la saison de croissance DSC = Début de la saison de croissance FSC = Fin de la saison de croissance
Période où la température oscille autour de 0 °C	Nombre de jours où la température passe au-dessus et au-dessous de zéro durant les périodes qui précèdent et qui suivent une période de gel en continu (soit à l'automne et au printemps). La période de gel en continu est définie comme la période la longue de l'année (juillet à juillet) où une moyenne mobile de 30 jours des températures reste sous un seuil de 0 °C	<u>Automne</u> $Automn_0 = DG_{dcont} - DPG_{Tgel}$ <u>Printemps</u> $Print_0 = DDG_{Tgel} - DG_{fcont}$ DPG_{Tgel} = Date du premier gel à l'automne DDG_{Tgel} = Date du dernier gel au printemps DG_{dcont} = Date du début du gel en continu DG_{fcont} = Date de la fin du gel en continu T_{gel} = 0 °C

Quantité de précipitations annuelles	Accumulation des précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de pluie et de neige au courant d'une année	$Ptotales_{ann} = \sum_j^N Pt_j$ Pt_j : Précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de pluie et de neige N : le nombre total de jours dans une année
Quantité de précipitations mensuelles	Accumulations de précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de pluie et de neige au courant d'un mois	$Ptotales_{mois} = \sum_j^{Nmen} Pt_j$ Pt_i : Précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de pluie et de neige $Nmois$: le nombre total de jours dans un mois
Quantité de précipitations liquides et solides mensuelles	Accumulations de précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de pluie ou de neige au courant d'un mois	$Pliquide_{mois} = \sum_j^{Nmen} Pl_j$ $Pslide_{mois} = \sum_j^{Nmen} Ps_j$ Pl_i : Précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de pluie Ps_i : Précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de neige $Nmois$: le nombre total de jours dans un mois
Type de précipitation (fraction neige)	Précipitations quotidiennes (mm) annuelles totales qui tombent sous forme de neige par rapport aux précipitations quotidiennes (mm) annuelles totales	$Fraction_{eau/neige} = \frac{\sum_j^N Pneige_j}{\sum_j^N Ptotales_j}$ $Ptotales_j$: Précipitations quotidiennes totales en mm $Pneige_j$: Précipitations quotidiennes totales en mm qui tombent sous forme de neige

		N : le nombre total de jours dans une année
Début du couvert de neige	Premier jour où l'épaisseur de la neige accumulée au sol est au-dessus d'un seuil donné	$DC_{neige} = \min\{j N_{sol} > N_{début}\}$ $N_{début} : \{5 \text{ mm en EEN}\}$
Fin du couvert de neige	Premier jour où l'épaisseur de la neige accumulée au sol est en dessous d'un seuil donné après le 1 ^{er} mars	$FC_{neige} = \max\{j N_{sol} < N_{fin}\}$ $N_{fin} : \{5 \text{ mm en EEN}\}$
Durée du couvert de neige	Nombre de jours entre le début et la fin du couvert de neige	$LDC_{neige} = DC_{neige} - FC_{neige}$
Maximum d'équivalent en eau de la neige (EEN)	L'équivalent en eau de l'accumulation maximale de neige durant une année	$EEN_{max} = \max(P_{neige} / \text{Densité}_{neige})$ $P_{neige} = \text{Précipitations de neige}$ $\text{Densité}_{neige} = \text{Densité de la neige, soit la masse de la neige/volume occupé (souvent 10 aux stations)}$

2.2 Bioclimats

Une bonne information cartographique d'un territoire est un outil souvent indispensable afin de procéder à l'aménagement de ce territoire et évaluer ses capacités et sensibilités écologiques. Au Québec, trois principales ressources sont disponibles à cette fin. La première est le cadre écologique de référence (CER) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

(MDDELCC), aussi communément appelé le cadre écologique du Québec (CERQ¹). Il s'agit d'une classification cartographique fondée principalement sur les formes de terrains, sur leur organisation spatiale et sur la configuration du réseau hydrographique. Ces variables écologiques sont dites permanentes, c'est-à-dire qu'elles ne changent pas, ou très peu, dans le temps. La deuxième est le système hiérarchique de classification écologique du territoire du MFFP (<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp>). Cette cartographie détaille les différentes zones de végétation du territoire québécois.

Une troisième ressource particulièrement utile pour la planification du territoire est la cartographie des bioclimats du Québec (Gerardin et McKenney 2001). Il existe plusieurs classifications mondiales des bioclimats; celle utilisée au Québec est basée sur la méthode de Litynski (1988), fondée sur la température moyenne annuelle (C), les précipitations totales annuelles (mm) et la durée de la saison de croissance (jours). Une seule cartographie des bioclimats du Québec a été effectuée jusqu'ici, soit en 2001 par Gerardin et McKenney². Cet exercice reposait sur une interpolation spatiale de données climatiques des stations météorologiques du MDDELCC pour la période 1966-1996. Gerardin et McKenney ont en premier lieu effectué une catégorisation du climat québécois basée sur neuf variables climatiques, résultant en une classification en 15 régions climatiques (figure 2). À la suite de cette classification, un regroupement a été effectué à l'aide de trois variables climatiques selon la classification mondiale de Litynski, résultant en un décompte final de 12 classes, présentées en haut à gauche sur la figure 2.

La révision de la carte des bioclimats dans le cadre du présent projet permettra non seulement d'actualiser la classification avec une information climatique plus récente tenant compte de l'évolution du climat (1981-2010), mais aussi d'inclure de nouvelles sources de données qui pourraient permettre de raffiner la distribution des bioclimats.

¹ Pour en savoir plus sur le CER voir le site : http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/biodiversite/cadre-ecologique/rapports/cer_partie_1.pdf

² Pour en savoir plus sur la classification climatique du Québec voir le site : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/classification/>

Quatre bioclimats sont identifiés pour la région à l'étude au nord du 55°. La zone la plus au nord est caractérisée par des températures polaires (-9.4 à -6.0 °C), un régime de précipitations semi-aride (250 à 469 mm) et une saison de croissance très courte (90 à 119 jours). La zone la plus au sud du Nunavik est caractérisée par des températures subpolaires froides (-5.9 à -1.5 °C), par des précipitations modérées (470 à 799 mm) et par une saison de croissance très courte (90 à 119 jours). La troisième zone, qui se situe dans la portion est de la zone d'étude, en bordure avec le Labrador est caractérisée par des températures polaires (-9.4 à -6.0 °C), par un régime de précipitations modérées (470 à 799 mm) et par une saison de croissance courte (120 à 149 jours).

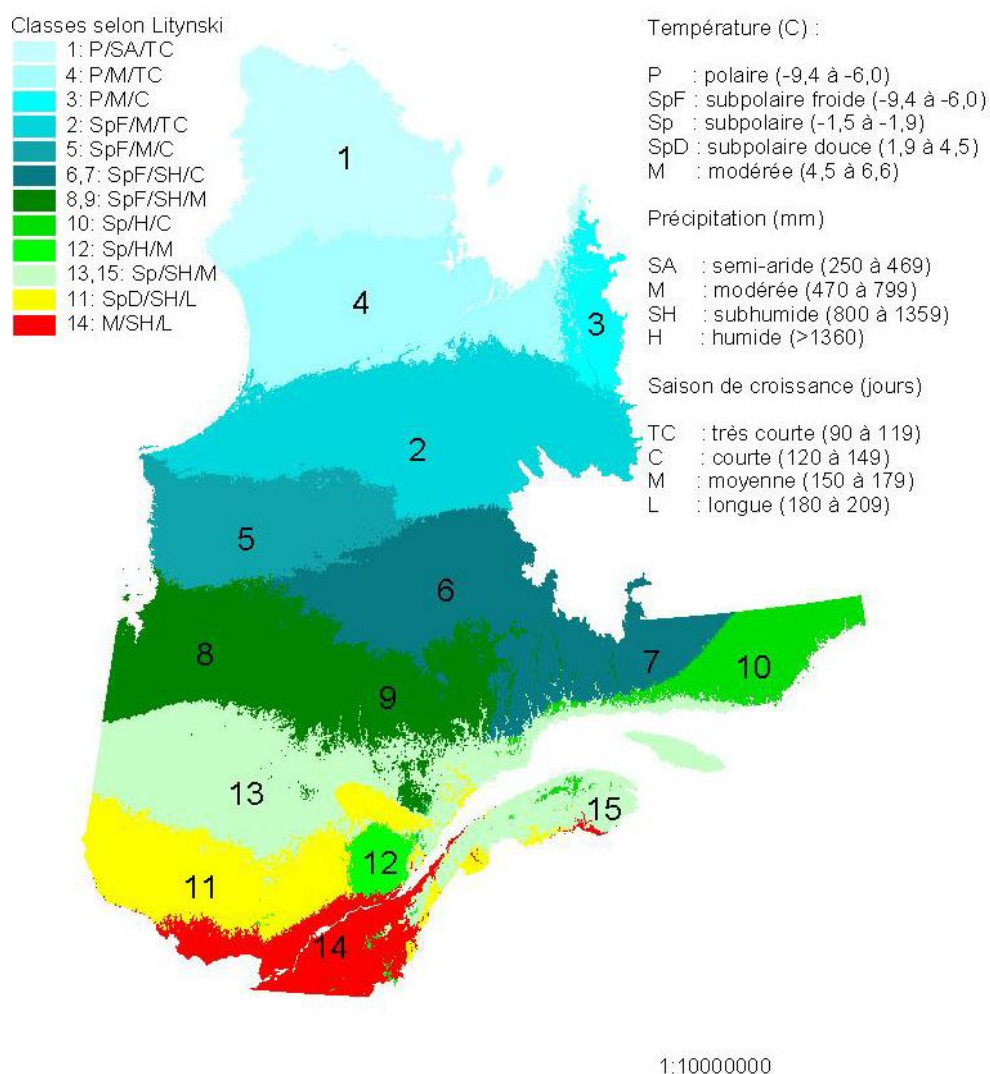


Figure 2. Classification climatique du Québec tirée de Gerardin et McKenney (2001). Notez que bien que la carte présente 15 classes, ces classes ont été regroupées en 12 régions climatiques selon la classification mondiale de Litynski.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

3.1 Période sélectionnée pour le climat de référence

La période de temps retenue dans cette étude pour décrire le climat de référence du Nunavik va de 1981 à 2010. Ce choix découle en partie du fait que les données de réanalyses sélectionnées ne sont disponibles qu'à compter de 1979 (tableau 2). De plus, cette période représente l'horizon temporel sur lequel les normales climatiques sont maintenant calculées selon les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Elle est, par exemple, utilisée par le MDDELCC pour cartographier les normales climatiques du Québec qui sont disponibles en ligne sur le site de surveillance du climat (<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/normales/>).

3.2 Sélection des jeux de données – températures et précipitations

Le premier objectif de ce projet était d'évaluer la pertinence et l'utilité des différents jeux de données disponibles sur la région du Nunavik. Les jeux de données diffèrent, entre autres, par leurs résolutions temporelles et spatiales, et certaines d'entre elles pouvaient s'avérer moins intéressantes pour une analyse du climat sur le nord du Québec. De plus, la représentativité des données par rapport aux stations d'observations n'est pas forcément équivalente et elle se devait d'être évaluée à la pièce. La sélection finale des jeux de données pour l'analyse et la cartographie des indicateurs s'est faite en deux grandes étapes.

3.2.1 Résolution et vintage des jeux de données

Premièrement, les données sur des grilles ayant des tuiles de plus de 100 km de côté ont été éliminées puisqu'une telle résolution génère seulement deux ou trois tuiles sur la région à l'étude ce qui s'avère très peu avantageux comparativement aux jeux de données à plus fine résolution. Cette étape a conduit à l'élimination des données interpolées suivantes : GPCP v2, HadCRUT3v, CRUTEM4v, GISTEMP ainsi que des réanalyses NCEP2 et 20CR. Deuxièmement, la série GPCCv6, qui n'offre que des données de précipitations

mensuelles a aussi été retirée compte tenu du faible nombre d'indices climatiques d'intérêt pouvant être calculés avec ces données.

Suite à ce premier tri, nous avons retranché les données de réanalyses provenant d'anciennes versions. Ce faisant, la série NARR a été éliminée, car elle est maintenant remplacée par la série CFSR. On note que le jeu de données NCEP2, déjà éliminé à cause de sa résolution spatiale, est aussi dorénavant remplacé par CFSR. Le jeu de données ERA40 est aussi éliminé, puisqu'il représente une version antérieure à la série ERA-Interim et qu'il offre une couverture de données plus discontinue ainsi qu'une résolution grossière lorsque comparé à la version plus récente (Rapaic et al. 2015). Enfin, le jeu de données JRA25 a été remplacé par une version plus récente, soit JRA55.

3.2.2 Validation avec les données aux stations

L'étape finale de sélection des jeux de données consistait à valider chacun des jeux de données avec les données aux stations météorologiques du réseau CLIMATOLOGIE du MDDELCC.

Pour cette comparaison, des données quotidiennes de températures et de précipitations étaient disponibles pour 46 stations (figure 3). Parmi cet ensemble, les données de quatre stations sont partagées avec Environnement Canada et sont utilisées pour construire les fichiers de données interpolées (ex. CANDGRD et NRCan). Par conséquent, elles ne peuvent pas être considérées indépendantes de ces jeux de données et être utilisées comme critère de validation.

Bien que les données quotidiennes de 42 stations météorologiques demeuraient disponibles, plusieurs séries n'étaient pas complètes et ne couvraient pas nécessairement les mêmes années. Des critères de sélection ont dû être imposés afin de trouver des séries aux stations dites «valides». Le premier critère consistait à conserver uniquement les années ayant moins de 20 % de données manquantes pour une période d'enregistrement annuelle. Ensuite, une série valide a été définie comme une série ayant au moins dix années valides, qu'elles soient consécutives ou non, et qui recoupaient les années

disponibles pour les différents jeux de données. Le but était de maximiser le nombre de séries aux stations qui pouvait être utilisé pour la validation. La résultante est donc un ensemble de stations ayant des séries valides spécifiques à chacun des jeux de données interpolées et de réanalyses. En effet, le nombre de séries valides n'est pas nécessairement le même pour chacune des stations et il diffère aussi dépendamment du jeu de données avec lequel les séries valides sont comparées.

Une fois les séries valides obtenues, elles ont été comparées au point de grille le plus près pour chacun des jeux de données alternatives. Trois indicateurs couramment utilisés pour comparer des données de stations à des données alternatives ont été calculés. Le premier est le coefficient de corrélation (r), le deuxième est l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*, RMSE), et le troisième est l'écart-type normalisé, soit l'écart-type du jeu de données divisé par l'écart-type des données stations ($\sigma_{\text{jeu}}/\sigma_{\text{station}}$). Les comparaisons sont faites à partir des valeurs de températures et de précipitations mensuelles moyennes.

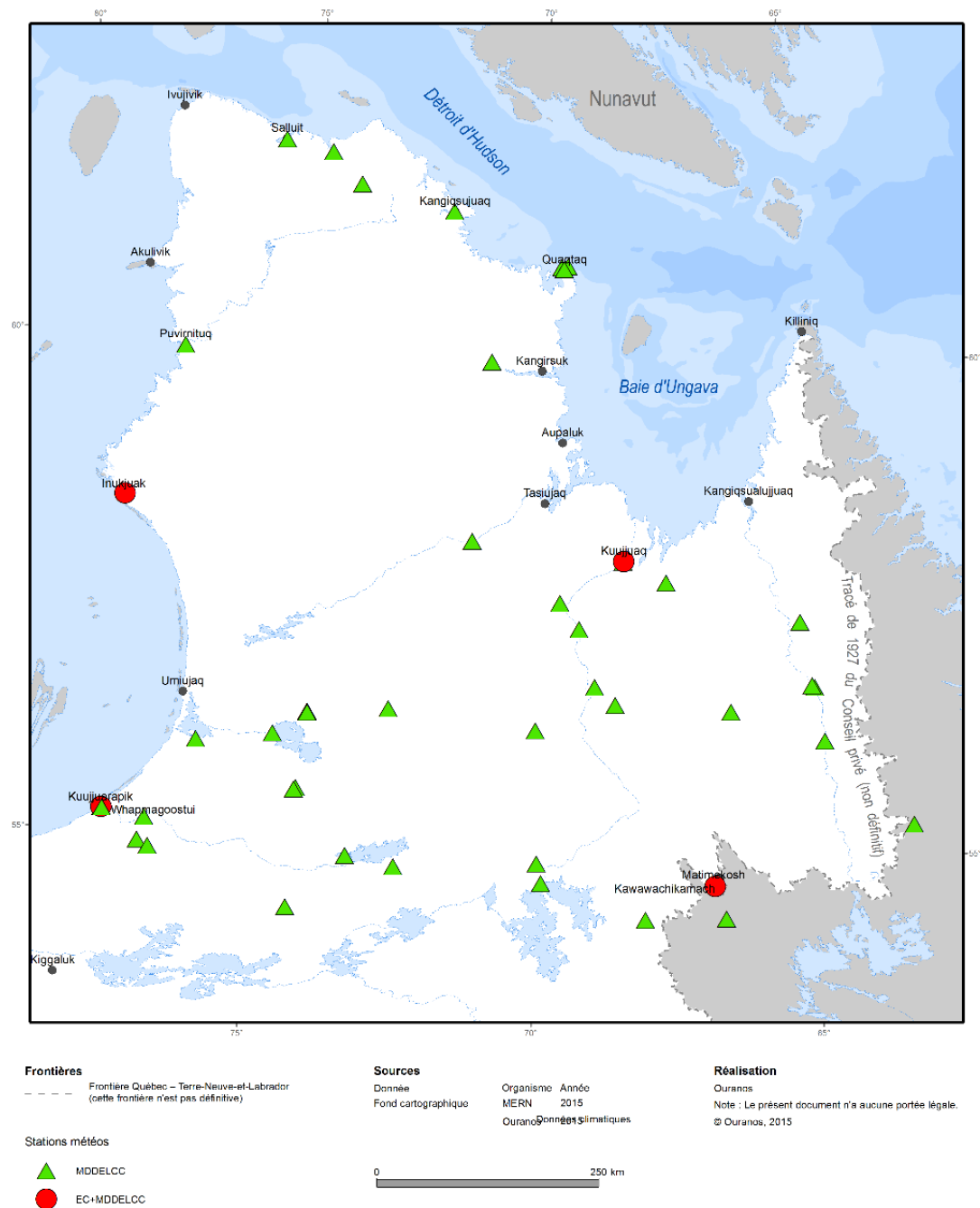


Figure 3. Distribution des 46 stations du réseau MDDELCC disponibles dans la région à l'étude. Seules les stations indépendantes en vert sont utilisées pour la validation.

3.3 Sélection des jeux de données – couvert de neige

L'analyse des bases de données du couvert nival n'a pas suivi exactement la même méthodologie que celle utilisée pour les données de températures et de précipitations. Le premier tri basé sur la résolution spatiale et temporelle des jeux de données est resté le même. Ce processus a permis d'éliminer la série NCEP, disponible sur une grille de 200 km. De plus, les séries B2003, HQ et CMC (snow depth analysis) ont été éliminées dû au manque de données sur la période de référence à l'étude.

L'étape consistant à comparer les jeux de données sur grille aux données aux stations n'a pas été effectuée pour le couvert de neige, car il a été démontré que ce dernier est beaucoup trop hétérogène sur le territoire (Mudryk et al. 2015). Autrement dit, une valeur à une station ne peut représenter adéquatement une valeur moyennée sur un point de grille, car l'accumulation de neige peut varier de façon très importante sur quelques mètres. La validation des données sur grille devrait ainsi reposer sur plusieurs mesures à l'intérieur d'un point de grille, chose impossible dans le cas présent.

De plus, dix stations de réseau du MDDELCC offraient des données de neige sur le territoire à l'étude. Par contre, de ces dix stations, seulement deux stations avaient des séries disponibles qui : 1) correspondaient aux mêmes années que celles disponibles dans les jeux de données Liston-Hiemstra et Brown-Derksen et 2) remplissaient les critères de données valides établies, soit de conserver uniquement les années ayant moins de 20 % de données manquantes pour une période d'enregistrement annuelle et de définir une série valide comme ayant au moins dix années valides. Il était par conséquent très difficile de valider les jeux de données avec les données aux stations.

Mudryk et al. (2015) propose cependant une autre approche, adoptée ici, qui consiste à comparer les réanalyses entre elles afin d'évaluer leurs similitudes et les écarts entre leurs valeurs respectives. Ceci permet d'éliminer les réanalyses qui présentent des écarts trop importants face aux autres. On obtient au final un ensemble de jeux de données pouvant

être utilisé pour caractériser la neige sur le territoire. Il faut toutefois noter que faute d'observations terrains suffisantes, l'accord entre les jeux de données ne veut pas forcément dire qu'ils représentent plus adéquatement la réalité.

La comparaison entre les jeux de données conservés de la liste d'origine (GlobSnow, MERRA, ERA-Interim, CFSR, Brown-Derksen et Liston-Hiemstra) a été effectuée en analysant les séries temporelles annuelles des quatre indicateurs climatiques reliés à la neige choisis pour ce projet, soit l'équivalent en eau de la neige, le début, la fin et la durée de l'enneigement. Les séries temporelles de ces variables sont comparées pour les différentes régions bioclimatiques identifiées à travers ce projet (voir sections 3.5 et 4.4). L'agrégation spatiale des données a été faite parce que la qualité des bases de données de neige est très hétérogène dans le nord. Il faut rappeler que les réanalyses assimilent les données aux stations et que celles-ci sont très rares sur l'extrême nord du territoire (voir section 1.1). En analysant les jeux de données par bioclimats, il nous était possible de mieux évaluer l'ampleur de ce problème.

3.4 Formats de présentation des indicateurs climatiques

3.4.1 Cartographie

Un des livrables principaux de ce projet était la production de cartes pour les indicateurs climatiques d'intérêt. L'interpolation des indicateurs a été faite sur une grille commune de 50 km, un compromis adéquat entre les résolutions des jeux de données retenus.

Suite à une consultation auprès des membres du comité de suivi du projet, il a été décidé que les cartes présenteraient les moyennes des jeux de données sélectionnés. Afin d'illustrer les marges d'erreur autour de la moyenne, nous présentons aussi des cartes des écarts-types entre les jeux de données. Il faut noter que l'ajout des cartes d'écarts-types a fait l'objet de nombreuses discussions avec le comité de suivi. Il est clair que cette information peut paraître complexe, par contre, il nous apparaissait primordial de présenter les divergences entre les jeux de données afin de bien apprécier l'incertitude associée aux cartes produites.

Les cartes ont été préparées selon les recommandations de la direction générale de l'information géographique du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Toutes les données ayant servi à produire les cartes du projet ont été transférées au MFFP ainsi qu'au MERN sous forme de fichiers SIG.

3.4.2 Tableau synthèse et séries temporelles

En complément aux cartes produites dans le projet, un tableau synthèse ainsi que des figures présentant les valeurs annuelles des variables et indicateurs climatiques ont été préparés. Le tableau synthèse collige les résultats de tous les indicateurs pour l'ensemble de la région à l'étude et donne une vue d'ensemble du climat de l'horizon 1981-2020 au nord du 55°. Pour chaque indice climatique, le tableau présente une moyenne des jeux de données sélectionnés ainsi que l'écart-type entre les jeux de données. Quant aux figures, elles illustrent les valeurs annuelles des indicateurs climatiques moyennées sur la région à l'étude, et ce pour chaque jeu de données moyennées. Ces figures permettent d'apprécier la variabilité interannuelle ainsi que l'évolution des indicateurs dans le temps.

