

Atlas de la Biodiversité du Québec nordique

Analyses et scénarios climatiques



Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet soutenu par la mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006–2012 du gouvernement du Québec.



Atlas de la Biodiversité du Québec nordique

Analyses et scénarios climatiques

Auteur: Maja Rapaic

Contributeurs: Ramón de Elía, Diane Chaumont, Anne Frigon, Jason Samson et Robert Siron

Table des matières

Table des matières	v
Remerciements	viii
Liste d'acronymes	ix
1 Introduction	1
2 Données disponibles	3
2.1 Observations aux stations	5
2.2 Observations sur grille régulière – modèles d'interpolation	6
2.2.1 Données CRU2	6
2.2.2 Données NRCan/RNCan	7
2.2.3 Données NLWIS/SNITE	7
2.3 Réanalyses d'observations	7
2.3.1 Réanalyses "NARR"	8
2.3.2 Réanalyses de Brown et al. (2003)	8
2.4 Données satellitaires - MODIS	9
2.5 Modèles dynamiques du climat	9
3 Analyses effectuées	12
3.1 Validation des données d'observations sur grille régulière par le modèle ANUS- PLIN à 2 km	13
3.2 Comparaisons avec les observations aux stations	13
3.2.1 Validation des observations sur grille régulière par des stations RTA	15
3.2.2 Comparaison des modèles NARCCAP aux stations RTA	15
3.2.3 Comparaison du modèle MRCC aux stations RTA	15
3.2.4 Comparaison des modèles NARCCAP aux stations EC	16
3.2.5 Comparaison du modèle MRCC aux stations EC	16

3.3	Validation du MRCC à 15km par les données NRCAN	16
3.4	Comparaison des différentes simulations du MRCC	17
3.5	Régionalisation : tendances observées versus simulées	17
3.6	Validation de la simulation MRCC à 15 km pour la neige	18
3.6.1	Équivalent en eau de la neige : qc15 versus réanalyses de Brown et al. (2003)	19
3.6.2	La neige au sol : MRCC à 15 km versus stations	19
4	Résultats : analyse du climat présent	20
4.1	Validation des données d'observations sur grille régulière par le modèle ANUS- PLIN à 2 km	20
4.1.1	CRU2 à 50 km versus ANUSPLIN à 2 km	20
4.1.2	NRCAN à 10 km versus ANUSPLIN à 2 km	21
4.2	Validation des données par les observations aux stations	21
4.2.1	Données sur grille régulière versus stations RTA	21
4.2.2	Modèles NARCCAP versus stations RTA	24
4.2.3	Modèle MRCC versus stations RTA	28
4.2.4	Modèles NARCCAP versus stations EC	28
4.2.5	Modèle MRCC versus stations EC	28
4.3	Validation du MRCC à 15km par les données NRCAN	33
4.4	Comparaison des différentes simulations du MRCC	33
4.4.1	qc15 versus qc45	41
4.4.2	qc15 versus amno45	41
4.5	Validation du MRCC par des séries temporelles aux stations	50
4.5.1	Validation du MRCC par des stations d'EC avec les séries temporelles les plus longues	50
4.5.2	Validation du MRCC par des stations de RTA	50
4.6	Validation de la simulation qc15 : la neige	56
4.6.1	Équivalent en eau de la neige : qc15 versus réanalyses Brown et al. (2003) .	56
4.6.2	La neige au sol : qc15 versus stations	63
5	Indices bioclimatiques : climat présent	69
5.1	Saison de croissance	70
5.1.1	Degrés-jours de croissance	71
5.1.2	Saison de dormance	76
5.2	Événements de gel-dégel	80
5.3	Températures extrêmes	80
5.4	Période d'endurcissement	82
5.5	Période de désendurcissement	87
5.6	Saisonnalité	89
5.7	Évapotranspiration potentielle	91
5.8	Budget hydrique	97
5.9	Période avec la neige	97

5.10	Discussion	100
6	Scénarios climatiques pour l'horizon 2050	101
6.1	Méthode des deltas	101
6.2	Climat de référence	102
6.3	Simulations du climat futur	102
6.3.1	Modèles du climat globaux (MCGs)	102
6.3.2	Modèles régionaux du climat (MRC)	102
6.4	Les changements climatiques projetés pour le Nord du Québec	105
6.4.1	Température moyenne, minimale et maximale annuelle	105
6.4.2	Température moyenne, minimale et maximale saisonnière	105
6.4.3	Précipitation moyenne annuelle	110
6.4.4	Précipitation moyenne saisonnière	110
6.4.5	Longueur de la saison de croissance	121
6.4.6	Degrés-jours de la saison de croissance	121
6.4.7	Longueur de la saison de dormance	122
6.4.8	Température moyenne, minimale et maximale pendant la saison de croissance	124
6.4.9	Précipitation moyenne pendant la saison de croissance	140
6.4.10	Température moyenne, minimale et maximale pendant la saison de dormance	140
6.4.11	Précipitation moyenne pendant la saison de dormance	153
6.4.12	Événements de gel-dégel	153
6.4.13	Températures extrêmes	177
6.4.14	Degrés-jours de températures extrêmes	186
6.4.15	Période d'endurcissement	195
6.4.16	Période de désendurcissement	204
6.4.17	Saisonnalité de la température et de la précipitation	204
6.4.18	Évapotranspiration potentielle	205
6.4.19	Budget hydrique	207
6.4.20	Jours consécutifs sans précipitation	212
6.4.21	Longueur de la période nivale	214
7	Discussion et conclusion	221
	Bibliographie	225