3.5 Distribution des bioclimats

La distribution des bioclimats est revue par le présent projet afin de tenir compte des données climatiques plus récentes et permettant potentiellement de mieux caractériser les patrons spatiaux du climat nordique québécois. Bien qu'une autre classification climatique mondiale aurait pu être utilisée pour revoir la distribution des bioclimats du Québec, soit celle de Köppen-Geiger (par exemple Kottek et al. 2006), il a été jugé plus pertinent de revoir les bioclimats du Québec en utilisant la classification de Litynski utilisée par Gerardin et McKenney (2001) (figure 2). Cette dernière offre l'avantage de tenir compte de variables de type plus biologique ou écologique comme la longueur de la saison de croissance, un élément jugé important dans la planification territoriale. De plus, la conservation de la méthode antérieure permettra de comparer plus facilement la nouvelle distribution avec la précédente.

La méthodologie adoptée par Litynski (1988) est fondée sur trois variables et indicateurs climatiques, soit la température moyenne annuelle, les précipitations totales annuelles et la longueur de la saison de croissance. Les catégories utilisés sont les mêmes que celles présentées à la figure 2 et repris au tableau 6.

Les bases de données utilisées sont celles décrites à la section 3.1. La cartographie individuelle des trois variables d'intérêt est réalisée sur une grille de 50 km de côté (tel qu'expliqué à la section 3.4.1). Une classe de température, de précipitation et de saison de croissance est ensuite attribuée à chaque point de grille selon les valeurs présentées au tableau 6.

Tableau 6 *Caractéristiques sommaires de la classification de Litynski (tirées de Gerardin et McKenney 2001).*

Température (C)		Précipitation (mm)		Saison de croissance (jours)	
P : polaire	-9.4 à -6.0	SA : semi-aride	250 à 469	TC : très courte	90 à 119
SpF : subpolaire froide	-5.9 à -1.5	M : modérée	470 à 799	C : courte	120 à 149
Sp : subpolaire	-1.4 à 1.9	SH : subhumide	800 à 1359	M : moyenne	150 à 179
SpD : subpolaire douce	2.0 à 4.5	H : humide	>1360	L : longue	180 à 209
M : modérée	4.6 à 6.6				

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS

4.1 Sélection des jeux de données – températures et précipitations

Les figures 4 et 5 présentent les résultats de validation entre les données aux stations du MDDELCC et les jeux de données alternatives. Chaque ligne de couleur représente la comparaison entre une série valide d'une station indépendante et la série du point de

grille le plus près tiré du jeu de données alternatives; les lignes noires représentent la combinaison parfaite (corrélation de 1, RMSE de 0, et écart-type normalisé de 1).

Pour les températures mensuelles moyennes (figure 4), les comparaisons entre les huit jeux de données, soit interpolées ou de réanalyses, sont sensiblement similaires. En effet, plusieurs lignes de couleurs se retrouvent très près (sinon par-dessus) la ligne noire de corrélation parfaite. Il n'y a que quelques stations où les erreurs (RMSE) sont plus élevées, les corrélations sont plus faibles et l'écart-type normalisé est plus petit (une indication que le jeu de données sous-estime la variance) ou plus grand (une indication que le jeu de données surestime la variance). Toutefois, il faut noter que le nombre de stations indépendantes ayant des séries valides pour cette variable est très faible, il varie entre $n=6$ et $n=8$.

Pour les précipitations mensuelles moyennes (figure 5), les similitudes entre les données aux stations du MDDELCC et les jeux de données alternatives sont moins élevées, tel que le montrent les plus faibles corrélations, les plus grandes erreurs RMSE et le plus grand nombre d'écarts normalisés qui diffère de 1. Ceci n'est pas très surprenant, étant donné que les précipitations présentent généralement une plus grande variabilité spatiale que les températures. En d'autres mots, la similitude entre les précipitations à une station et les précipitations moyennées sur une tuile relativement grande ne peut pas être très élevée. Les quatre jeux de données interpolées présentent de plus grandes variations dans les valeurs RMSE que les quatre réanalyses. Ces variations plus importantes suggèrent que pour certaines stations, les valeurs interpolées sont bonnes (similaires aux valeurs observées), tandis que pour d'autres elles sont mauvaises (différentes des valeurs observées). D'un autre côté, les RMSE des jeux des réanalyses présentent de plus faibles variations, une indication que la similitude entre les données aux stations et les points de grille est toujours sensiblement la même.

Plusieurs points sont à considérer afin de sélectionner les jeux de données. Premièrement, la figure 4 indique qu'en général les jeux de données interpolées et les réanalyses représentent très bien les températures observées. Il n'est pas possible, à

partir de cette analyse, de favoriser ou d'éliminer un jeu de données de l'ensemble. Par contre, la validation sur les précipitations révèle que les réanalyses offrent un certain avantage, étant donné leur plus grande similitude avec les données de stations indépendantes (figure 5). De plus, il faut considérer que la grande majorité des indicateurs d'intérêt (sauf les températures et précipitations mensuelles, tableau 5) requièrent des données climatiques quotidiennes pour leur calcul. Or, trois des jeux de données interpolées, soit CANGRD, CRU TS3.1 et Willmott-Matsuura, n'offrent que des données mensuelles. Considérant, de surcroît, la faible performance de ces jeux de données lorsqu'on les compare aux stations indépendantes, il a été décidé d'éliminer ces jeux de données même pour la caractérisation des températures et des précipitations mensuelles. L'inclusion ou non du jeu de données RNCAN était plus incertain et l'opinion du comité de suivi a été sondée lors d'une réunion en date du 11 juin 2015. Il a alors été décidé d'éliminer cette série étant donné, entre autres, sa faible performance avec les précipitations et de ne conserver que les quatre réanalyses pour bâtir le climat de référence pour ce projet.

4.2 Sélection des jeux de données – couvert de neige

La comparaison entre les réanalyses disponibles pour le couvert de neige a été effectuée pour les régions bioclimatiques identifiées à la figure 21. Nous présentons ici les résultats des quatre plus grandes régions sur le territoire à l'étude bien que toutes les analyses soient disponibles dans le tome 2 du rapport.

Les figures 6 à 9 présentent une comparaison entre les séries temporelles de sept réanalyses en termes du maximum d'équivalent en eau de la neige (EEN), ainsi que du début, de la fin et de la durée de l'enneigement. On remarque premièrement, un plus grand consensus entre les bases de données pour l'équivalent en eau de la neige et pour le début de la période d'enneigement que pour la fin et la durée de l'enneigement, et ce pour toutes les régions. On note aussi que le choix final d'un jeu de données sur la neige, basé sur l'analyse de ces courbes, n'est pas simple. Sans données d'observations, il est en effet très difficile de faire une validation. Par conséquent, il faut comprendre que le choix

de conserver ou d'éliminer l'une ou l'autre des bases de données s'est fait parfois de façon quelque peu subjective avec l'appui de Ross Brown, un expert sur ce sujet.

Températures mensuelles

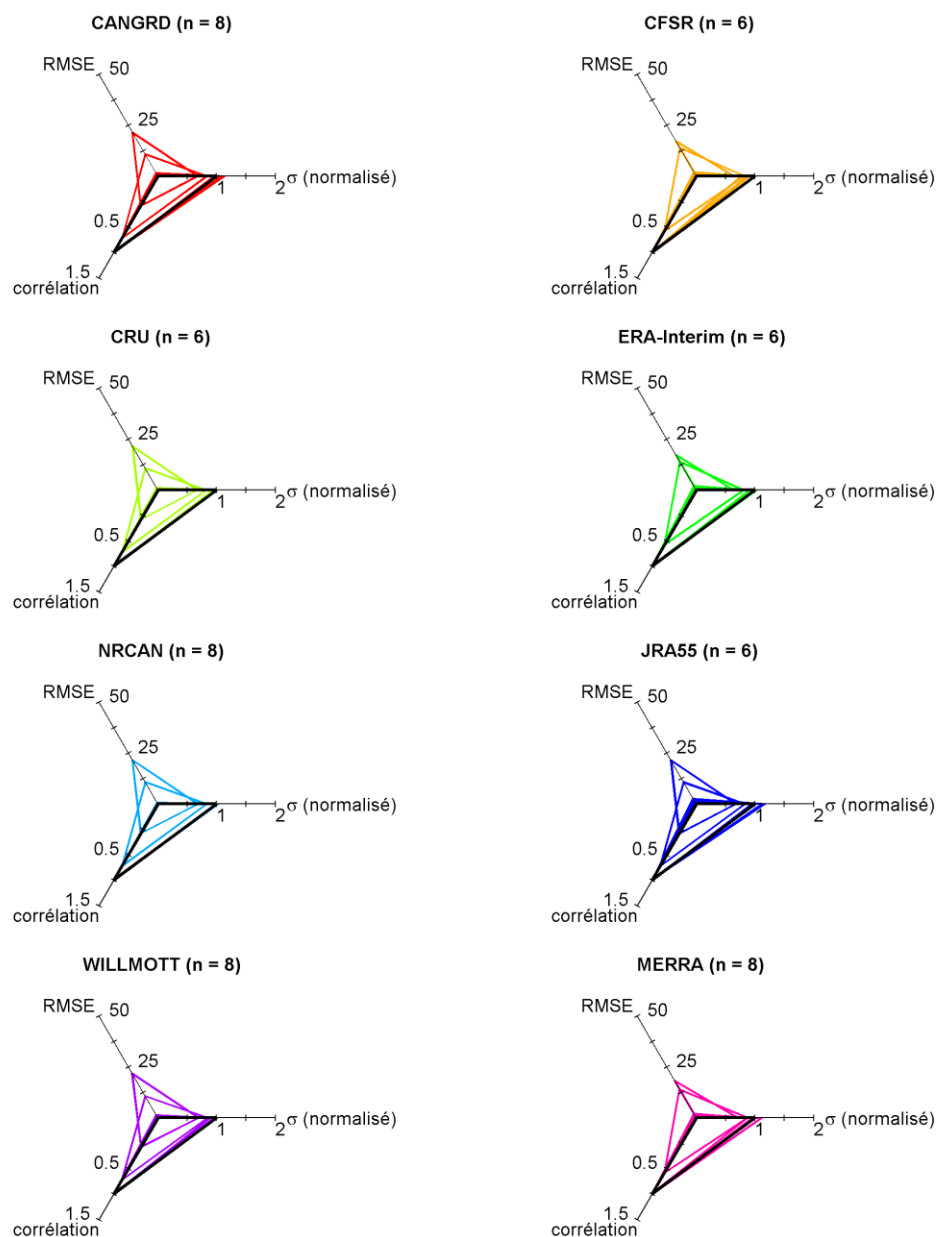


Figure 4. Validation des données alternatives de températures mensuelles moyennes avec les données aux stations du MDDELCC. Le 'n' indique le nombre de séries observées valides pour chaque jeu de données alternatives.

Précipitations mensuelles

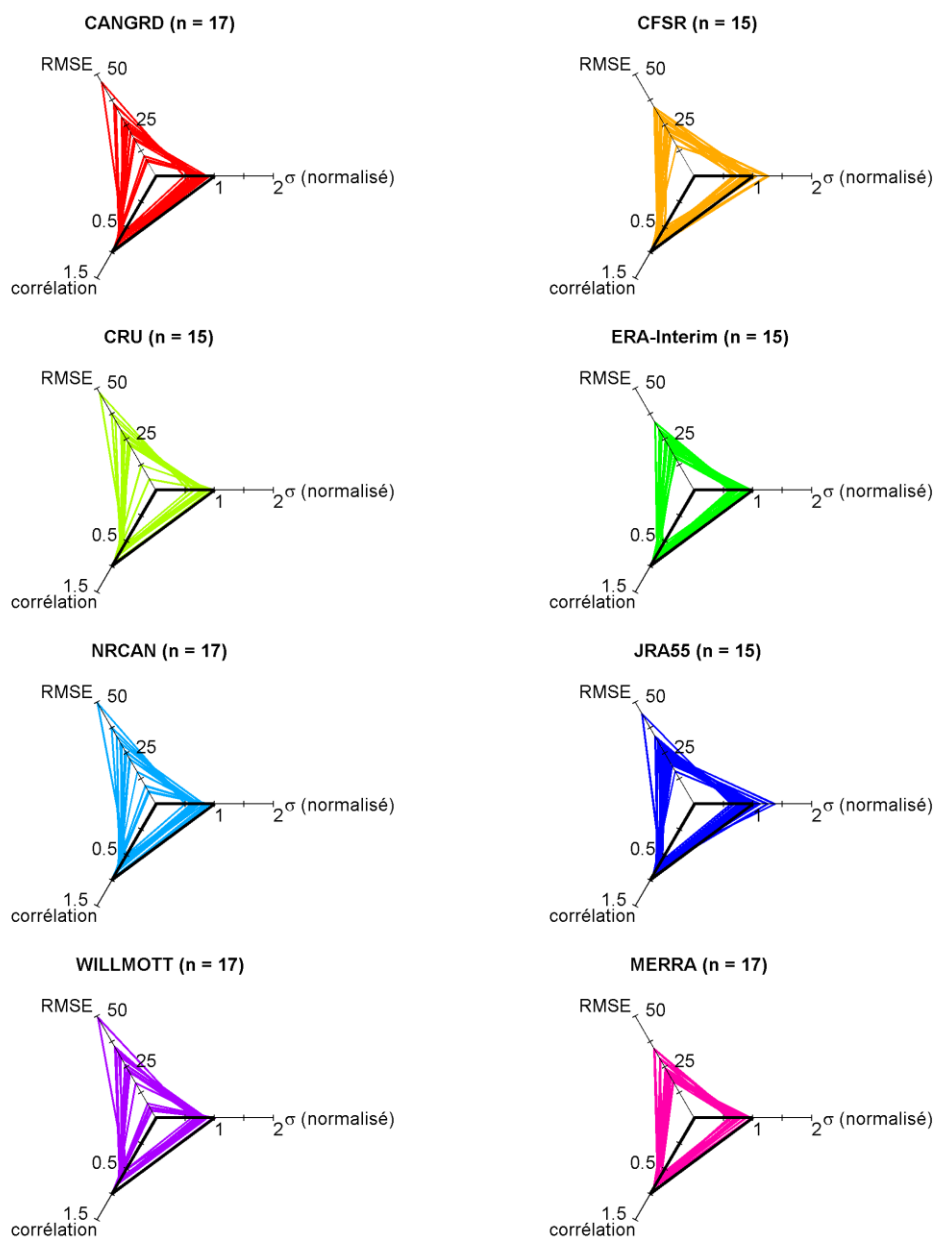


Figure 5. Validation des données alternatives de précipitations mensuelles moyennes avec les données aux stations du MDDELCC. Le 'n' indique le nombre de séries observées valides pour chaque jeu de données alternatives.

La première base de données à être éliminée est la base ERA-Interim, qui n’offre aucune variabilité dans le maximum d’équivalent en eau de la neige, particulièrement pour les régions plus au nord. En d’autres mots, cette réanalyse produit essentiellement la même valeur en EEN pour chacune des années entre 1981 et 2010. La base de données CFSR est aussi écartée de la liste étant donné l’uniformité et la faiblesse des valeurs d’EEN qu’elle produit. Une troisième série à être éliminée est JRA55, car les valeurs de EEN produites pour les 15 premières années à l’étude sont beaucoup trop élevées, particulièrement pour les 2 régions les plus au nord. La base de données GlobSnow est aussi retranchée parce qu’elle ne reproduit pas adéquatement le début de l’enneigement, résultant en des valeurs aberrantes de la durée du couvert de neige. Ce problème avait déjà été identifié par Takala et al. (2011) au Canada.

Ces choix ont donc conduit à un ensemble de trois bases de données du couvert de neige, soit MERRA, Liston-Hiemstra et Brown-Derksen. Cependant, tel que précisé à la section 2.1, la base de données Liston-Hiemstra utilise les données MERRA afin de piloter un modèle de neige, il était donc répétitif d’inclure les deux jeux de données, d’autant plus que l’étude de Liston et Hiemstra (2011) suggère que les valeurs de leur modèle de neige sont beaucoup plus réalistes que celles de MERRA.

Par conséquent, seules les bases de données Liston-Hiemstra et Brown-Derksen sont retenues pour produire les cartes de couvert de neige sur le territoire. Dans ce cas, au lieu de présenter la moyenne des deux séries et les écarts-types, nous présenterons plutôt les deux jeux de données séparément.

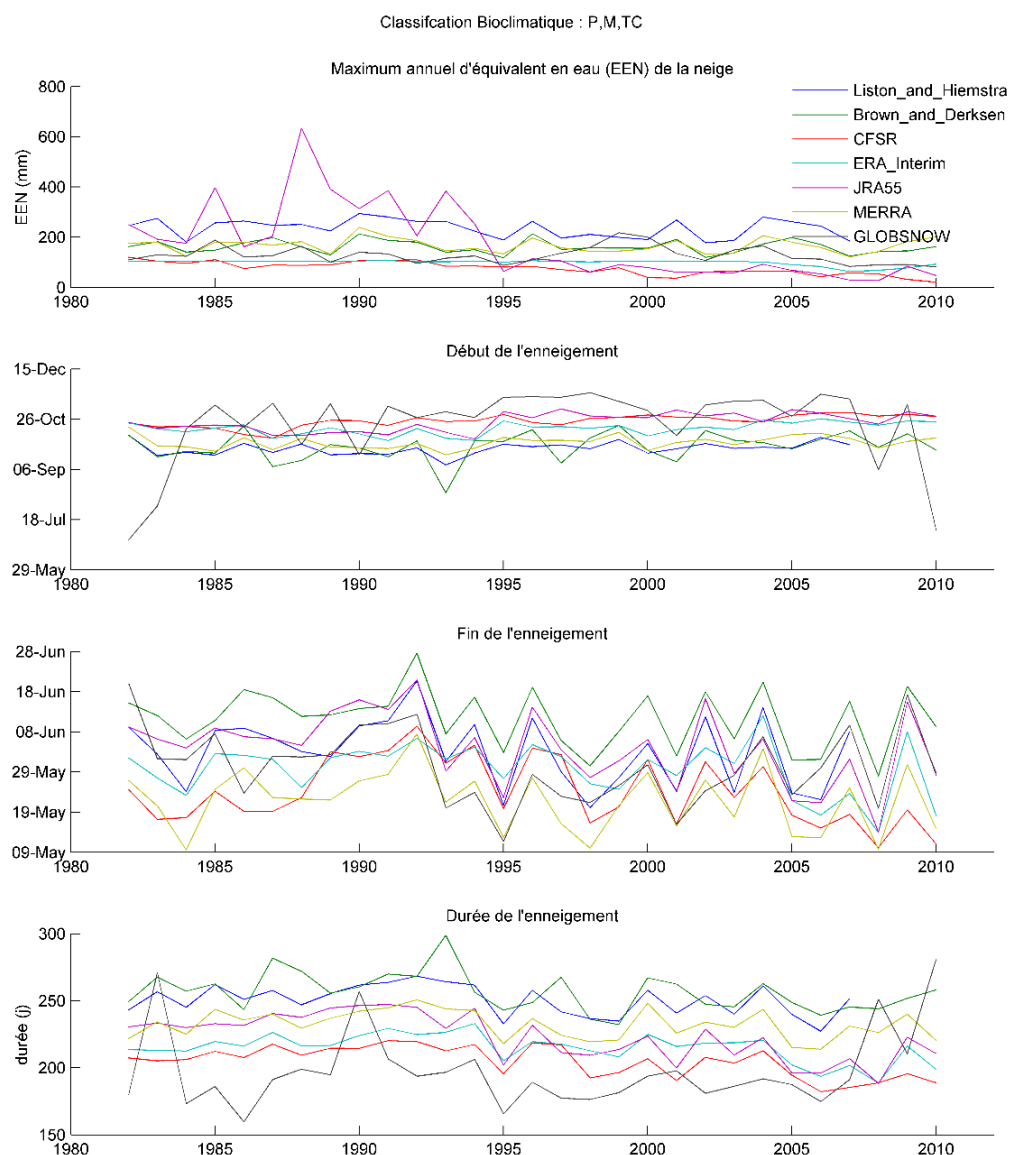


Figure 6. Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région au nord approximativement du 59°. Le bioclimat correspond à cette région est présenté à la figure 21.

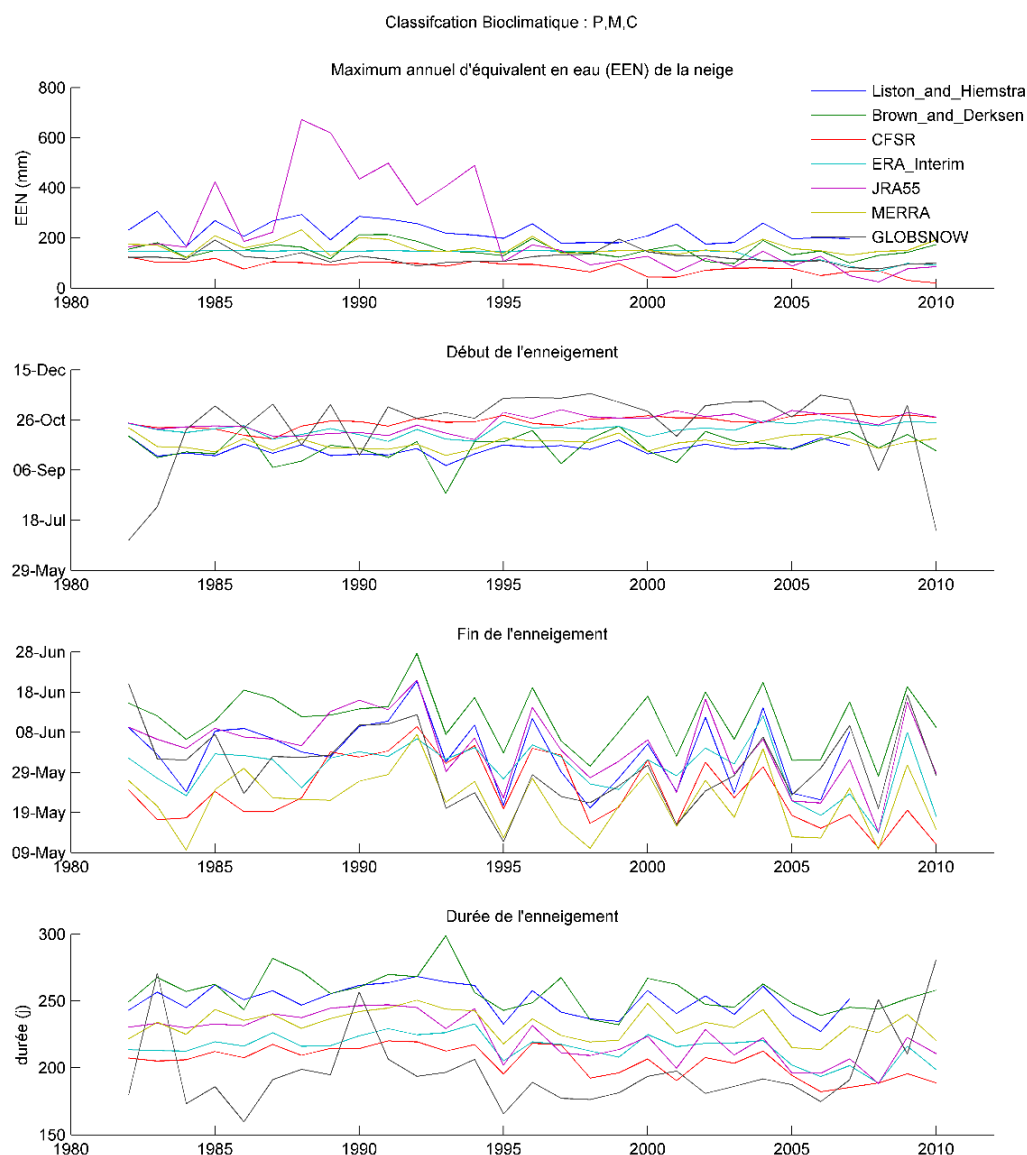


Figure 7. Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région entre le 58° et 59°. Le bioclimat correspondant à cette région est présenté à la figure 21.

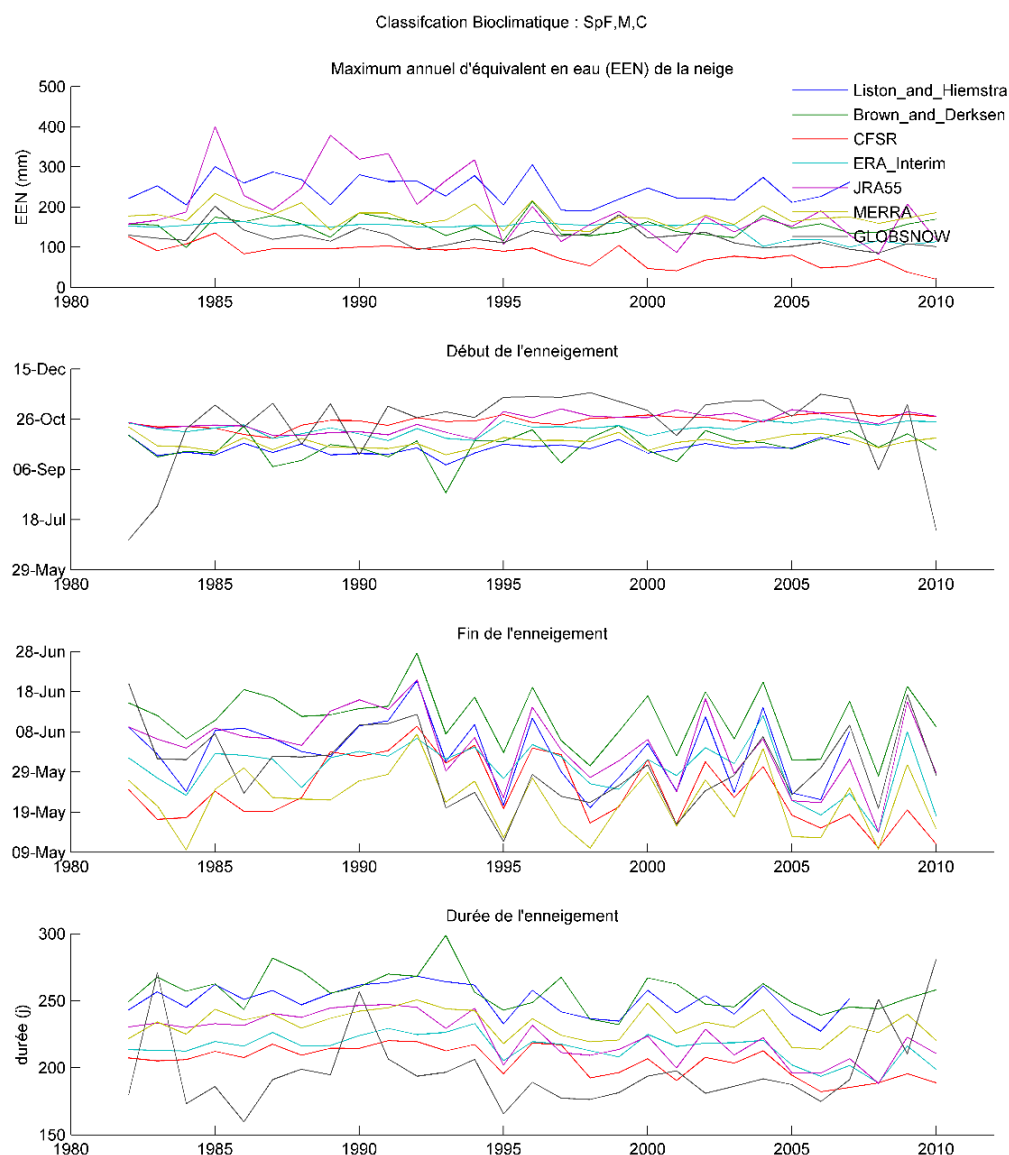


Figure 8. Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région entre le 56° et 58°. Le bioclimat correspondant à cette région est présenté à la figure 21.

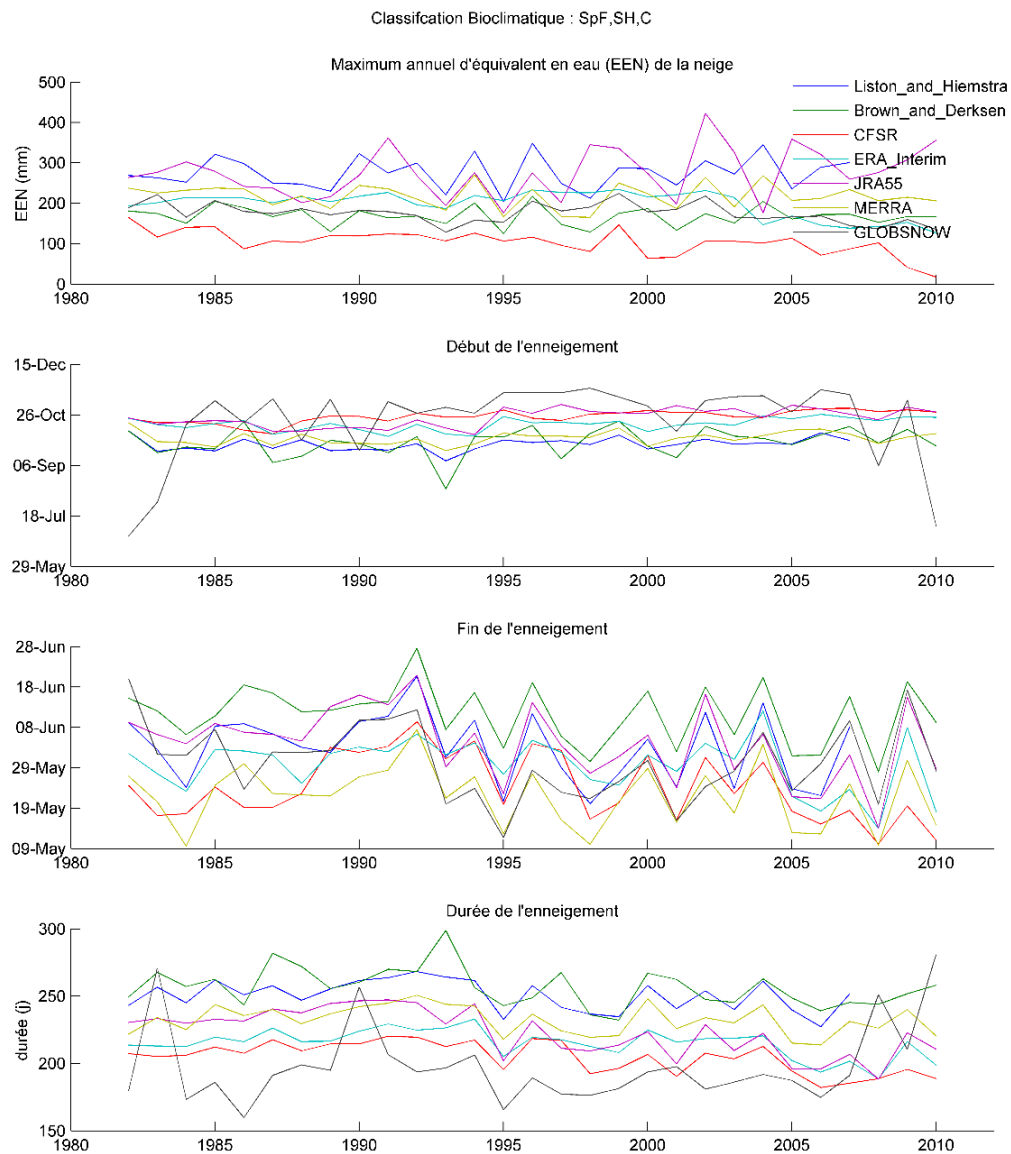


Figure 9. Comparaison de l'évolution de quatre variables de neige (équivalent en eau de la neige, début, fin et durée de l'enneigement) entre sept réanalyses disponibles pour la région entre le 55° et 56°. Le bioclimat correspondant à cette région est présenté à la figure 21.

4.3 Description du climat du passé récent au Nunavik

La section qui suit présente un résumé de l'analyse des indicateurs climatiques qui ont été calculés à l'aide des données alternatives sélectionnées. Le tableau 5 permet de constater qu'un grand nombre d'indicateurs climatiques sont à l'étude, et, de surcroît, plusieurs d'entre eux doivent être présentés sur une base mensuelle. La cartographie de tous ces indicateurs a conduit à la production d'un total de 121 cartes, auxquelles s'ajoutent des figures présentant les séries temporelles. Étant donné qu'il ne serait pas utile de décrire ici toutes ces figures, la section qui suit présente une synthèse des résultats. Les tableaux 7a et 7 b présentés offrent d'abord un sommaire de tous les indicateurs climatiques puis les figures 10 à 20 présentent la distribution spatiale des trois indicateurs utilisés pour l'analyse des bioclimats, soit les températures annuelles, les précipitations annuelles et longueur de la saison de croissance, ainsi que les degrés-jours de croissance et quelques indices reliés au couvert de neige. L'ensemble des cartes et figures produites pour ce projet sont disponibles dans le Tome 2 qui accompagne le présent rapport.

Rappelons que toutes les données ayant servi à produire les cartes présentées dans cette section et dans le Tome 2 ont été transférées au MFFP ainsi qu'au MERN sous forme de fichiers SIG.

Tableau 7a Synthèse des indicateurs climatiques à l'étude calculés à partir des variables de températures et de précipitations. Les valeurs représentent la moyenne des quatre réanalyses, moyennées sur tout le territoire au-delà de 55° pour la période 1981-2010, l'écart-type de l'ensemble est donné entre parenthèses.

Période	Températures moyennes (°C)	Nombre de cycles de gel-dégel	Degrés-jours de gel	Degrés-jours de dégel	Degrés-jours de croissance
Annuel	-5.4 (±0.2)	58.0 (±3.6)	3064.9 (±99.2)	1195.7 (±40.5)	566.6 (±28.4)
Janvier	-24.5 (±0.7)	0.1 (±0.1)	750.1 (±18.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)
Février	-23.5 (±0.4)	0.4 (±0.1)	648.3 (±17.0)	0.1 (±0.1)	0.0 (±0.0)
Mars	-17.2 (±0.5)	1.6 (±0.4)	512.5 (±21.8)	0.4 (±0.4)	0.0 (±0.0)
Avril	-8.0 (±0.5)	7.7 (±1.7)	233.7 (±19.0)	5.9 (±4.0)	0.4 (±0.3)
Mai	0.1 (±0.2)	14.7 (±1.2)	61.9 (±4.1)	75.4 (±7.0)	24.6 (±2.6)
Juin	7.2 (±0.4)	8.1 (±0.5)	2.1 (±0.7)	229.5 (±9.6)	107.0 (±5.2)
Juillet	11.3 (±0.3)	0.4 (±0.1)	0.0 (±0.0)	358.2 (±8.2)	205.8 (±8.0)
Août	10.2 (±0.3)	0.5 (±0.1)	0.0 (±0.0)	324.2 (±11.4)	172.0 (±10.9)
Septembre	5.2 (±0.1)	7.2 (±0.6)	2.3 (±0.4)	166.2 (±8.8)	53.0 (±5.9)
Octobre	-0.9 (±0.4)	13.3 (±0.4)	58.6 (±9.3)	34.4 (±5.6)	3.8 (±1.2)
Novembre	-8.3 (±0.9)	3.4 (±0.7)	250.3 (±26.2)	1.4 (±0.7)	0.0 (±0.0)
Décembre	-17.7 (±0.9)	0.6 (±0.2)	545.2 (±26.2)	0.1 (±0.1)	0.0 (±0.0)

Période	Précipitations totales (mm)	Précipitations liquides (mm)	Précipitations solides (mm)	Fraction de neige
Annuel	750.6 (±131.6)	433.0 (±56.8)	317.6 (±79.0)	42.0 (±3.6)
Janvier	33.0 (±6.7)	0.0 (±0.0)	33.0 (±6.7)	99.9 (±0.1)
Février	28.1 (±5.8)	0.2 (±0.1)	27.9 (±5.8)	99.5 (±0.3)
Mars	38.7 (±9.2)	0.8 (±0.5)	38.0 (±9.3)	97.8 (±1.5)
Avril	45.5 (±13.7)	6.2 (±2.8)	39.4 (±13.5)	86.5 (±7.1)
Mai	58.3 (±13.0)	30.7 (±5.2)	27.6 (±8.8)	46.0 (±5.9)
Juin	72.9 (±8.0)	69.2 (±6.0)	3.7 (±2.1)	4.8 (±2.3)
Juillet	85.3 (±8.3)	85.2 (±8.3)	0.1 (±0.1)	0.1 (±0.1)
Août	93.3 (±11.7)	93.2 (±11.7)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)
Septembre	102.2 (±15.3)	97.4 (±14.6)	4.9 (±1.4)	4.7 (±1.2)
Octobre	81.9 (±15.4)	44.5 (±9.3)	37.5 (±8.2)	46.4 (±5.7)
Novembre	66.8 (±15.6)	5.1 (±2.1)	61.7 (±14.9)	92.2 (±3.5)
Décembre	44.6 (±10.0)	0.6 (±0.3)	40 (±10.0)	99.0 (±0.7)

	Saison de croissance	Saison sans gel	Période où la température oscille autour de 0 °C à l'automne	Période où la température oscille autour de 0 °C à au printemps
Début	08-Juin (±1.9)	07-Juin (±1.1)	01-Oct (±1.4)	29-Avr (±1.7)
Fin	10-Oct (±1.9)	01-Oct (±1.4)	26-Oct (±1.5)	07-Juin (±1.1)
Longueur (jours)	124.2 (±1.6)	116.0 (±1.2)	26.3 (±0.7)	40.0 (±2.1)

Tableau 7 b. Synthèse des indicateurs climatiques reliés au couvert nival. Les valeurs représentent la moyenne des jeux de données, moyennées sur tout le territoire au-delà du 55° pour la période 1981-2010. L'écart-type n'est pas calculé étant donné qu'il n'y a que deux jeux de données.

	Liston-Hiemstra	Brown-Dersken
Max ENN	262.1	164.2
Début	24-sept	28-sept
Fin	31-mai	09-juin
Longueur (jours)	250.7	255.4

4.3.1 Température annuelle moyenne

La température annuelle moyenne (figure 10) présente un gradient nord-sud dans toutes les réanalyses, avec des températures de l'ordre de -8 à -10 °C au nord du Nunavik et de -2 à -4 °C au sud du territoire. Les écarts-types inter-réanalyses sont généralement très faibles sur l'ensemble du territoire, une indication que les quatre réanalyses présentent un consensus entre elles. L'écart-type tend toutefois à augmenter à proximité des côtes. Le gradient de température et les faibles valeurs d'écart-type inter-réanalyses sont généralisés aux valeurs de températures pour les douze mois de l'année (Tome 2).

L'évolution des températures moyennes (figure 11) montre une tendance générale à la hausse pour les températures annuelles et mensuelles sur le Nunavik entre 1981 et 2010. Tandis que certains mois présentent une diminution des températures entre 1981 et 1990, par exemple pour le mois de février, tous les mois présentent une augmentation marquée à partir de 1990.

Températures moyennes (annuelle)

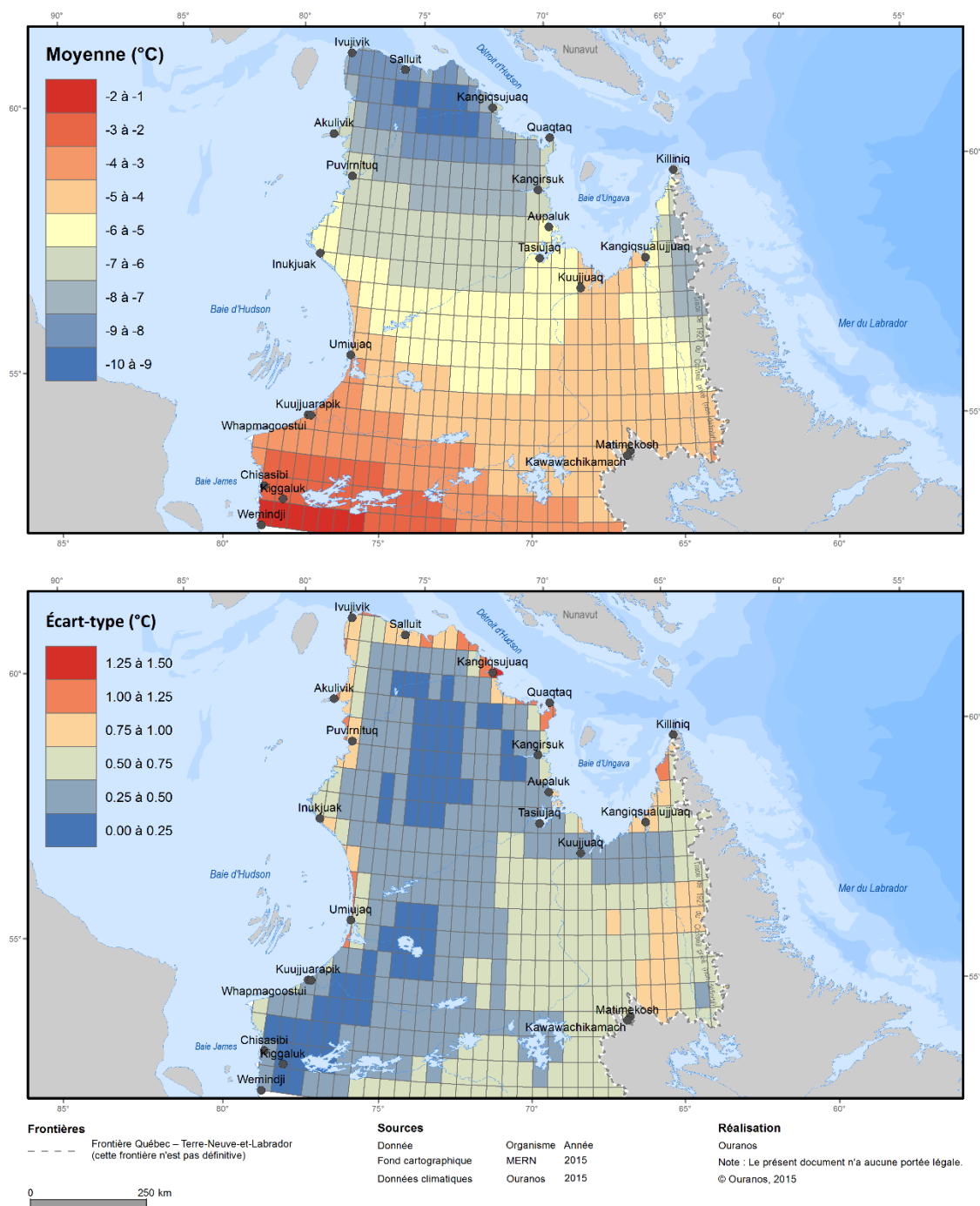


Figure 10. Le panneau du haut présente la moyenne des températures moyennes annuelles (°C), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.

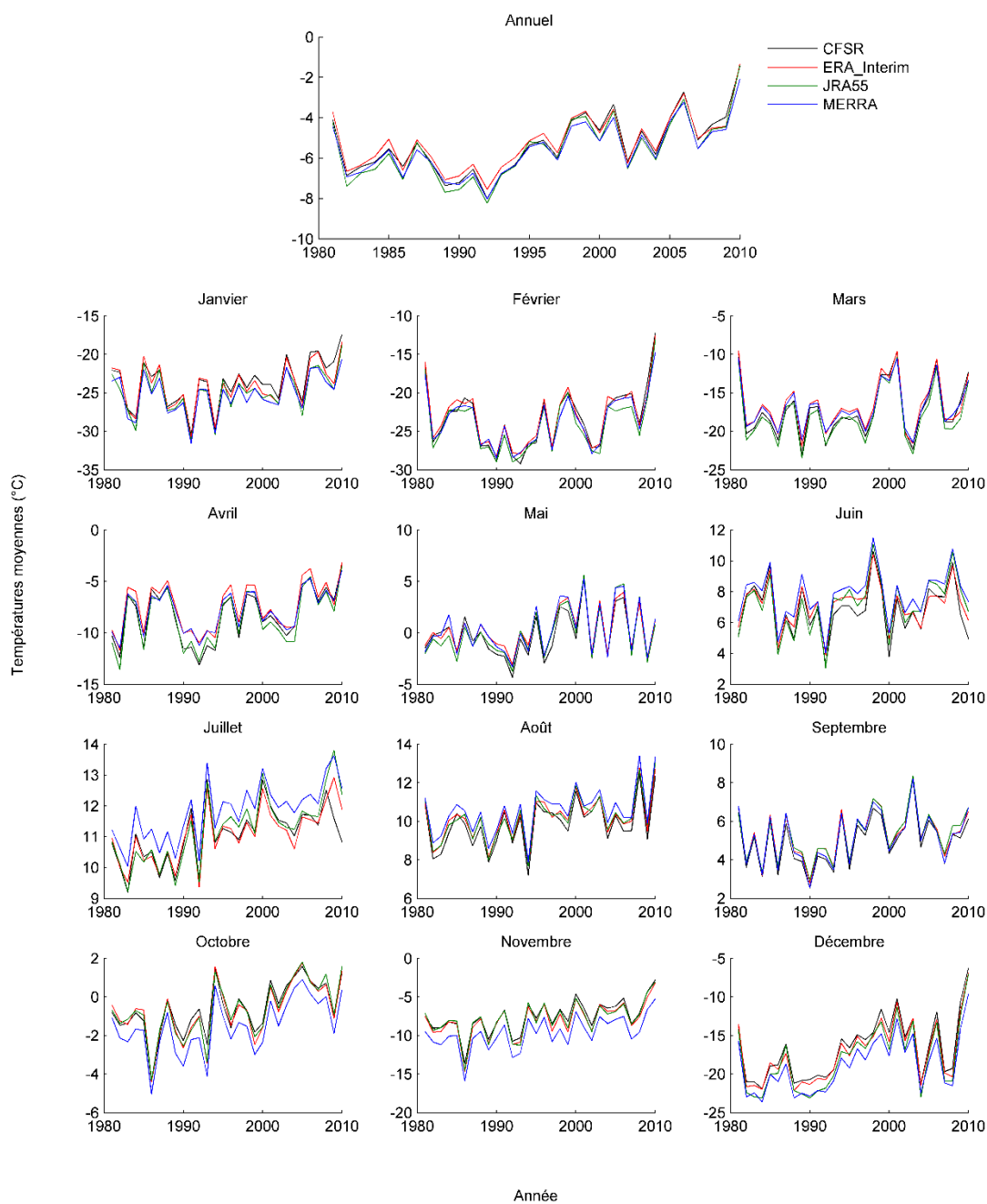


Figure 11. L'évolution des températures moyennes annuelles et mensuelles (°C) selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude.

4.3.2 Précipitations totales annuelles

Les précipitations totales annuelles (figure 12) présentent un gradient similaire aux températures, avec des valeurs plus élevées au sud, de l'ordre de près de 1000 mm et de 450-500 mm au nord. Les écarts-types sont généralement plus importants sur l'ensemble du territoire, mais particulièrement aux abords des Baies James et d'Hudson. Ces variations entre les quatre réanalyses ne sont pas très surprenantes étant donné la plus grande variabilité spatiale des précipitations et la difficulté à simuler cette variable lorsque comparée aux températures. Ce gradient sud-nord des précipitations totales est généralisé aux douze mois de l'année (Tome 2). On note que les précipitations totales sont plus abondantes durant les mois d'été et d'automne que durant les mois d'hiver et de printemps (Tome 2).

En ce qui a trait à l'évolution des précipitations totales, la figure 13 suggère une augmentation des précipitations annuelles sur l'ensemble du territoire pour la période 1981-2010. Il faut noter par contre que, tel que discuté plus haut, les valeurs obtenues par les quatre réanalyses divergent beaucoup plus que pour les températures, avec un écart d'environ 300 mm annuellement entre les deux réanalyses les plus différentes. Les tendances des valeurs mensuelles de précipitations sont quant à elles plus partagées, avec certains mois affichant des augmentations, tel que les mois de juillet à décembre, tandis que les autres mois présentent des changements plus variables entre 1981-2010.

Précipitations totales (annuelle)

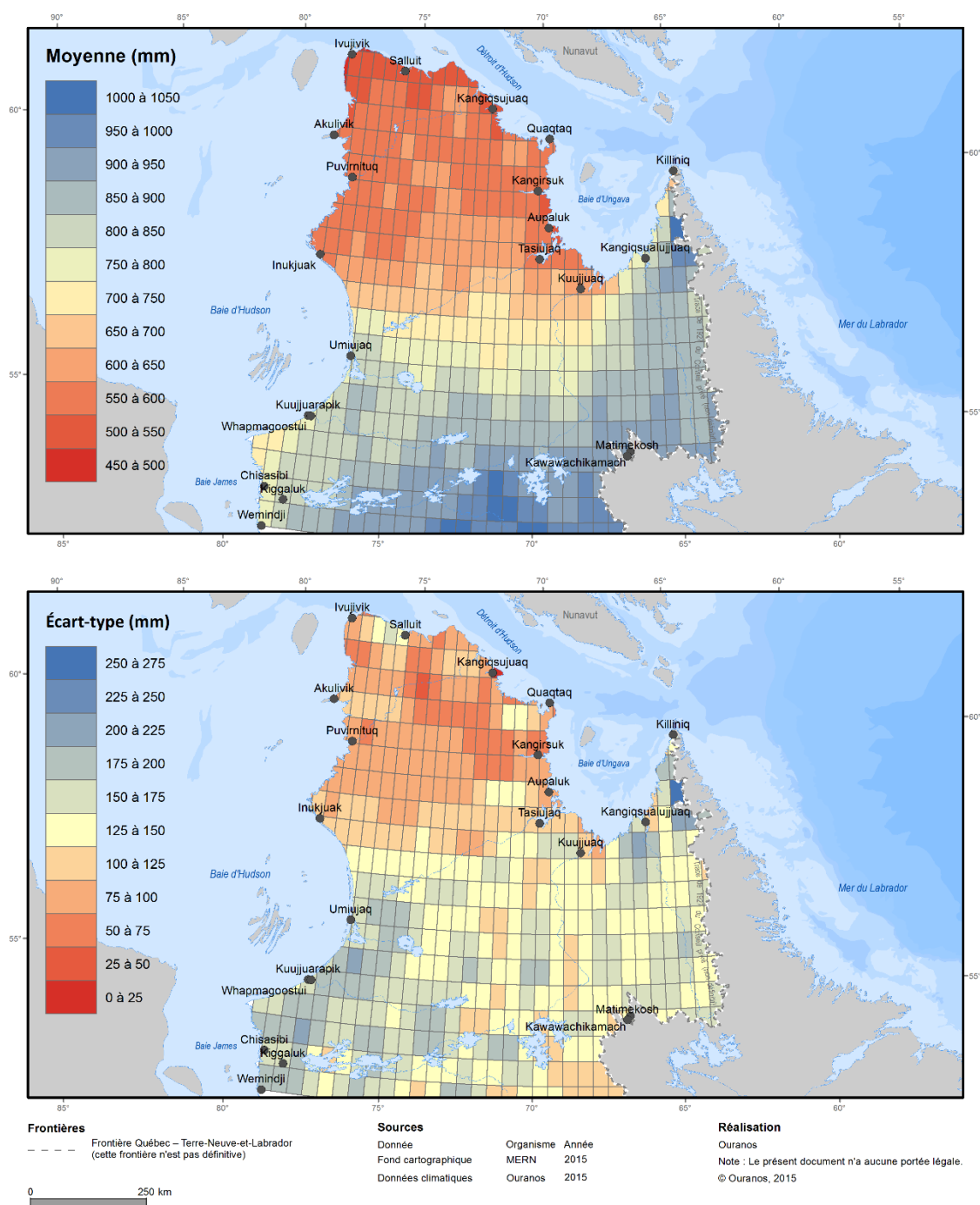


Figure 12. Le panneau du haut présente la moyenne des précipitations totales annuelles (mm), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.

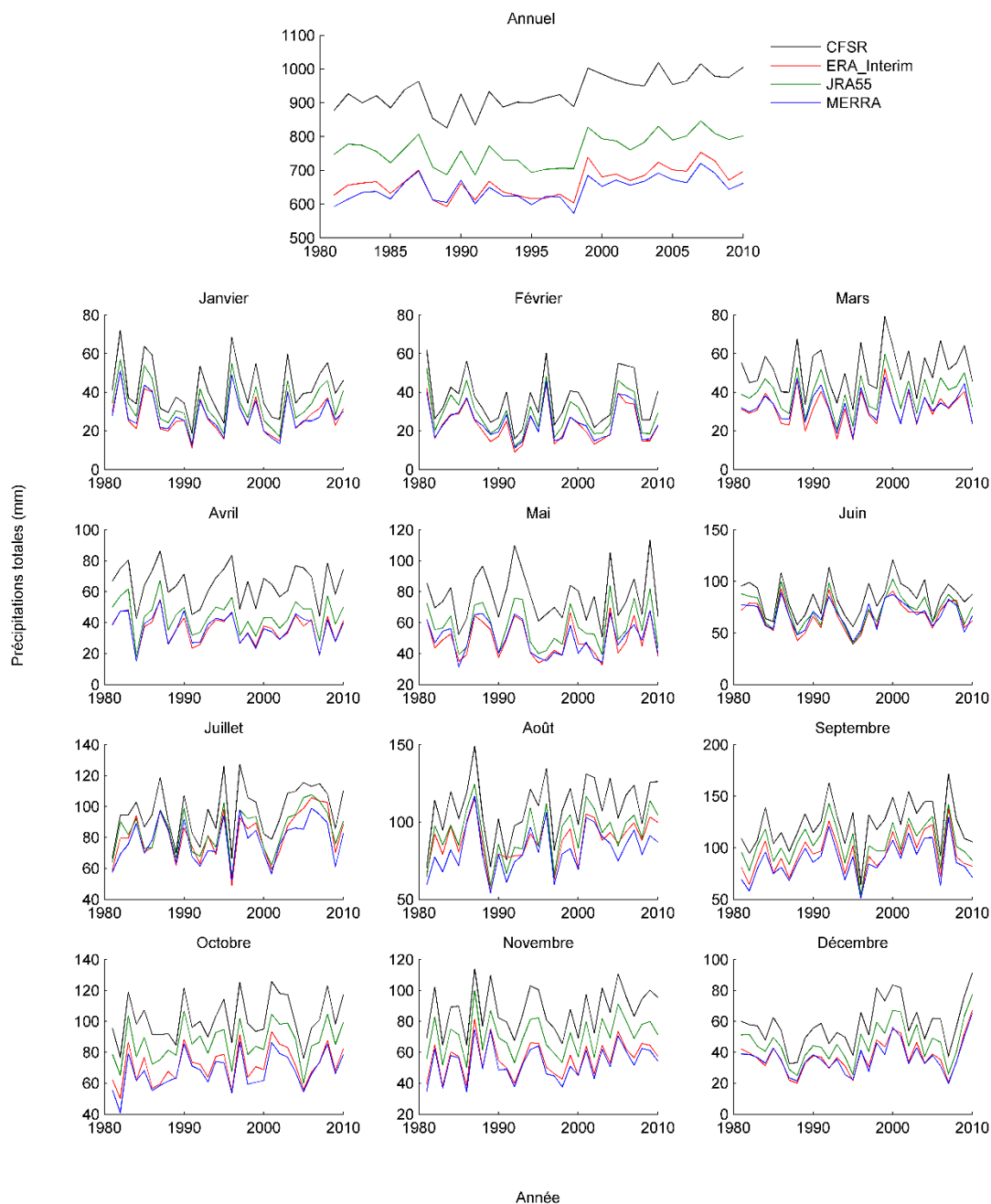


Figure 13. L'évolution des précipitations totales annuelles et mensuelles (mm) selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude.

4.3.3 Longueur de la saison de croissance

La figure 14 illustre que la longueur de la saison de croissance atteint des valeurs plus importantes au sud-est, près de la Baie James, soit d'environ 160 à 170 jours, tandis que la saison est beaucoup plus courte au nord, avec des valeurs de l'ordre de 80 à 90 jours. Les écarts-types sont faibles sur la majorité du territoire sauf sur le pourtour de la baie d'Ungava où les réanalyses ne s'entendent pas aussi bien sur la longueur de la saison de croissance.

En ce qui concerne le début de la saison de croissance, il survient environ 70 jours plus tôt dans le sud que dans le nord (figure 15), tandis que la fin peut arriver jusqu'à environ 50 jours plus tard dans le sud qu'au nord (figure 16).

La figure 17 illustre clairement l'allongement de la saison de croissance sur le territoire entre 1981 et 2010 (panneau du haut) ainsi que le devancement du début de la saison (panneau du centre) et sa fin plus tardive (panneau du bas).

Longueur de la saison de croissance

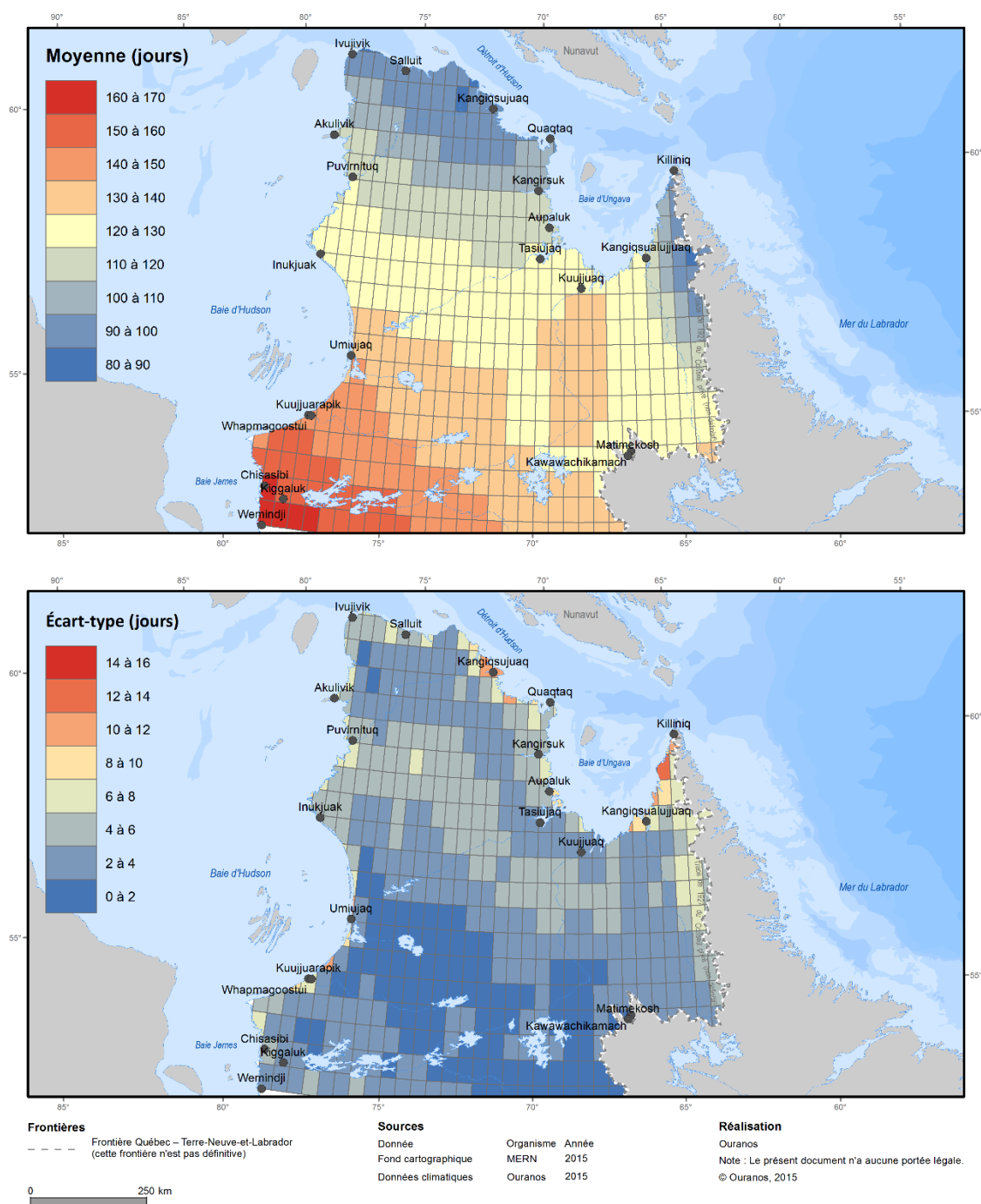


Figure 14. Le panneau du haut présente la moyenne de la longueur de la saison de croissance (jours), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) pour la période 1981-2020. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.

Début de la saison de croissance

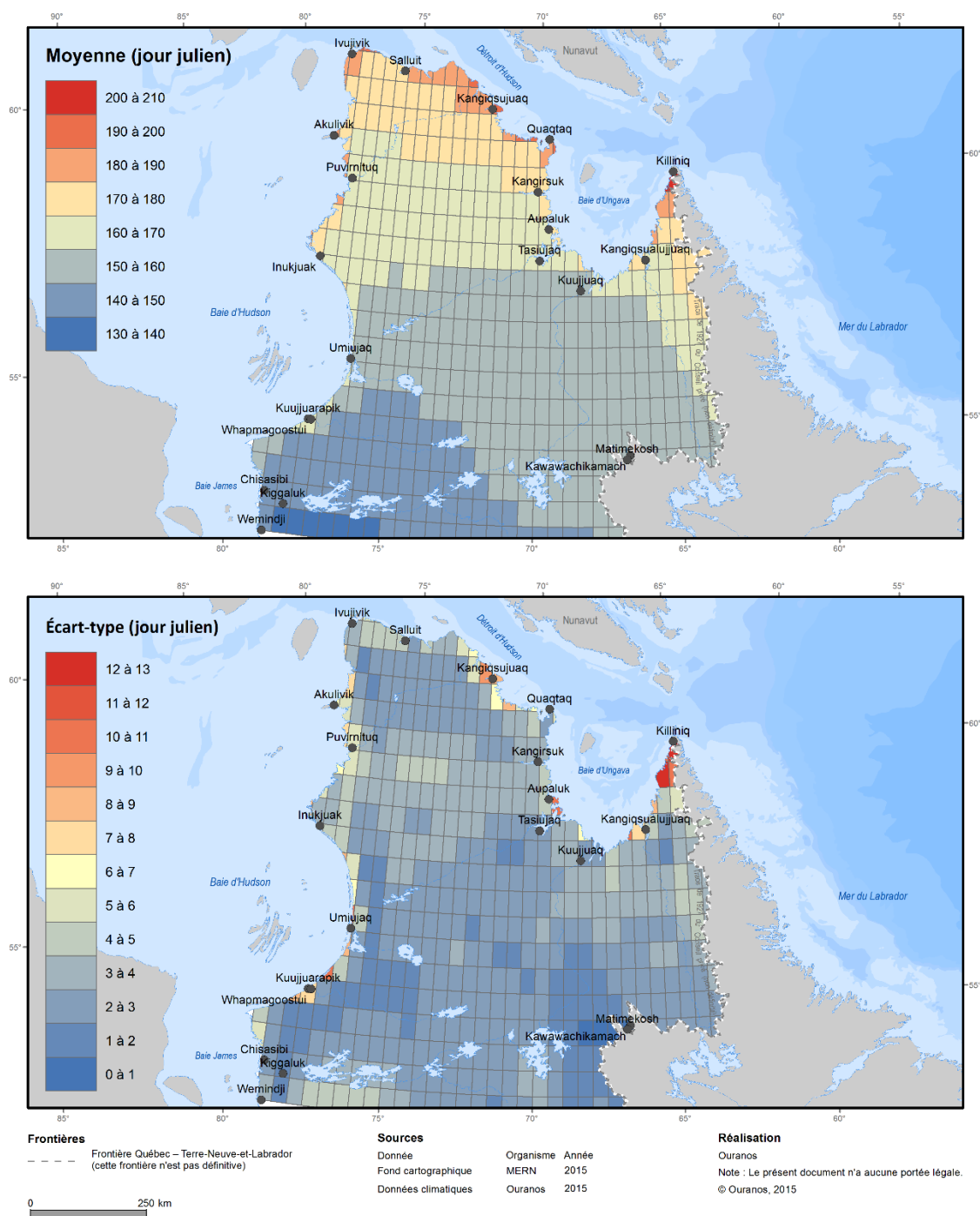


Figure 15. Le panneau du haut présente la moyenne de la date du début de la saison de croissance (jours juliens), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.

Fin de la saison de croissance

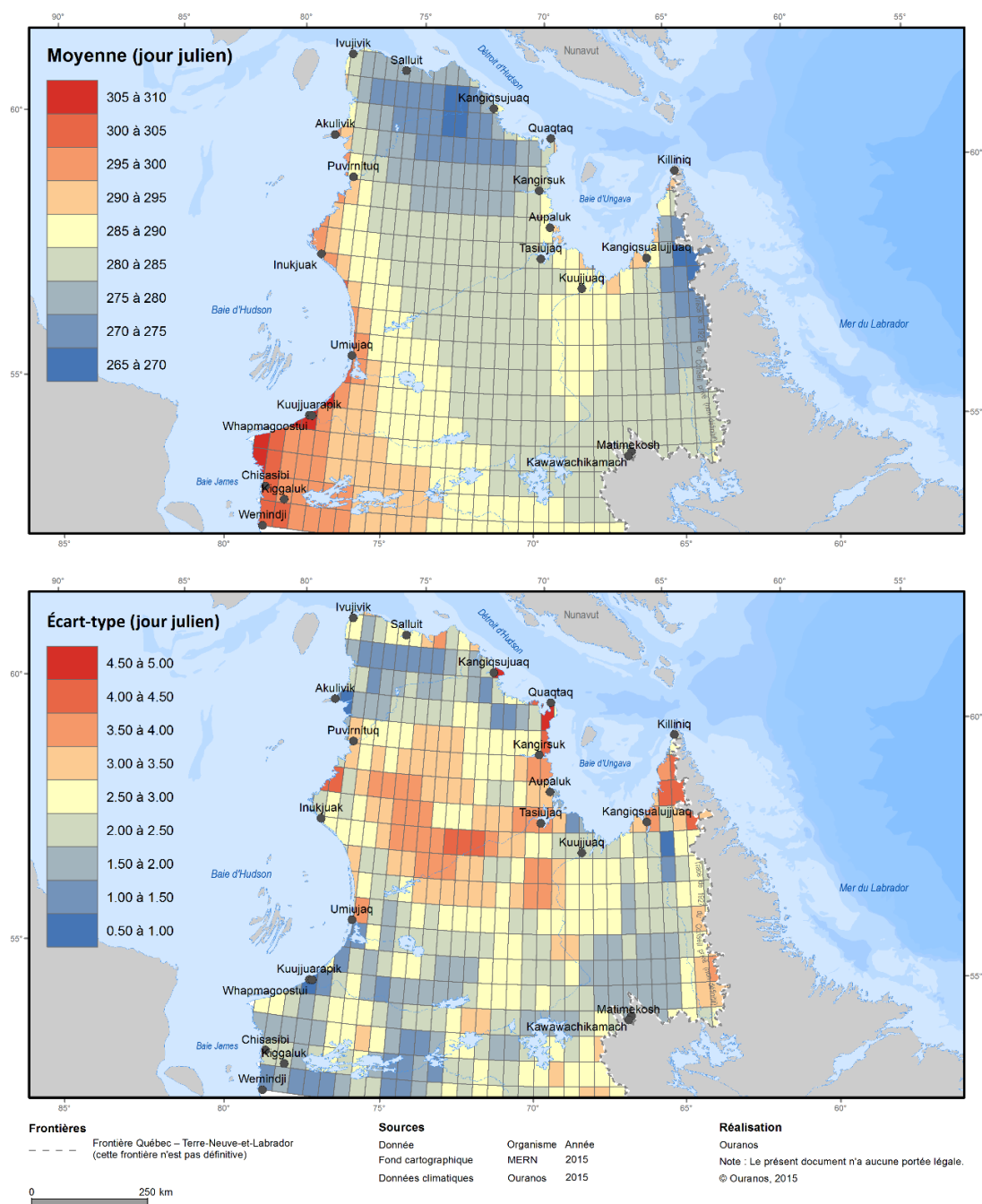


Figure 16. Le panneau du haut présente la moyenne de la date de la fin de la saison de croissance (jours juliens), calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.

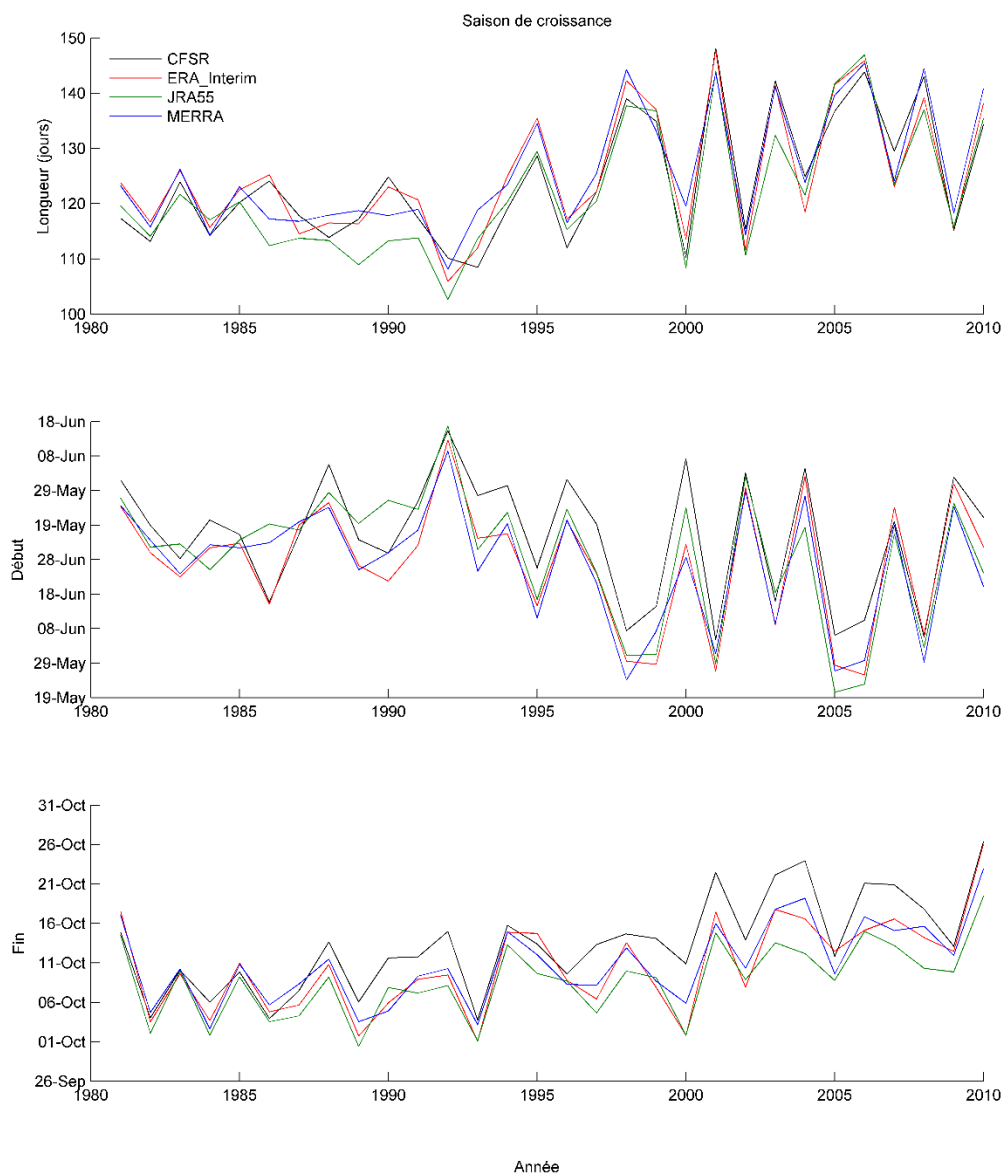


Figure 17. L'évolution de la longueur, du début et de la fin de la saison de croissance, selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude.

4.3.4 Degrés-jours de croissance

La figure 18 illustre que le nombre de degrés-jours de croissance est plus important au sud-est, près de la Baie James, soit d'environ 1600 à 2000 degrés-jours, tandis que ce nombre est beaucoup plus faible au nord, avec des valeurs de l'ordre de 400 à 600. Les écarts-types sont faibles sur la majorité du territoire sauf pour certains points de grille sur le pourtour de la baie d'Ungava où les réanalyses ne s'entendent pas aussi bien.

Le nombre de degrés-jours de croissance augmente entre 1981 et 2010 sur une base annuelle, largement relié à des augmentations au printemps et en été (figure 19). On remarque pour les mois d'hiver, une seule réanalyse (ERA-Interim) donne des valeurs, ce qui peut influencer les écarts-types présentés à la figure 18.

Degrés-jours de dégel (annuelle)

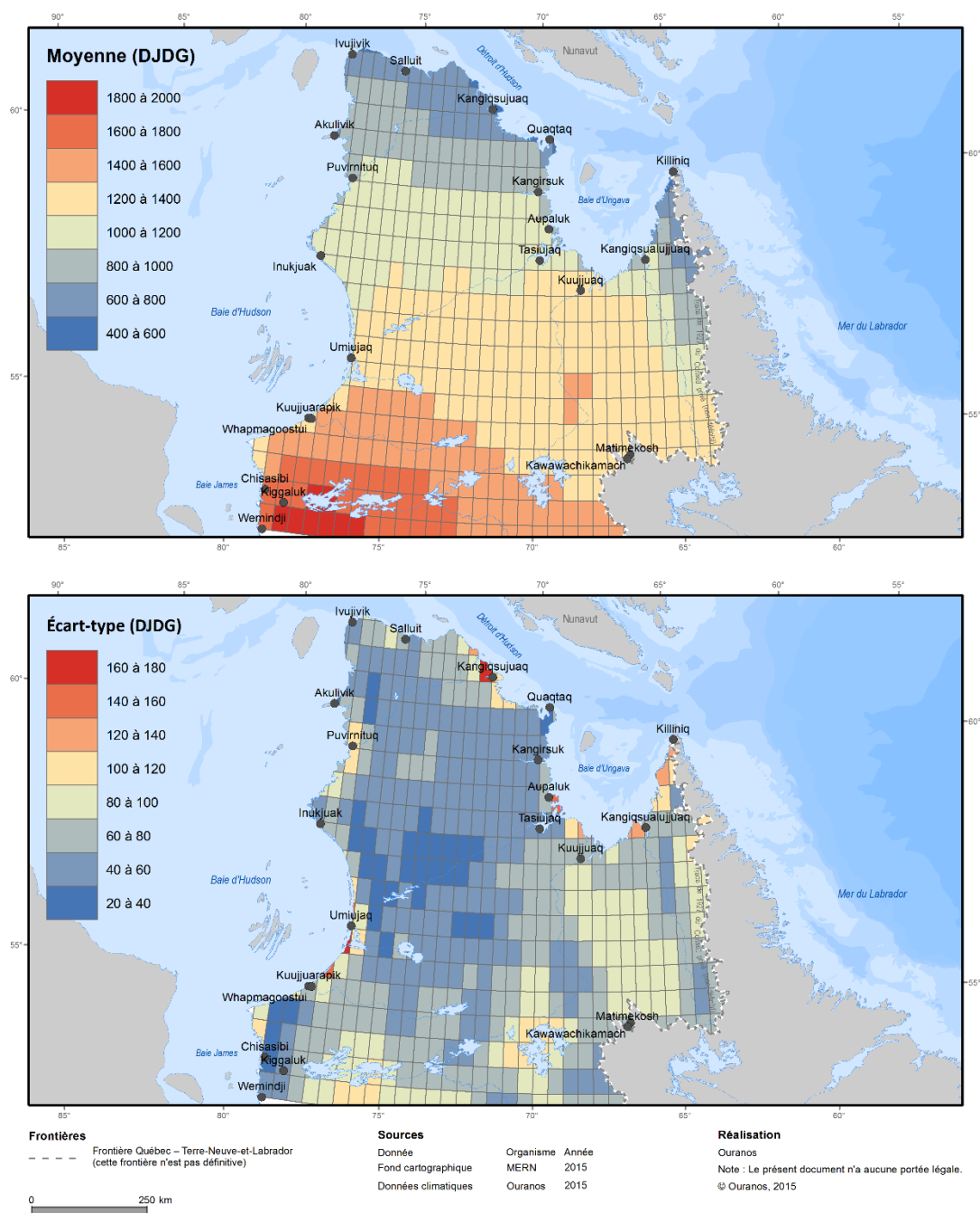


Figure 18. Le panneau du haut présente la moyenne du nombre annuel de degrés-jours de croissance, calculée à partir de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), pour la période 1981-2010. Le panneau du bas présente l'écart-type entre les quatre réanalyses.

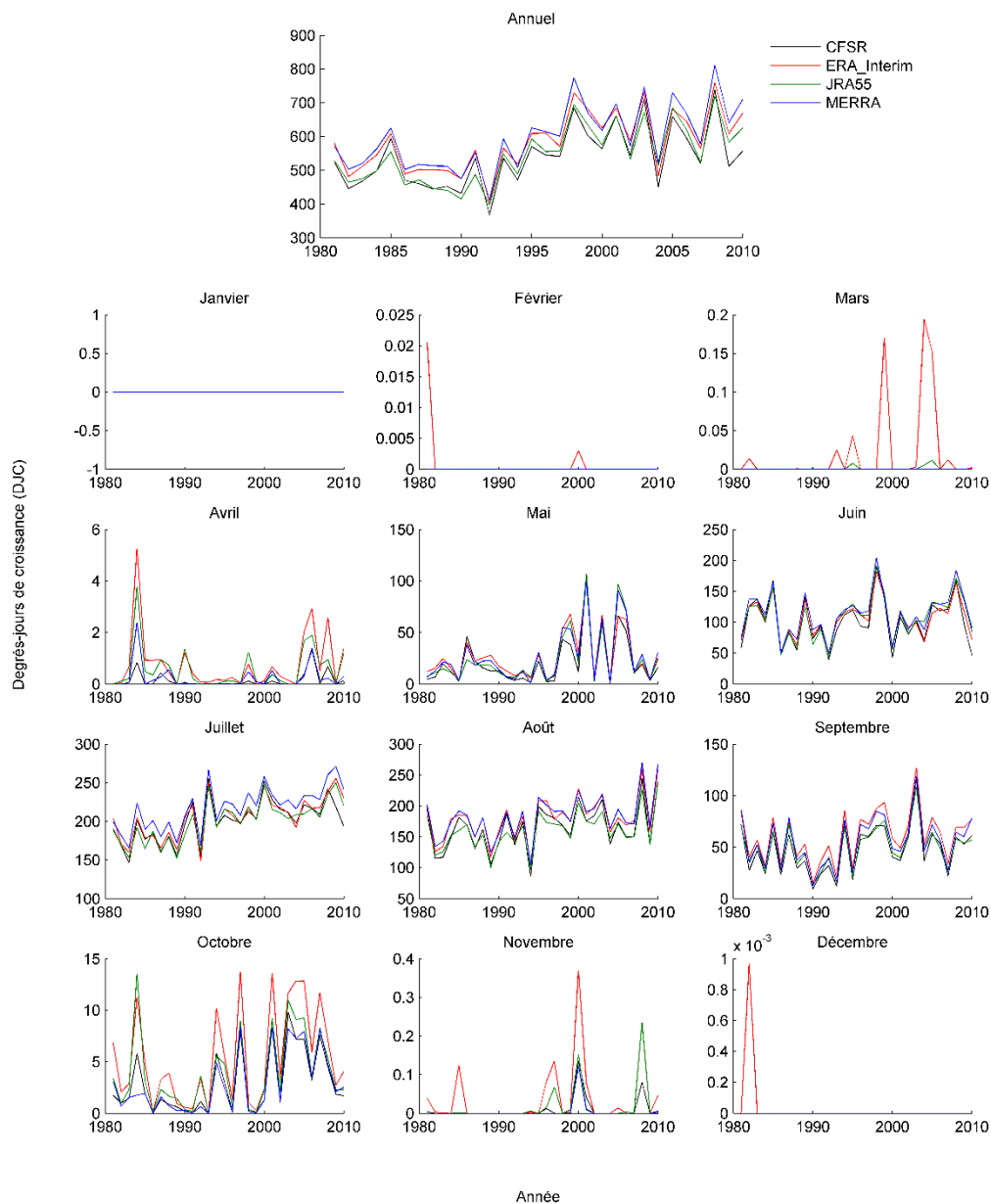


Figure 19. L'évolution du nombre de degrés-jours annuel de de croissance, selon chacune des quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA), moyennée pour l'ensemble du territoire à l'étude.

4.3.5 Couvert de neige

La figure 20 présente le maximum d'équivalent en eau de la neige (EEN, mm) pour les deux bases de données retenues. On note premièrement des écarts importants entre les deux jeux de données, un point bien illustré à la figure 22. La série Liston-Hiemstra présente des valeurs plus élevées et plus hétérogènes sur le territoire, avec des valeurs entre 122-150 et 501-800 mm, tandis que Brown-Derksen présente des valeurs allant de 122-150 à 251-300 mm. Par contre, les deux démontrent des taux d'EEN plus importants dans la région montagneuse aux abords de Terre-Neuve-et-Labrador. Ces différences limitent la confiance qui peut être accordée à l'une ou l'autre de ces bases de données. Cependant, l'analyse des précipitations solides annuelles présentées dans le Tome 2 (figure A.102) selon les quatre réanalyses (ERA-Interim, CFSR, JRA55, MERRA) ajoute une information complémentaire qui peut s'avérer utile. En effet, cette figure suggère que les précipitations solides annuelles sur le territoire sont de l'ordre d'environ 200 à 300 mm, sauf sur la région montagneuse à l'est où les valeurs peuvent atteindre 450 mm. Ces valeurs se rapprochent davantage de la base de données de Liston et Hiemstra que de celles de Brown et Derksen.

Les indicateurs liés au début, fin et durée de l'enneigement sont quant à elles plus similaires entre les deux jeux de données (figures 21 et 22), une bonne indication qu'il est plus facile de prédire la présence ou non de neige que la quantité de neige en cas de présence.

La figure 22 suggère que l'équivalent en eau de la neige a peu changé entre 1981 et 2010, tandis que la durée du couvert nival a diminué. Ce phénomène est principalement lié à une fin d'enneigement plus précoce et moins à un début plus tardif.

Moyenne 1981-2010 : Maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige

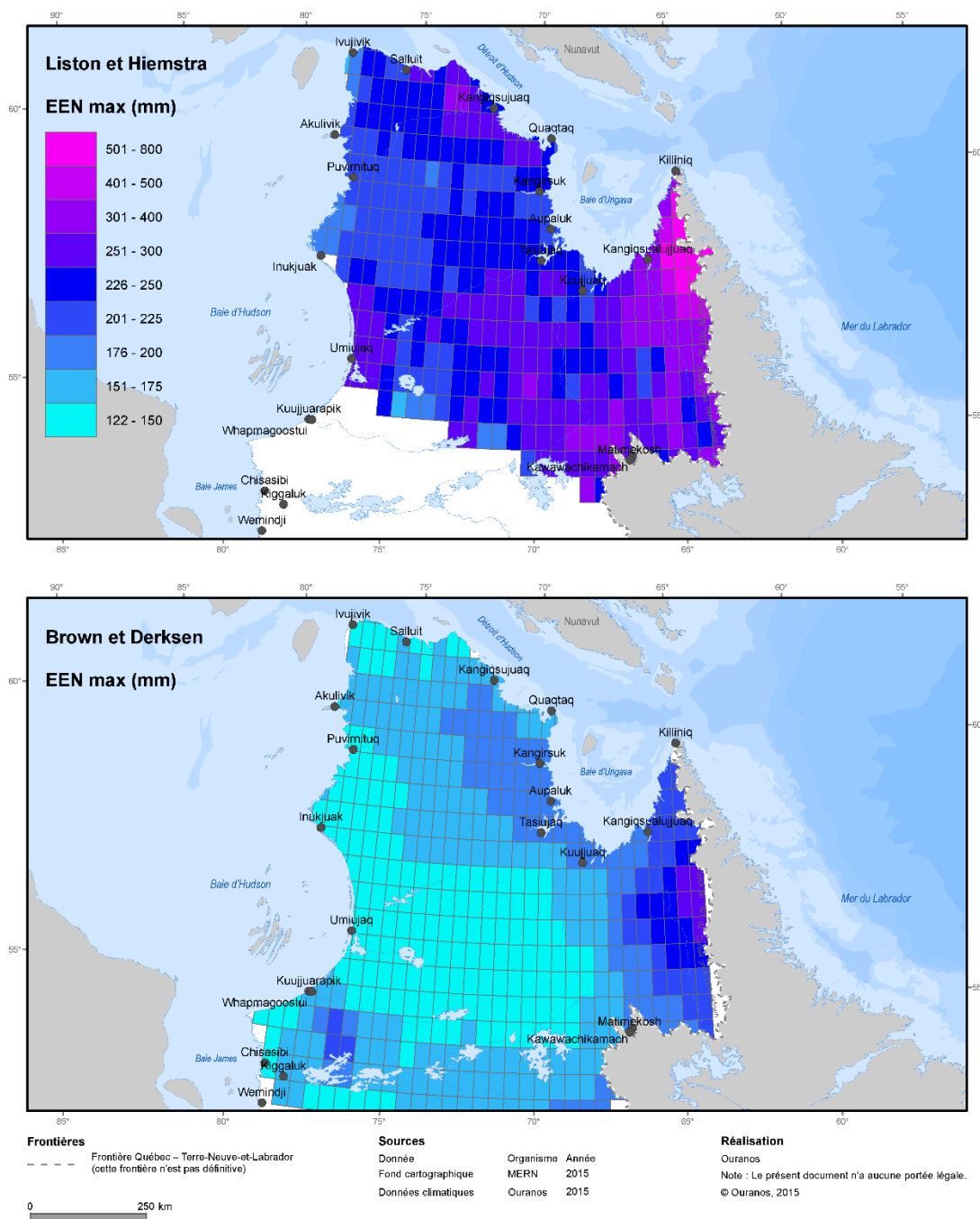


Figure 20. Le maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige (mm) calculé à partir des données de Liston-Hiemstra (panneau du haut) et de Brown-Derksen (panneau du bas), pour la période 1981-2010. La base de données Liston et Hiemstra ne couvre pas tout le territoire au nord du 55°.

Moyenne 1981-2010 : Durée de l'enneigement

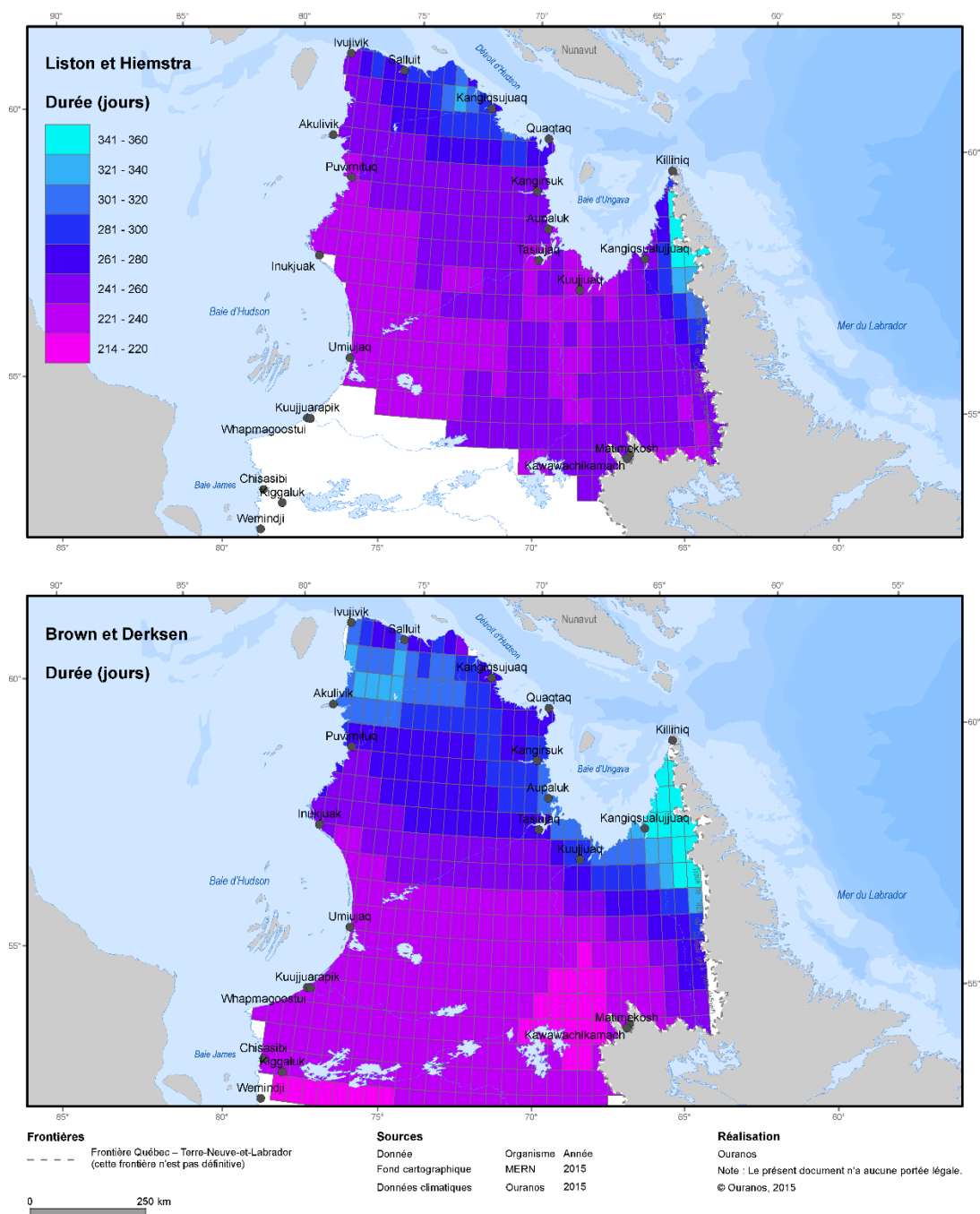


Figure 21. La durée du couvert de neige (seuil de 1 mm), calculée à partir des données de Liston-Hiemstra (panneau du haut) et de Brown-Derksen (panneau du bas), pour la période 1981-2010. La base de données Liston et Hiemstra ne couvre pas tout le territoire au nord du 55°.

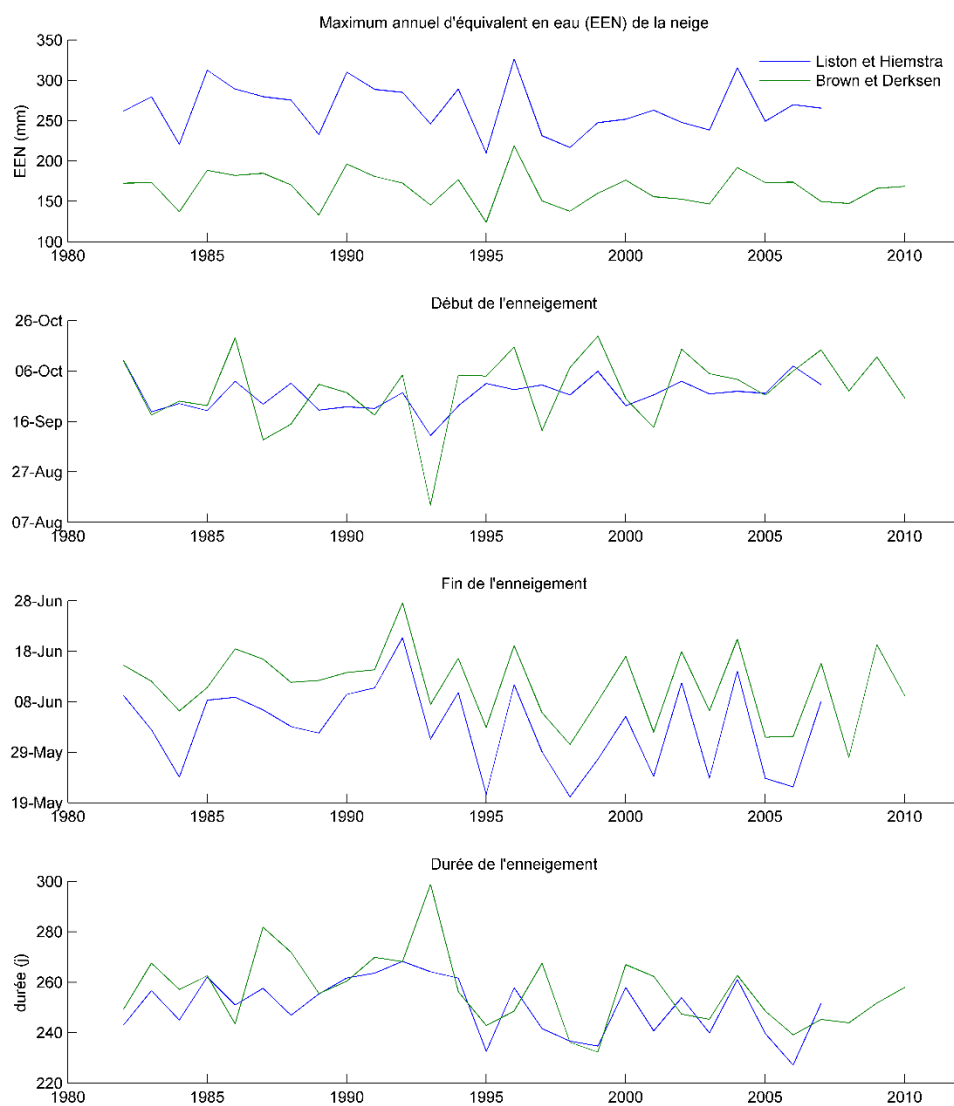


Figure 22. L'évolution du maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige, du début, de la fin et de la durée de l'enneigement, calculé à partir des données de Liston-Hiemstra et de Brown-Derksen, moyennés pour l'ensemble du territoire à l'étude.

4.4 Bioclimats

L'analyse des bioclimats basée sur l'ensemble de données de réanalyses sélectionnées pour la période 1981-2010 (figure 23) offre un portrait passablement différent de celui présenté en 2001 par Gerardin et McKenney, qui était quant à lui basé sur des données d'observations aux stations pour la période 1966 à 1996 (chapitre 2).

Premièrement, le niveau de raffinement de la nouvelle classification est plus élevé, ce qui n'est pas surprenant étant donné que la première classification était basée sur des données de stations situées principalement au sud du 50° (Gerardin et McKenney 2001). Par conséquent, les données sur grille des réanalyses offrent une information climatique plus détaillée sur le nord du Québec.

La figure 23 présente sept catégories pour la région au nord du 55° (on note que les 2 autres catégories présentées sur cette figure décrivent une région au sud de la région à l'étude), comparativement à quatre catégories dans la classification originale. Les grandes régions bioclimatiques sont sensiblement les mêmes, mais les nouvelles catégories aident à décrire avec plus de précision certains éléments climatiques et topographiques importants.

Pour les températures annuelles moyennes, le gradient nord-sud est sensiblement le même que sur la carte d'origine avec une région subpolaire froide (-5.9 à -1.5 °C) plus au sud et une région polaire (-9.4 à -6.0 °C) plus au nord. Par contre, la zone polaire est moins étendue comparativement à celle de Gerardin et McKenney, tandis que la zone subpolaire a pris de l'expansion au nord. On note aussi une zone de température plus froide à la limite ouest du territoire qui borde Terre-Neuve-et-Labrador. Cette zone longe plusieurs monts importants, tels le Mont Iberville, le Mont Jacques-Rousseau, ainsi que les Collines Hadès.

Le gradient nord-sud est aussi présent en termes de longueur de la saison de croissance, qui passe de courte au sud (120 à 149 jours) à très courte au nord (90 à 119 jours). Un

gradient de court à très court est aussi présent à la frontière de Terre-Neuve-et-Labrador, où il y a un important gradient d'élévation.

Le gradient de précipitation présente quant à lui une zone subhumide au sud caractérisée par des précipitations totales plus abondantes (800 à 1359 mm), tandis que la région plus au nord est représentée par des précipitations modérées (470 à 799 mm). Ces précipitations sont plus importantes que sur la carte d'origine qui présentait une zone modérée au sud et semi-aride au nord.

Ce portrait des bioclimats dénote que les conditions sont particulièrement difficiles dans le Nord québécois. En effet, environ 50 % du territoire au nord du 55° est compris dans une zone considérée polaire en termes de température, où la saison de croissance est très courte et où les précipitations sont modérées.

Ce nouveau redécoupage des zones bioclimatiques pourrait influencer la répartition des zones de végétation du Québec, que le MPFP est aussi en processus de revoir (<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp>).

Présentement, le territoire au nord du 55° parallèle regroupe trois grandes zones, soit le domaine de la toundra forestière (du 55° au 58°), le domaine de la toundra arctique arbustive (du 58° au 61°) et le domaine de la toundra arctique herbacée (au nord du 61°). On note que ces trois zones sont caractérisées par une végétation de type arbustive, et que la limite nord de la plupart des arbres de la forêt boréale (sapin baumier, pin gris) se situe entre le 52° et 55° parallèle, mis à part pour l'épinette noire qui, quant à elle, est présente, mais de façon limitée dans la toundra forestière. L'analyse du climat de référence ainsi que la nouvelle cartographie des bioclimats laissent présager que les zones de végétation seraient appelées à se déplacer vers le nord.

Classification des bioclimats (selon Litynski)

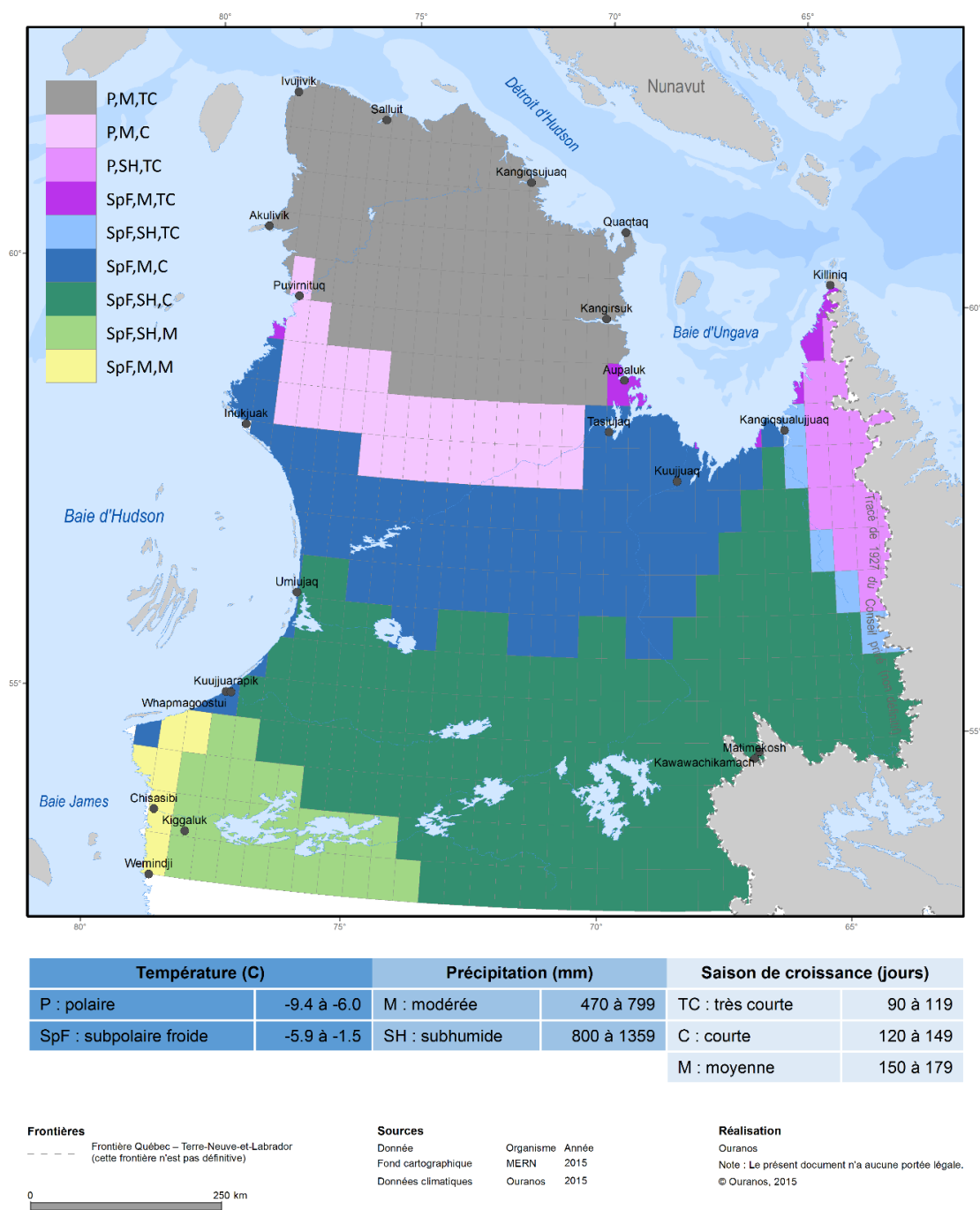


Figure 23. Classification des bioclimats établie sur la moyenne climatique de quatre réanalyses (ERA-Interim, CFRS, JRA55, MERRA) disponibles sur une grille de 50 km. La classification suit les critères établis par Litynski tels que présentés dans Gerardin et McKenney (2001).

CHAPITRE 5 : ÉTAT DES CONNAISSANCES D'AUTRES VARIABLES CLIMATIQUES

Le chapitre 5 présente un état des connaissances tiré de la littérature pour trois indicateurs importants pour le Nord québécois, soit le vent, les glaces marines et le régime hydrique. Ces indicateurs, de par le manque de données disponibles ou de leur plus grande complexité, n'ont pas fait partie de la liste d'indicateurs priorisés pour le projet. En effet, leur évaluation aurait requis une analyse plus approfondie et trop longue pour ce projet. Toutefois, il a été possible de tirer profit de la revue de littérature réalisée récemment pour la publication de la *Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec* (Ouranos, 2015).

5.1 Les vents

Les vents près de la surface sont mesurés aux stations météorologiques par des anémomètres situés à 10 mètres de hauteur. Malheureusement, la faible densité des réseaux au Québec limite grandement la compréhension de cette variable complexe. Puisque le vent est grandement influencé par des processus très locaux, le vent mesuré n'est représentatif que des environs immédiats de la station, ce qui en complique l'interpolation pour des fins de cartographie et d'analyse, à moins d'avoir un réseau de stations d'une très grande densité. Par ailleurs, les observations de vent sont très sensibles aux changements survenus dans les types d'anémomètres, à la hauteur à laquelle ils ont été installés (qui n'a pas toujours été de 10 m), au déplacement des stations ainsi qu'aux changements de l'environnement autour de la station, comme la croissance ou la disparition de la forêt et l'urbanisation. C'est pourquoi l'étude du vent doit impérativement se faire sur des données homogénéisées.

Des statistiques à long terme de la vitesse du vent ont été obtenues au moyen de stations météorologiques canadiennes sur la période 1953-2006 par Wan et al. (2010) après en avoir complété l'homogénéisation. De ces stations, treize se situent dans des aéroports du Québec (Val-D'Or, Rouyn, Sept-Îles, Bagotville, St-Hubert, Montréal (Pierre-Eliot-Trudeau), Schefferville, Kuujuaq, Québec (Jean-Lesage), Roberval, Baie-Comeau,

Kuujjuarapik et Mont-Joli). L'analyse de Wan et al. (2010) nous apprend que les moyennes saisonnières de la vitesse de vent pour la période 1953-2006 se situent entre 10 et 20 km/h. Les seules stations faisant exception sont Mont-Joli en hiver et Kuujjuarapik en automne pour lesquelles les moyennes saisonnières excèdent 20 km/h. On constate que la vitesse moyenne des vents pour la grande majorité des stations varie très peu d'une saison à l'autre. On peut en dire autant de la variation interannuelle de la moyenne saisonnière du vent. Pour la majorité des stations, la variabilité interannuelle se situe en deçà de 5 km/h, peu importe la saison. Toutefois, quelques stations nordiques se comportent différemment. À Kuujjuarapik, Kuujjuaq, Schefferville et Mont-Joli, les moyennes hivernales et automnales fluctuent d'une année à l'autre de 5 à 10 km/h, tandis que la variabilité excède 10 km/h en été à Kuujjuarapik. Les tendances observées ont aussi été calculées par Wan et al. (2010) qui remarquent une tendance à la diminution de la vitesse moyenne des vents pour la majorité des stations tout au long de l'année entre 1953 et 2006. Par contre, quelques stations dérogent de ce constat général et présentent de faibles tendances à l'augmentation de la vitesse du vent. Encore une fois, c'est le cas pour les stations nordiques de Schefferville (hiver, printemps et automne), de Kuujjuaq et de Kuujjuarapik en hiver, et finalement, de Val-D'Or et de Baie-Comeau en automne.

Bien qu'utiles pour dresser un portrait sommaire du vent dans le nord, les analyses à long terme et sur de grandes échelles spatiales peuvent masquer certains comportements importants du vent, notamment en termes de pointes de vent extrêmes. Ces événements sont particulièrement importants pour les infrastructures du nord et se méritent d'être mieux étudiés. Un enjeu difficile à aborder étant donné l'aspect très local du vent. En effet, puisque les pointes de vent ne surviennent pas nécessairement au point de stations, il est difficile de bien les caractériser. Par contre, des informations plus qualitatives ou ponctuelles peuvent servir à mieux comprendre l'importance des pics de vents sur ce territoire. Par exemple, un article dans le Nunatsiaq News relate des événements extrêmes à Salluit, où des vents de plus de 140 km/h ont été enregistrés le 19 novembre 2015. Plusieurs toitures de résidences ont été arrachées lors de cet événement. Un

avertissement de pointes de vent importantes pouvant atteindre 106 km/h était émis pour cette région pendant quelques jours. Cet événement illustre bien que la force des vents dans le nord peut avoir des conséquences très importantes.

5.2 Glaces marines

Les glaces marines sont une composante importante de la cryosphère, qui joue un rôle significatif sur le climat terrestre à travers son influence sur l'énergie, le cycle de l'eau, la productivité primaire, les échanges gazeux ainsi que le niveau des mers. Les glaces de l'Arctique peuvent perdurer pendant plusieurs années et s'accumulent à la base avec le gel de l'eau de mer. Les glaces saisonnières n'atteignent généralement pas plus de 2 mètres d'épaisseur, tandis que les glaces qui ont plus d'un an peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. Les glaces marines sont sensibles à plusieurs facteurs tels que la température de l'air, la température des océans, le vent et les courants marins. L'influence des changements de température sur les glaces de mer fait en sorte que celles-ci forment l'une des signatures les plus visibles des changements climatiques (Vaughan et al. 2013).

Depuis le déploiement d'un système d'imagerie satellitaire à micro-ondes passives en 1979, il est possible d'avoir une estimation de l'étendue des glaces marines avec une résolution temporelle inférieure à une journée. Ces trente-quatre années de données montrent, tout d'abord, que le couvert annuel de la glace arctique a diminué d'environ de 3,5 à 4,1 % par décennie de 1979 à aujourd'hui (Vaughan et al. 2013). Cette diminution est plus rapide en été et en automne, mais le couvert a néanmoins diminué à chaque saison. De plus, malgré la tendance évidente à la baisse à partir des années 1970, on observe la présence d'une forte variabilité interannuelle dans l'étendue de glace. Dans le centre de l'Arctique (excluant la mer du Groenland), les couverts de la glace pérenne (glace qui perdure un été) et de la glace pluriannuelle (glace qui dure plusieurs étés) ont aussi diminué durant ces mêmes années, d'environ 11,5 % et de 13,5 % par décennie, respectivement (Vaughan et al. 2013). Enfin, l'épaisseur de la glace hivernale a diminué en moyenne de 0,6 m par décennie sur le bassin de l'Arctique pendant la période 1980 à

2008, ce qui indique que le volume de glace est aussi à la baisse. Ces données d'épaisseur des glaces proviennent de plusieurs techniques telles que l'utilisation des sonars sous-marins, d'altimétrie satellitaire et de la détection électromagnétique. Pour les endroits où une diminution de l'épaisseur de la glace est enregistrée, on note une augmentation de la vitesse de la dérive des glaces (Vaughan et al. 2013).

Des études récentes sur la baie d'Hudson et la mer du Labrador montrent aussi le déclin de l'étendue des glaces marines sur ce territoire pendant les 50 dernières années (Derksen et al. 2012; Tivy et al. 2011). Plus spécifiquement, on note que l'étendue des glaces dans la baie d'Hudson a diminué de 6 à 15 % par décennie, tandis que la région du Labrador a perdu près de 17 % de ses glaces d'été au courant de la période 1968-2010 (figure 24, tirée de Derksen et al. 2012). La perte totale du couvert de glace et, par conséquent, l'apparition de l'eau libre en septembre sur plusieurs régions autour du Québec sont similaires aux résultats observés dans l'océan Arctique.

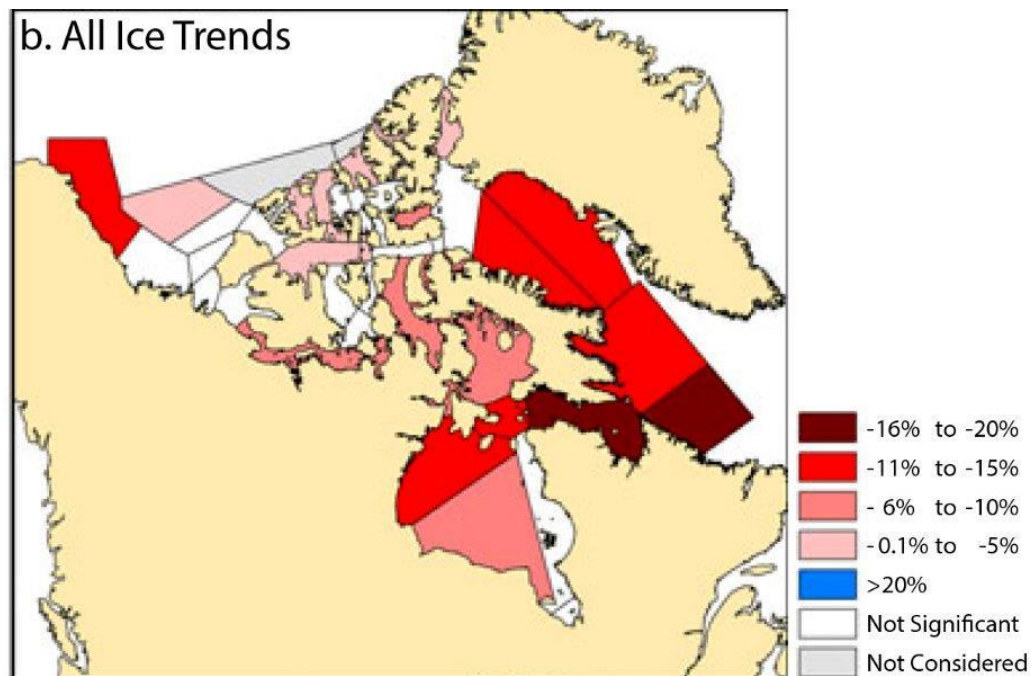


Figure 24. Réduction du couvert de glace (% par décennie) pour la période 1968-2010 dans l'arctique canadien. Seulement les tendances statistiquement significatives ($\alpha=0.05$) sont montrées. Adaptée de Derksen et al. 2012.

5.3 Régime hydrique

La première constatation pour le régime hydrique est le manque de ressources disponibles afin de pouvoir dresser un portrait fiable sur le nord du Québec. Premièrement, le nombre de stations de jaugeage pour mesurer le débit des rivières au Nunavik, soit à travers le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) ou Environnement Canada, demeure faible. Deuxièmement, peu de chercheurs semblent s'être intéressés au régime hydrique du nord québécois, faisant en sorte que la littérature n'est pas très abondante pour cette région. Il est facile d'imaginer que ce deuxième point découle du premier; il est difficile de bâtir des analyses solides quand le manque de données est si criant.

Toutefois, il est possible de présenter ici certaines tendances du régime hydrique du nord québécois, en grande partie grâce aux études menées par Stephen Déry (de l'Université du nord de la Colombie-Britannique). En résumé, ses travaux montrent que bien que les

débits annuels vers l'Arctique ne présentent pas de tendances significatives entre 1964 et 2003, des tendances à la baisse sont observées pour les rivières se déversant dans les Baies James, d'Hudson, d'Ungava entre 1964 et 2000 (Déry et Wood 2005, Déry et al. 2005). Par contre, en incluant des données plus récentes, les résultats suggèrent une augmentation des débits entre les années 1980 et 2007 (Déry et al. 2009). Un exemple de variations observées selon la période à l'étude est présenté à la figure 25 qui illustre les tendances dans les variations annuelles des débits de plusieurs rivières du nord canadien sur différentes périodes temporelles. On remarque par exemple que la période 1982-2002 présente davantage de tendances à la hausse aux abords de la baie James que les trois autres périodes à l'étude. Cette figure illustre aussi un problème important, soit que les séries hydrométriques ne sont pas toujours en continu et que, comme c'est le cas pour les stations météorologiques, plusieurs stations de jaugeage ont été fermées au fil du temps. On remarque, entre autres, que sur le nord québécois, plusieurs points disparaissent quand les périodes d'analyses incluent les années après 1990 (figure 25).

D'autres études rapportent aussi des changements dans le régime hydrique du nord québécois dans le passé récent. Par exemple, Thistle et Cassie (2013) ont analysé les données hydrométriques obtenues du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) afin de détecter des tendances des débits de rivières pour la période 1950-2009 dont quatre stations de jaugeage à l'intérieur du territoire à l'étude ici (Grande rivière de la Baleine, 55.24 et -76.99, Lac des Loups Marins 56.45 et -74.22, Aux Mélézes 57.68 et -69.62, À la Baleine 57.89 et -67.60). Leurs résultats suggèrent une faible baisse des débits annuels moyens entre 1950-2009 sans changement significatif entre 1980-2009, tandis que la saisonnalité des débits extrêmes n'a pas changé de façon significative pendant l'une ou l'autre de ces deux périodes. Des études basées sur des données hydrométriques d'Environnement Canada (Canadian Reference Hydrometric Basin Network), où le nombre de stations est extrêmement faible au Nunavik, abondent dans le même sens, avec de très faibles diminutions ou pas de changement sur cette région pour des périodes similaires (Zhang et al. 2001, Yue et al. 2003).

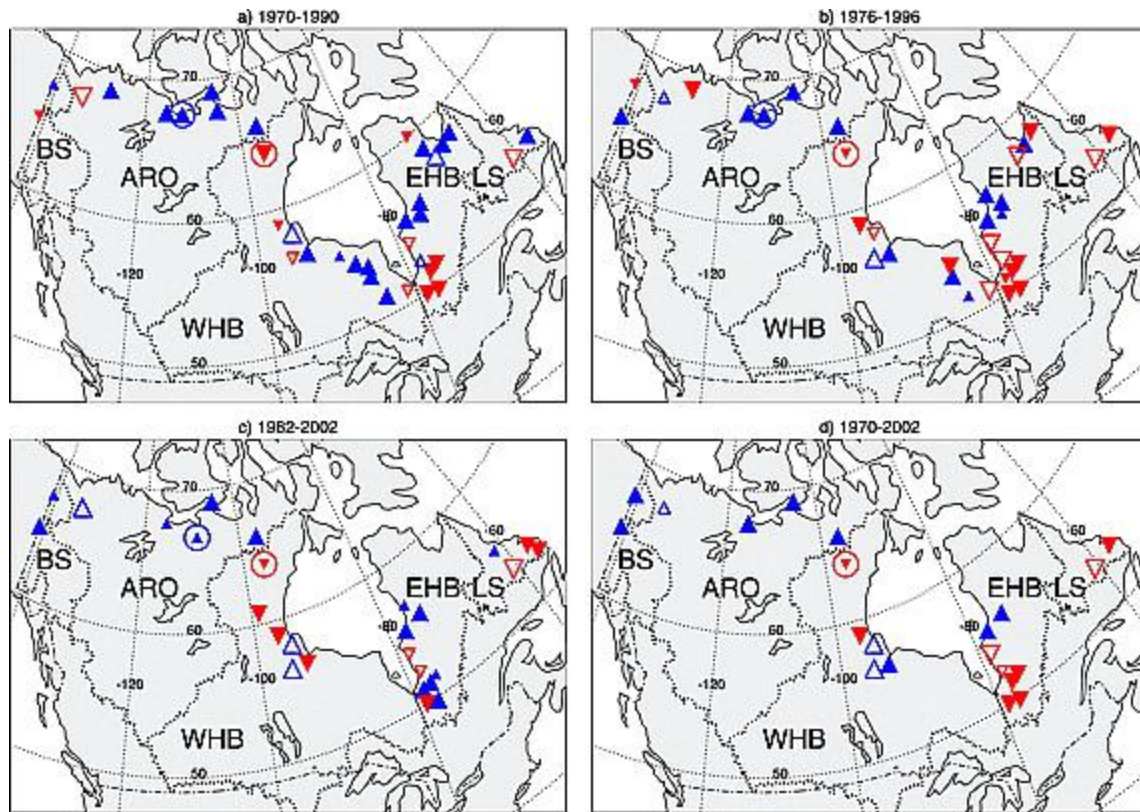


Figure 25. Cartes du coefficient de la variabilité temporelle des débits annuels de 45 rivières du Nord canadien pour (a) 1970–1990, (b) 1976–1996, (c) 1982–2002, et (d) 1970–2002. Les triangles pointant vers le haut (bas) indiquent une tendance positive (négative); la taille des triangles indique l'ampleur du changement lorsque détectable. Les rivières aménagées par l'homme (réservoirs, barrages, diversion) sont indiquées par des triangles vides.

Les mécanismes responsables de ces variations dans le temps sont mal compris. Toutefois, il semble que les débits des rivières du nord canadien soient influencés en partie par des changements des patrons de circulation atmosphérique, notamment par l'oscillation Arctique (Déry et Wood 2004, Overland et Wang 2005, Déry et al. 2009). Une évaluation robuste de la relation entre le régime hydrique et ce phénomène requiert de longues séries temporelles de débits, qui sont très rares dans le nord. Par conséquent, bien que certains changements dans le régime hydrique du nord coïncident avec des changements de circulation atmosphérique, ce mécanisme se doit d'être davantage étudié. Les changements climatiques sont aussi souvent cités comme un mécanisme lié à des hausses de la variabilité du cycle hydrologique (par ex. Huntington 2006, Holland et al. 2007), bien que cette relation demande à être mieux explorée.

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DU POTENTIEL DES RÉANALYSES POUR L'ESTIMATION DES INTENSITÉS DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES

Par A. Mailhot, G. Talbot, P. Aubin, S. Bolduc, INRS-Eau, Terre et Environnement

Le volet 'Analyse des séries de précipitations extrêmes du projet *Élaboration du portrait climatique régional en soutien à l'analyse des vulnérabilités et au développement du Nunavik* avait pour objectif d'évaluer le potentiel des réanalyses pour l'estimation des intensités de pluies extrêmes pour la région nord du Québec. Le présent chapitre présente un résumé de la démarche utilisée et des principaux résultats obtenus. Un document intitulé *Évaluation du potentiel des réanalyses pour l'estimation des intensités des précipitations extrêmes dans le Nord québécois* (Mailhot et al. 2015) donne une description détaillée des éléments techniques et des résultats obtenus dans le cadre de ce volet. Le document détaillé est présenté dans le Tome 1 du présent rapport.

Le travail a été réalisé en trois étapes. Une première étape a consisté à comparer les estimations des intensités de précipitations extrêmes de trois réanalyses, à savoir ERA-Interim (*European ReAnalysis*), CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) et MERRA (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*- voir Tableau 8) aux valeurs correspondantes aux stations du *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques* (MDDLECC) et d'Environnement Canada (EC). Les séries journalières de précipitations aux différents points de grille couvrant le territoire au nord du 49^e parallèle ont été utilisées comme valeurs de référence. Seules les stations comportant 10 ans ou plus de données valides (une année est jugée valide si elle contient moins de 20 % de données manquantes) sont retenues pour un total de 90 stations (la carte des stations de la figure 26 donne la position de celles-ci). Les séries aux stations ont été préférées aux données interpolées sur grille (p. ex. les données interpolées sur grille de 10 km de Ressources Naturelles Canada; McKenney et al. 2011) puisque les données sur grille sont construites par interpolation des données aux stations et que, dans les régions où les densités de stations sont faibles, l'exactitude de ces valeurs interpolées est questionnable. De plus,

considérant que la présente étude s'intéresse à la caractérisation des extrêmes de précipitations, il est connu que les données sur grille sous-estiment ces valeurs (Gervais et al. 2014).

Tableau 8. Liste et caractéristiques des réanalyses retenues.

Nom	Résolution spatiale ¹	Résolution temporelle	Période couverte	Référence
Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	35 km x 25 km (0.31° x 0.31°)	1 heure	1979-2009	Saha et al. (2010)
ERA-Interim (European ReAnalysis)	83 km x 64 km (0.75° x 0.75°)	12 heures	1979-2012	Dee et al. (2011)
Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA)	55 km x 55 km (0.5° x 0.67°)	1 heure	1979-2012	Rienecker et al. (2011)

1 : La résolution en km indiquée est estimée pour les latitudes du territoire sous étude.

Les séries des maxima annuels de durée 1, 3 et 5 jours ont été construites en chacun des points de grille pour chacune des réanalyses et pour chaque station. Les intensités de précipitations de périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans ont ensuite été estimées en ajustant une distribution GEV ou Gumbel à chacune de ces séries. Les quantiles calculés aux stations ont ensuite été comparés aux quantiles des réanalyses au point de grille correspondant. La figure 26 présente un exemple des résultats obtenus dans le cas de la durée 1 jour et la période de retour 2 ans. Les valeurs non corrigées de cette figure présentent des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans qui varient entre 25-30 mm pour la portion sud du Nunavik à 20 mm pour la section la plus au nord, selon les réanalyses ERA et MERRA, tandis que CFSR présente des valeurs plus importantes de l'ordre de 30-35 mm au sud et de 25-30 mm généralement dans le nord.

La figure 26 suggère que, bien que les réanalyses présentent des biais parfois importants (généralement une sous-estimation des valeurs aux stations, notamment pour les régions de la Côte-Nord et de la Basse-Côte-Nord), la distribution spatiale de ces valeurs colle très bien au patron suggéré par les valeurs aux stations. Toutefois on note une sous-estimation systématique (pour toutes les réanalyses, toutes les durées et les périodes de retour les plus élevées) des valeurs les plus élevées enregistrées aux stations. Ces stations se trouvent essentiellement dans la partie sud du territoire ce qui laisse entendre que la performance des réanalyses pour la portion plus au nord du territoire sous étude est très bonne.

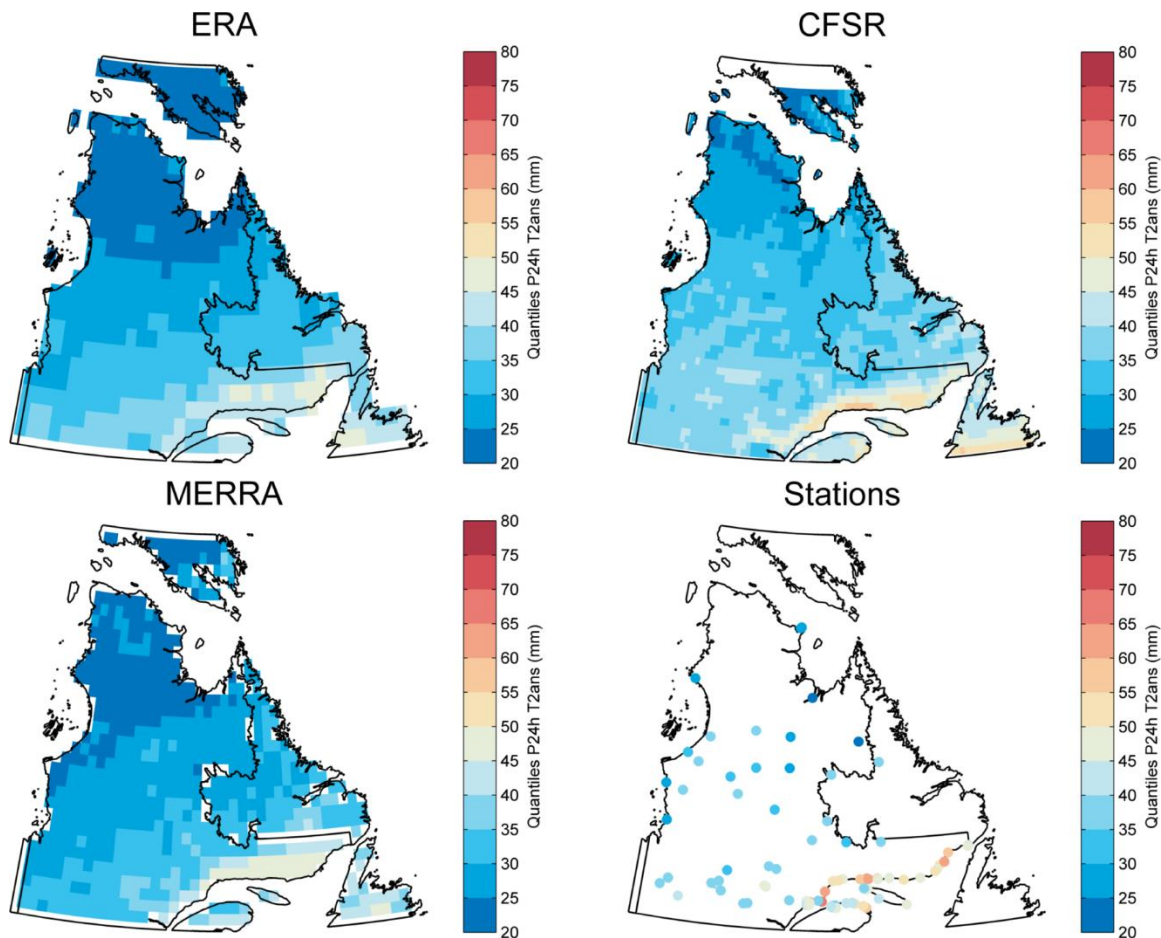


Figure 26. Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour les différentes réanalyses et aux stations.

Ces résultats obtenus à partir des séries ‘brutes’ des réanalyses montrent l’importance de procéder à un post-traitement de ces séries. Ce post-traitement vise à corriger les biais (différences dans les valeurs moyennes) et à réduire les écarts entre intensités extrêmes aux stations et estimées à partir des réanalyses.

Deux approches de post-traitement ont été considérées. Une première approche vise à appliquer un post-traitement à chaque réanalyse prise individuellement. Le post-traitement en question fait intervenir deux paramètres, un premier qui permet de corriger le biais (fait en sorte que la valeur moyenne sur l’ensemble des stations est égale à la valeur correspondante pour la réanalyse) et un second qui permet de faire en sorte que la variance des valeurs aux points de grille de la réanalyse est égale à la variance des valeurs aux stations (les développements théoriques de cette approche sont détaillés dans Mailhot et al. 2015).

L’application de ce post-traitement permet une amélioration sensible des résultats. La figure 27 reprend le cas présenté à la figure 26 (durée 1 jour et période de retour 2 ans). On constate que les réanalyses reproduisent plus adéquatement les intensités plus élevées observées sur la Côte-Nord. Le tableau 9 dresse la liste des réanalyses offrant les meilleures performances après post-traitement individuel des réanalyses pour chaque durée et chaque période de retour. Il convient de noter que les différences entre valeurs de MSE sont souvent très petites, suggérant que la sélection de l’une ou l’autre des réanalyses a peu de conséquence. De plus il faut noter que, sans surprise, le problème fondamental de sous-estimation des valeurs aux stations présentant les intensités les plus élevées persiste même après post-traitement.

Une fois les biais corrigés (figure 27), les patrons des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans diffèrent passablement pour les réanalyses CFSR et MERRA, comparativement aux valeurs non corrigées de la figure 24. Pour CFSR, le gradient sud-nord est plus important avec des valeurs d’environ 35 mm au sud et de 20 mm au nord, tandis que pour MERRA, les valeurs corrigées sont un peu plus importantes sur tout le territoire, allant de 30-35 mm au sud et de 25-30 au nord.

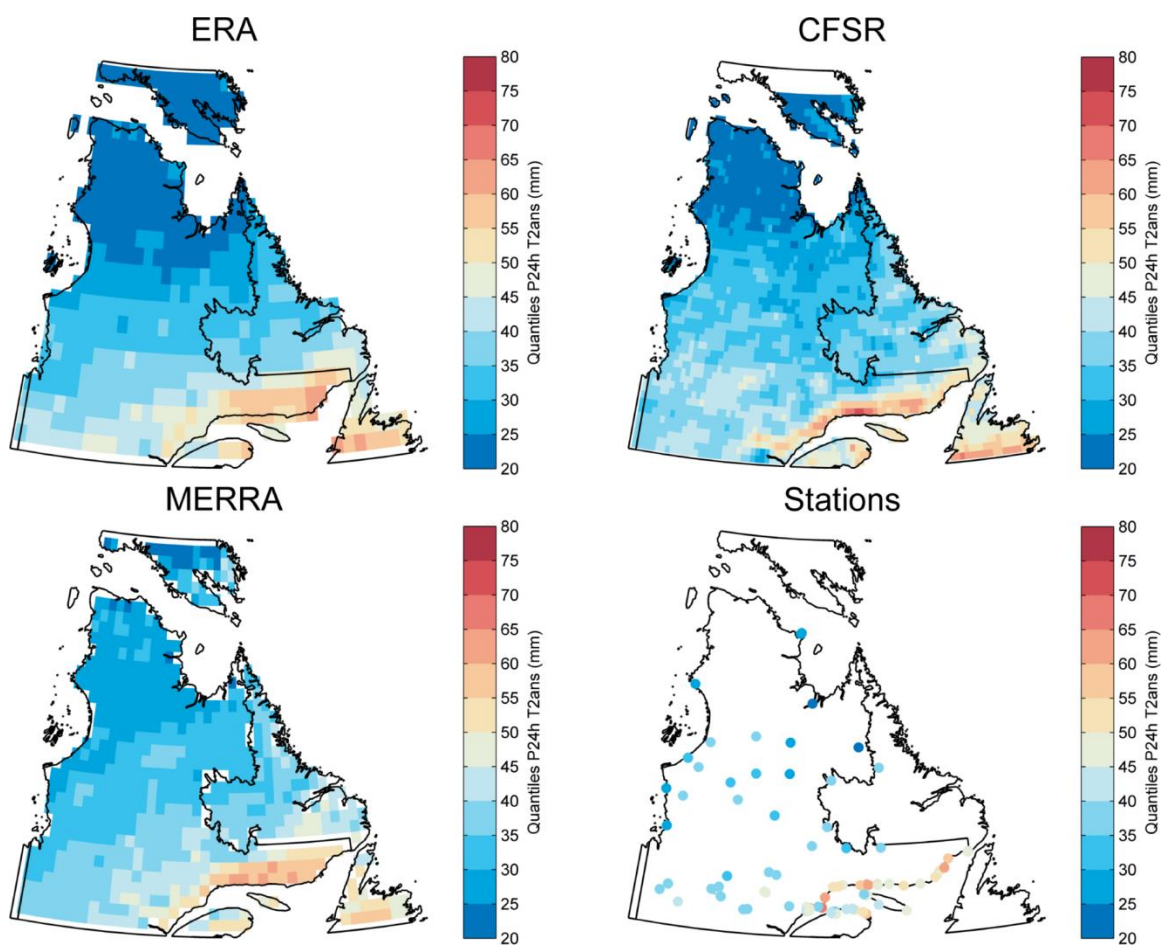


Figure 27. Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour les différentes réanalyses après post-traitement et carte correspondante aux stations.

Tableau 9. Réanalyse (ou paire de réanalyses) offrant le meilleur accord avec les intensités aux stations après post-traitement individuel (ou post-traitement par paire).

Période de retour	Durée		
	1 jour	3 jours	5 jours
2 ans	MERRA (ERA/CFSR)	MERRA (ERA/CFSR)	CFSR (ERA/CFSR)
5 ans	CFSR (ERA/CFSR)	CFSR (ERA/CFSR)	CFSR (ERA/CFSR)
10 ans	CFSR (CFSR/MERRA)	CFSR (ERA/CFSR)	ERA (ERA/CFSR)
20 ans	CFSR (CFSR/MERRA)	ERA (ERA/CFSR)	ERA (ERA/MERRA)

La deuxième approche de post-traitement consiste à combiner les intensités des précipitations extrêmes estimées à partir de chaque réanalyse. Il s'agit en quelque sorte de combiner de façon optimale les résultats des réanalyses. On peut montrer que l'accord entre les intensités de précipitations estimées en combinant les réanalyses et celles aux stations est toujours meilleur que l'accord entre les intensités de précipitations estimées à partir de chaque réanalyse prise individuellement et les intensités aux stations. Dans le cadre de la présente étude, les réanalyses ont été combinées par paire (ERA/CFSR, ERA/MERRA, CFSR/MERRA). La contrainte que la variance des quantiles aux points de grille soit égale à la variance de ces valeurs aux stations a également été imposée. Le Tableau 9 regroupe les paires de réanalyses (entre parenthèses) qui présentent les meilleures performances. On constate que la paire ERA/CFSR est souvent sélectionnée. Encore ici il convient d'observer que les écarts entre valeurs de MSE pour les différentes paires de réanalyses sont souvent petits et que le problème de sous-estimation évoqué plus haut demeure. Les figures 28 et 29 regroupent les cartes des intensités des maxima annuels de durée 1 jour de périodes de retour 2 ans et 20 ans respectivement (les cartes pour les autres durées et périodes de retour se trouvent dans Mailhot et al. 2015). Ces cartes représentent donc la meilleure estimation pour la combinaison de paires de réanalyses qu'il est possible d'obtenir à partir des réanalyses disponibles des intensités de précipitations extrêmes pour le territoire sous étude.

Les patrons de maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour différentes combinaisons de paires de réanalyses présentés à la figure 26, présentent généralement des valeurs qui varient de 30-35 mm au sud et de 20-25 mm au nord. La combinaison ERA-CFSR présente des valeurs plus faibles sur une plus grande région du nord que les combinaisons ERA-MERRA et CFSR-MERRA. Les maxima annuels 1 jour de période de retour 20 ans (figure 29) varient de 50-60 mm dans le sud à 30-40 mm pour certaines régions plus au nord.

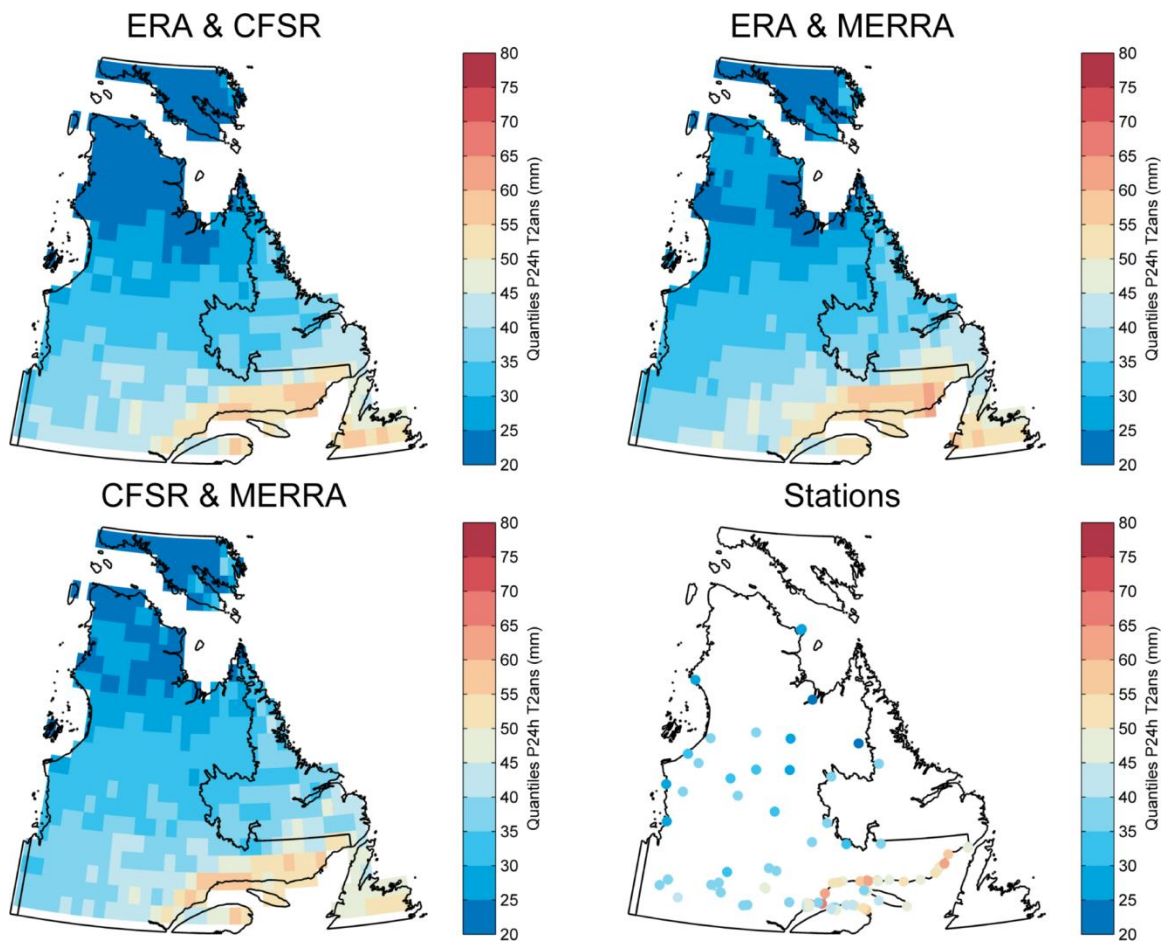


Figure 28. Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 2 ans pour les différentes combinaisons de paires de réanalyses après post-traitement et carte correspondante aux stations.

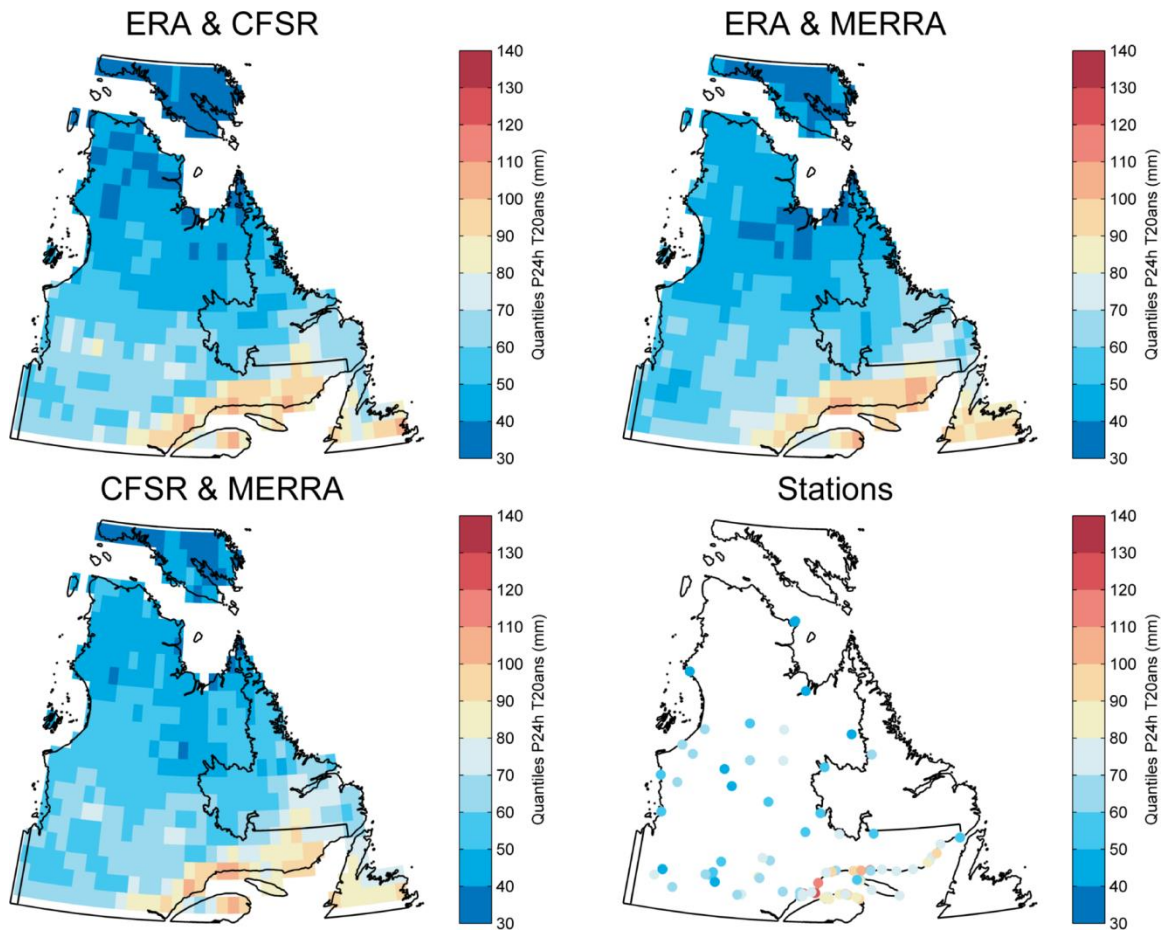


Figure 29. Cartes des hauteurs des maxima annuels de précipitations 1 jour de période de retour 20 ans pour les différentes combinaisons de paires de réanalyses après post-traitement et carte correspondante aux stations.

Afin d’avoir une estimation des incertitudes associées à ces valeurs en un site quelconque (pour lequel aucune série observée n’est disponible), les écarts-types entre intensités estimées à partir des réanalyses (ou paires de réanalyses) et les valeurs correspondantes aux stations ont été calculées pour l’ensemble des stations du territoire. L’hypothèse est que ces écarts-types sont représentatifs des écarts sur l’ensemble du territoire et donc des incertitudes associées aux estimations des réanalyses. Les résultats montrent que : 1) les écarts-types varient peu en fonction de la durée; 2) les paires de réanalyses réduisent systématiquement les écarts relatifs par rapport au cas des réanalyses post-traitées individuellement (bien que ces réductions soient modestes dans plusieurs cas); 3) les

écarts-types augmentent avec la période de retour (ce qui n'est pas surprenant compte tenu des incertitudes d'estimation plus élevées pour les événements plus rares donc de périodes de retour plus élevées). Les incertitudes d'estimation (écarts-types) des quantiles sont de l'ordre de $\pm 15 \%$ pour les périodes de retour 2, 5 et 10 ans et de l'ordre de $\pm 20 \%$ pour la période de retour 20 ans.

Les résultats de la présente étude montrent tout l'intérêt d'utiliser les réanalyses individuellement ou combinées pour l'estimation des intensités de pluies extrêmes dans le nord du Québec, et de façon plus générale dans les régions du nord, régions pour lesquelles la caractérisation des extrêmes de précipitations et des régimes climatiques pose problème compte tenu du faible nombre de stations et de l'immensité du territoire.

Ces travaux ouvrent des perspectives très intéressantes. D'abord en termes de post-traitement, le développement d'approche combinant trois réanalyses ou plus est à étudier. En effet, les résultats de la présente étude montrent qu'il peut s'avérer difficile de choisir une réanalyse parmi toutes celles disponibles, car elles se ressemblent toutes beaucoup. En combinant les réanalyses, il est possible d'éviter ce choix et de plutôt mettre à profit l'information provenant de toutes les réanalyses. Ce type d'approche montre toutefois ses limites et notamment à cause de son caractère 'déterministe' où une valeur de la réanalyse est associée de façon univoque à la valeur à une station. Il est clair qu'une approche de type stochastique où l'on associe une distribution de valeurs possibles à la station conditionnellement à la donnée de la valeur de la réanalyse doit être privilégiée (Maraun 2013). Une approche de ce type a d'ailleurs déjà été proposée par Wong et al. (2014).

CHAPITRE 7 : DISCUSSION ET CONCLUSION

Le projet *Élaboration du portrait climatique régional en soutien à l'analyse des vulnérabilités et au développement du Nunavik*, sous la responsabilité du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, visait à améliorer le niveau de connaissance du climat de cette région où le manque de données climatiques est un enjeu important. En effet, bien

que plusieurs récentes études démontrent que les changements climatiques risquent d'être particulièrement importants dans le Nord québécois, le faible nombre de stations climatologiques du réseau limite la capacité à analyser le climat passé et présent ainsi que les tendances, ce qui influence la capacité à bien évaluer l'ampleur des changements climatiques futurs.

La première étape du projet consistait à évaluer le potentiel de données interpolées sur grille et de réanalyses afin de décrire le climat du Nunavik. Deux jeux de données étaient à l'étude, soit un pour les températures et les précipitations (et leurs indicateurs climatiques dérivés) et un autre liés à la caractérisation du couvert de neige. Pour les variables de températures et de précipitations, une première sélection s'est faite sur la base de la résolution spatiale des différentes grilles des jeux de données, les grilles de plus de 100 km de côté ayant été retirées de la liste. Ce premier tri a permis de réduire à quatre le nombre de jeux de données interpolées (CANGRD, CRU T3.1, Willmott-Matsuura, NRCan) et de réanalyses potentiels (MERRA, ERA-Interim, JRA55, CFSR). Les valeurs de ces jeux de données ont ensuite été validées en les comparant aux données d'observations indépendantes du réseau CLIMATOLOGIE du MDDELCC.

Cette étape de validation révèle que les réanalyses offrent un potentiel très intéressant pour caractériser le climat passé du Nord québécois. Ce potentiel est lié au fait que, premièrement, les réanalyses offrent des données journalières qui permettent de calculer tous les indicateurs à l'étude, contrairement aux données interpolées qui offrent seulement des données mensuelles (sauf la base de données RNCan). De plus, la validation avec les données aux stations a démontré de plus grandes similitudes avec les réanalyses qu'avec les données interpolées notamment pour les précipitations. Les quatre réanalyses ont donc été utilisées pour construire les cartes du climat de référence. Le potentiel de trois des réanalyses choisies, soit MERRA, ERA-Interim et CFSR, avait d'ailleurs été démontré récemment (Linsday et al. 2014). La réanalyse JRA55 est très récente et donc peu étudiée. Notre analyse démontre qu'elle s'éloigne quelque peu des trois autres réanalyses, c'est-à-dire qu'elle présente de moins grandes similitudes avec

les données des stations indépendantes. Il est toutefois difficile de l'éliminer de la liste étant donné le faible nombre de stations indépendantes disponibles pour la validation.

L'utilisation des réanalyses pour construire le climat de référence est un enjeu important, car le climat de référence est généralement décrit à partir de données aux stations ou interpolées. Or, pour le Nunavik, l'analyse des bases de données climatiques disponibles révèle que l'utilisation des réanalyses offre un avantage certain sur les autres types de données. Ceci est relié à deux points importants. Premièrement, le nombre de stations météorologiques est faible dans le nord et ces stations offrent une couverture temporelle limitée, ce qui rend difficile une bonne analyse du climat passé. Deuxièmement, les jeux de données interpolées sont basés sur ces mêmes données aux stations. Or leur faible représentativité du territoire nordique influence négativement la capacité des jeux de données interpolées à bien caractériser le climat du territoire d'intérêt. Bien que les réanalyses assimilent les données d'observations, elles sont développées à l'aide d'un modèle de prévision météorologique afin de reproduire le climat passé. Ce type de données semble être une avenue intéressante pour pallier à la rareté des données d'observations dans la région nordique.

Pour les bases disponibles pour caractériser le couvert nival, la sélection s'est avérée plus ardue puisque les données de neige aux stations n'ont pu être utilisées étant donné la grande hétérogénéité spatiale de cette variable à l'intérieur même des points de grille. Autrement dit, la valeur à la station ne représente pas bien la valeur moyenne d'un point de grille. Un premier tri a permis d'éliminer les données sur une grille trop grossière pour le territoire (NCEP) ainsi que celles qui n'offraient pas une couverture temporelle suffisamment longue pour couvrir la période de référence (HQ Tabsoba, B2003, CMC). Enfin, les réanalyses restantes ont été comparées entre elles afin d'éliminer celles qui présentent des écarts trop importants par rapport aux autres. On obtient au final un ensemble de jeux de données pouvant être utilisé pour caractériser le couvert de neige sur le territoire. Il faut noter par contre que faute d'observations suffisantes, l'accord entre les jeux de données de cet ensemble ne veut pas forcément dire qu'il représente la

réalité avec plus d'exactitude. Le choix final des bases de données a été dicté en partie par un jugement d'experts et a mené à la sélection de deux bases de données, Liston-Hiemstra et Brown-Hiemstra. Il s'avère cependant que les résultats des deux bases de données sont passablement différents sur le territoire, ce qui limite la confiance dans cette cartographie. Par contre, les valeurs de précipitations solides s'accordent davantage avec les données de Liston-Hiemstra.

Une fois la sélection des bases de données effectuée, la synthèse régionale des variables et indicateurs climatiques ainsi que leur cartographie ont été réalisées pour la période 1981-2010. En tout, le projet aura généré plus de 100 cartes en format SIG, ainsi que des figures présentant l'évolution des indicateurs entre 1981 et 2010. À titre d'exemple, notre analyse montre que pour cette période, les températures augmentent, les précipitations totales sont à la hausse, la saison de croissance s'allonge, que l'équivalent en eau de la neige a peu changé et que la durée du couvert nival a diminuée. Ce phénomène semble principalement lié à une fin d'enneigement plus précoce et moins à un début plus tardif.

Une mise à jour de la cartographie des bioclimats au nord du 55^{ième} parallèle a aussi été réalisée avec les réanalyses sélectionnées précédemment. La mise à jour des bioclimats pour la période 1981-2010 est basée sur la classification de Litynski (tirée de Gerardin et McKenney 2001). La nouvelle classification offre un portrait sensiblement plus détaillé que celui présenté en 2001 et qui était basé sur des données d'observations aux stations pour la période 1966 à 1996. Ce niveau de détail n'est pas surprenant étant donné que les réanalyses sont interpolées sur une grille régulière de 50 km, offrant ainsi une information climatique plus riche spatialement que les stations utilisées à l'origine sur le territoire du Nunavik. On dénote à présent sept bioclimats pour la région au nord du 55°, comparativement à quatre dans la classification précédente. Bien que les grandes régions bioclimatiques soient sensiblement les mêmes, la mise à jour permet de décrire avec plus de précision certains éléments climatiques et topographiques importants, tels que la région montagneuse à la frontière de Terre-Neuve-et-Labrador.

Les résultats de cette étude ouvrent une avenue intéressante pour l'utilisation des réanalyses afin de caractériser le climat du Nord québécois. En effet, les cartes des indicateurs à l'étude fournissent une information qui n'était pas disponible à ce jour pour le Nunavik. L'analyse des bioclimats semble aussi avoir ajouté un niveau de détails intéressant par rapport à la carte qui était utilisée à ce jour. Finalement, la pertinence des réanalyses pour l'estimation des intensités de pluies extrêmes dans le nord du Québec a été démontrée et le patron spatial de ces pluies a pu être cartographié.

Il faut néanmoins mettre les utilisateurs de cette information en garde par rapport aux incertitudes associées aux valeurs présentées sur les différentes cartes. En effet, les écarts entre les différentes réanalyses, particulièrement pour les précipitations liquides et sous forme de neige, montrent à quel point les incertitudes demeurent grandes pour l'information climatique du Nord québécois. Il nous est toujours impossible de favoriser l'une ou l'autre des bases de données analysées ici, en grande partie dû au manque des données d'observations qui pourraient servir à valider les jeux de données. Il faut donc utiliser l'information présentée ici de façon relativement prudente.

CHAPITRE 8 : RECOMMANDATIONS

Le manque criant de données au nord du Québec demeure un enjeu important. Une bonne compréhension du climat passé n'est possible qu'avec l'appui de données d'observations adéquates. Bien que les résultats du projet démontrent que les réanalyses peuvent servir à pallier un certain manque de données dans le nord, il n'en est pas moins que ces données de réanalyses doivent tout de même être validées avec de 'vraies' données. Or le manque de données de stations dans le nord est problématique. Non seulement le nombre de stations est faible, mais ces stations ne couvrent souvent que de très courte période de temps. Il nous apparaît donc important de recommander l'ajout de stations dans le nord ainsi que le maintien de ces infrastructures à long terme. Ces données sont importantes non seulement pour comprendre le climat passé, mais servent aussi à valider les modèles climatiques utilisés pour évaluer les changements futurs.

Le même constat s'applique pour le régime hydrique du Nord québécois, très peu étudié jusqu'ici. Le faible nombre de stations d'observations de jaugeages est un enjeu majeur qui se doit d'être considéré dans le futur afin de pouvoir analyser le régime des rivières nordiques de façon plus robuste.

Une des variables très importantes pour les infrastructures nordiques est sans contredit le vent, particulièrement les vents de pointe. Or, cette variable n'a été prise en compte ici que de façon sommaire à l'aide d'informations déjà disponibles dans la littérature. Cette limite est due principalement au fait que les données d'observations des vents sont quasiment inexistantes. En effet, bien que les données de stations discutées au paragraphe précédent offrent généralement toutes des données de températures et de précipitations, elles n'offrent pas de données sur les vents. En fait, très peu de stations météorologiques installées au Canada ont les installations nécessaires pour mesurer le vent. Ceci fait en sorte que les bases de données interpolées de vent ne sont pas disponibles. De plus, sans données aux stations, il est impossible de bien valider les données des réanalyses. Ce type de données offre un potentiel intéressant pour les températures et les précipitations et il serait intéressant d'analyser leur potentiel pour caractériser le vent. Bien que ce développement des connaissances sur les vents demanderait un effort important, il semble qu'il soit indispensable.

BIBLIOGRAPHIE

- Allard M, Lemay M (dir). 2013. Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. Québec, Canada : ArcticNet Inc. 318 p
- Adler RF, Huffman GF, Chang A., Ferraro R., Xie P-P, Janowiak J, Rudolf B, Schneider U, Curtis S, Bolvin D, Gruber A, Susskind J, Arkin ., Nelkin E. 2003. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *J. Hydrometeor.* 4(6): 1147-1167.
- Brohan P, Kennedy JJ, Harris I, Tett SFB, Jones, PD. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 111(D12): 1-21.
- Brown, RD. 2010. Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948-2005. *Hydrological Processes*. 24(14):1929-1954.
- Brown RD, Brasnett B. 2010 Updated Annually. *Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data*. © Environment Canada. Boulder, Colorado USA : National Snow and Ice Data Center.
- Brown RD, Brasnett B, Robinson D. 2003. Gridded North American monthly snow depth and snow water equivalent for GCM evaluation. *Atmosphere-Ocean*. 41 : 1–14.
- Brown RD, Derksen C. 2013. Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environ. Res. Lett.* 8(2) : 024006
- Brown R, Lemay M. 2013. Variabilité et changements climatiques dans la péninsule du Nunavik et du Nunatsiavut (IRIS de la région subarctique de l'Est du Canada), chapitre 2 dans Allard M, Lemay M (dir). Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. Québec, Canada : ArcticNet Inc. 318 p
- Compo GP, Whitaker JS, Sardeshmukh PD, Matsui N, Allan RJ, Yin X, Gleason BE, Vose RS, Rutledge G, Bessemoulin P., Brönnimann S, Brunet M., Crouthamel RI, Grant AN, Groisman PY, Jones PD, Kruk MC, Kruger AC, Marshall GJ, Maugeri M, Mok HY, Nordli Ø, Ross TF, Trigo RM, Wang XL, Woodruff D, Worley SJ. 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654): 1-28.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Holm EV, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette JJ, Park BK, Peubey C, de Rosnay P, Tavalato C, Thépaut N, Vitart F. (2011). The ERA-Interim reanalysis:

- configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656) : 553-597.
- Derksen C, Smith SL, Sharp M, Brown L, Howell S, Copland L., Mueller DR, Gauthier Y, Fletcher CG, Tivy A, Bernier M, Bourgeois J, Brown R, Burn CR, Duguay C, Kushner P, Langlois A, Lewkowicz AG, Royer A, Walker A. 2012. Variability and change in the Canadian cryosphere. *Climatic Change*. 115(1): 59-88.
- Déry SJ, Wood EF. 2004. Teleconnection between the Arctic Oscillation and Hudson Bay river discharge. *Geophys. Res. Letters*. 31(18): 2-5.
- Déry SJ, Wood EF. 2005. Decreasing river discharge in northern Canada. *Geophys. Res. Letters*. 32(10):1-4.
- Déry SJ, Stieglitz M, McKenna EC, Wood EF. 2005. Characteristics and trends of river discharge into Hudson, James, and Ungava bays, 1964– 2000. *J. Clim.* 18 : 2540–2557.
- Déry SJ, Hernández-Henríquez MA, Burford JA, Wood EF. 2009. Observational evidence of an intensifying hydrological cycle in northern Canada. *Geophys. Res. Letters*. 36(13): L13402.
- Gervais M, Gyakum JR, Atallah EH, Tremblay LB. 2014. How Well Are the Distribution and Extreme Values of Daily Precipitation over North America Represented in the Community Climate System Model? A Comparison to Reanalysis, Satellite, and Gridded Station Data, *J. Climate* 27 : 5219-5239.
- Gerardin V, McKenney K. 2001. Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec. Direction du patrimoine écologique et du développement durable, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de Lutte contre les changements climatiques. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/classification/>
- Guay, C., Minville, M., Braun, M. 2015. A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec, *Can. Water Res. J.*, 40 : 285-302.
- Hansen JR, Ruedy R, Sato M, Lo K. 2010. Global surface temperature change. *Rev. Geophys.* 48(4) : RG4004.
- Harris I, Jones PD, Osborn TJ, Lister DH. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset. *Int. J. Clim.* 34, 623-642
- Holland MM, Finnis J, Barrett AP, Serreze MC. 2007. Projected changes in Arctic Ocean freshwater budgets. *J. Geophys. Res.* 112(4) : 1-13.
- Huntington TG. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319(1-4): 83-95.

- Hutchinson MF, McKenney DQ, Lawrence K, Hopkinson RF, Milewska E, Papadopol P. 2009. Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum–Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48 : 725–741.
- Jones PD, Lister DH, Osborn TJ, Harpham C, Salmon M, Morice CP. 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *J. Geophys. Res.* 117(5).
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang, S–K, Hnilo JJ, Fiorino M, Potter GL. 2002. NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 83(11) : 1631-1643
- Kottke M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3) : 259-263.
- Lindsay R, Wensnahan M, Schweiger A, Zhang J. 2014. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *J Climate* 27(7) : 2588-2602.
- Liston GE, Hiemstra CA. 2011. The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979-2009). *J Climate* 24(21) : 5691-5712.
- Litynski, J. 1988. Climat du Québec d’après la classification numérique. Carte de format 100 x 130 cm. Éditions Gamma.
- Mailhot A, Talbot G, Aubin P, Bolduc S. 2015. Évaluation du potentiel des réanalyses pour l’estimation des intensités des précipitations extrêmes pour le nord québécois. Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement (Rapport de recherche R1629). 95 p.
- Maraun D. 2013. Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *J. Climate* 26(6) : 2137-2143.
- McKenney DW, Hutchinson MF, Papadopol P, Lawrence K, Pedlar J, Campbell K, Milewska E, Hopkinson RF, Price D, Owen T. (2011) Customized spatial climate models for North America. *Bulletin of the American Meteorological Society* 92(12): 1611-1622.
- MDDELCC. 2014. Surveillance du Climat. Ministère du Développement durable, de l’environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp>
- Mesinger F, DiMego G, Kalnay E, Mitchell K, Shafran PC, Ebisuzaki W, Jović D, Woollen J, Rogers E, Berbery EH, Ek MB, Fan Y, Grumbine R, Higgins W, Li H, Lin Y, Manikin G, Parrish D, Shi W. 2006. North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87(3): 343-360.

- Mudryk LR, Derksen C, Kushner CJ, Brown R. 2015. Characterization of Northern Hemisphere Snow Water Equivalent Datasets, 1981–2010. *Journal of Climate* 150904104833007. Repéré à <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-15-0229.1>
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, Sakamoto M, Kobayashi S, Hatsushika H, Matsumoto T, Yamazaki N, Kamahori H, Takahashi K, Kadokura S, Wada K, Kato K, Oyama R, Ose T, Mannoji N, Taira R. 2007. The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan* 85 : 369-432.
- Ouranos (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 79 p.
- Overland JE, Wang M. 2005. The third Arctic climate pattern: 1930s and early 2000s. *Geophys. Res. Letters* 32(23): 1-4.
- Rapaic M, Brown R, Markovic M, Chaumont D. 2015. An Evaluation of Temperature and Precipitation Surface-Based and Reanalysis Datasets for the Canadian Arctic, 1950–2010. *Atmosphere-Ocean* 53(3) : 283-303.
- Rienecker MM, Suarez MJ, Gelaro R, Todling R, Bacmeister J, Liu E, Gosilovich MG, Schubert SD, Tacaks L, Kim GK, Bloom S, Chen J, Collins D, Conaty A, da Silva A, Gu W, Joiner J, Koster RD, Lucchesi R, Molod A, Owens T, Pawson S, Pegion P, Redder CR, Reichle R, Robertson FR, Ruddick AG, Sienkiewicz M, Woollen J. 2011. MERRA : NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate* 24(14) : 3624-3648.
- Saha S, Shrinivas M, PanH-L, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen H, Behringer D, Liu H, Stokes D, Grumbine R, Gayno G, Wang J, Hou Y-T, Chuang H-Y, Juang H-MH, Sela J, Iredell M, Treadon R, Kleist D, Van Delst P, Keyser D, Derber J, Ek M, Meng J, Wei H, Yang Rongqian, Lord, Y, van den Doll H, Kumar A, Wang W, Long C, Chelliah M, Xue Y, Huang B, Schemm J-K, Ebisuzaki W, Lin R, Xie P, Chen M, Zhou S, Higgins W, Zou C-Z, Liu Q, Chen Y, Han Y, Cucurull, L, Reynolds RW, Rutledge G, Goldberg M. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 91(8) : 1015-1057.
- Schneider U, Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, Ziese M, Rudolf, B. 2013. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology* 115(1-2): 15-40
- Takala M, Luojus K, Iliainen J, Derksen C, Lemmetyinen J, Petri Kärnä J, Koskinen J, Bojkov B. 2011. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment* 115(12) : 3517-3529.
- Thistle MÉ, Caissie D. 2013. Trends in air temperature, total precipitation, and streamflow characteristics in eastern Canada. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 3018. Moncton, New Brunswick. 109 p.

- Tivy A, Howell SEL, Alt B, McCourt S, Chagnon R, Crocker G, Carrieres T, Yackel JJ. 2011. Trends and variability in summer sea ice cover in the Canadian Arctic based on the Canadian Ice Service Digital Archive, 1960–2008 and 1968–2008. *J. Geophys. Research* 116 : C03007.
- Tranter M, Jones HG. 2001. The chemistry of snow: Processes and nutrient cycling. *Dans Snow Ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*. Jones HG, Pomeroy JW, Walker DA, Homan RW (dir). Cambridge : Cambridge University Press, 127-167.
- Uppala SM, KÅllberg PW, Simmons AJ, Andrae U, Da Costa Bechtold V, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars, ACM, van de Berg, L, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Fragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen I, Hanssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf J-F, Morcrette J-J, Rayner NA, Saudnders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Vitervo P, Woollen J. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 131 : 2961-3012.
- Vaughan DG, Comiso JC, Allison J, Carrasco G, Kaser R, Kwok P, Mote P, Murray T, Paul F, Ren J, Rignot E, Solomina O, Steffen K, Zhang T. 2013. Observations : Cryosphere. *Dans Climate Change 2013 : The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change*. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (dir.) United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- Wan H, Wang XL, Swail VR. 2010. Homogenization and Trend Analysis of Canadian Near-Surface Wind Speeds. *J. Climate* 23(5) : 1209-1225.
- Willmott CJ, Matsuura K. 1995. Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States. *J. Appl. Meteorol.* 34: 2577-2586
- Wong G, Maraun D, Vrac M, Widmann M, Eden JM, Kent T. 2014. Stochastic Model Output Statistics for Bias Correcting and Downscaling Precipitation Including Extremes. *J. Climate* 27(18): 6940-6959.
- Yue S, Pilon P, Phinney B. 2003. Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. *Hydrological Sciences J.* 48(1): 51-63.
- Zhang X, Vincent LA, Hogg WD, Niitsoo A. 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean* 38(3): 395-429.
- Zhang X, Harvey KD, Hogg WD, Yuzyk TR. 2001. Trends in Canadian streamflow. *Water Resour. Res.* 37(4): 987-998.