Remerciements / Financement

Ce travail a été financé par le Fonds Vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 du Gouvernement du Québec (PACC26-Ouranos). Remerciements aussi à l'équipe de *Data Access Integration, (DAI)* <http://loki.qc.ec.gc.ca/DAI> d'avoir fourni les données de stations d'observations. Le Service national d'information sur les terres et les eaux et Ressources naturelles Canada ont produit et donné accès à des ensembles de données historiques maillées. Merci à l'équipe Simulations climatiques d'Ouranos pour la production des données du MRCC. Finalement, Ross Brown et Line Bourdages ont apporté des commentaires constructifs ainsi qu'une aide précieuse.

LISTE D'ACRONYMES

AMNO	Domaine du Modèle régional canadien du climat sur l'Amérique du Nord
amno45	Simulation du Modèle régional canadien du climat à 45 km de la résolution sur le domaine AMNO
CEN	Centre d'études nordiques
CEPMET	Centre européen pour la prévision météorologique à moyen terme
CRU	Climatic Research Unit
CRCM	Canadian Regional Climate Model
DAI	Data Access Integration Portal
DJF	Saison d'hiver : décembre-janvier-février
EC	Environnement Canada
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
EEN	Équivalent en eau de neige
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
JJA	Saison d'été : juin-juillet-août
MAM	Saison de printemps : mars-avril-mai
MCG	Modèles de circulation général
MCGAO	Modèle de la circulation générale couplé atmosphère-océan
MODIS	MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRC	Modèle régional du climat
MRCC	Modèle régional canadien du climat
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
NARR	North American Regional Reanalysis
NASA	National Aeronautic and Space Administration
NLWIS	National Land and Water Information Service
NRCan	Natural Resources Canada
PCMDI	Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison
RNCan	Ressources naturelles Canada

RTA	Rio Tinto Alcan
QC	Domaine du Modèle régional canadien du climat sur le Québec
qc15	Simulation du Modèle régional canadien du climat à 15 km de la résolution sur le domaine du Québec
qc45	Simulation du Modèle régional canadien du climat à 45 km de la résolution sur le domaine de l'Amérique du Nord
SNITE	Service national d'information sur les terres et les eaux
SON	Saison d'automne : septembre-octobre-novembre
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SWE	Snow water equivalent
WG1-AR4	Working Group I - Fourth Assessment Report

Introduction

Les changements climatiques, selon certaines recherches (par exemple, Dawson et al. (2011)), représentent une des principales menaces pour la biodiversité au 21^e siècle. Il est prévu que les changements climatiques modifieront la dynamique des écosystèmes tels que : migration de certaines espèces vers le nord ou vers des altitudes plus élevées, réduction des habitats des espèces nordiques qui n'auront plus assez d'espace pour leurs migrations saisonnières, invasion des espèces exotiques causant différentes interactions avec les espèces indigènes, etc. En même temps, les changements climatiques provoqueront des modifications dans le cycle des perturbations naturelles telles que les feux de forêt, ce qui aura aussi des impacts sur la biodiversité. Il est prévu que la fréquence des feux de forêt augmentera dans le futur (Flannigan et al. (2001)). Cela aura divers effets sur les espèces forestières, par exemple : la disparition (temporelle ou permanente) de certaines espèces après un feu, des changements dans la composition et dans la structure de la forêt, l'accélération de la migration vers le nord, etc. (Flannigan et al. (2001), Schenk (1996)). Toutes ces perturbations auront de nombreuses répercussions sur toutes les espèces - végétales et animales - de l'écosystème forestier. Une autre conséquence des changements dans le cycle des feux de forêt est une modification du cycle de carbone qui aura un grand impact sur la concentration de CO_2 dans l'atmosphère et dans le sol conduisant à différents effets sur le climat futur, et par conséquent, sur la biodiversité. Étant donné que les changements climatiques prévus seront les plus importants dans les régions nordiques, leurs impacts sur la biodiversité seront aussi majeurs dans ces régions. Afin de faire face aux changements climatiques et d'adopter un plan d'adaptation, il est nécessaire d'améliorer nos connaissances sur les impacts potentiels de ces changements sur les écosystèmes nordiques. D'abord, il faut mieux connaître la relation entre le climat présent et les écosystèmes adaptés aux conditions actuelles pour pouvoir ensuite, prévoir correctement les changements que subiront ces écosystèmes dans le futur. Pour cette raison, le développement de l'Atlas de la biodiversité nordique représente une tâche primordiale. Cet Atlas est un projet de la Direction du patrimoine écologique et des parcs du Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP) du Gouvernement du Québec qui comporte plusieurs volets thématiques, dont un sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité et les écosystèmes nordiques. Ce volet sur les changements climatiques a été piloté par Ouranos, en collaboration avec le MDDEP, et représente une contribution à la mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 du

gouvernement du Québec.

Trois territoires d'intérêt principal ont été choisis pour ce projet : la Basse Côte Nord, la Baie James et la Péninsule d'Ungava. Sur l'ensemble de ces trois régions, l'objectif était de mettre en parallèle le climat passé avec le climat projeté dans le futur en tenant compte des changements climatiques appréhendés. Avant d'étudier le scénario du climat futur, il était nécessaire de réaliser une analyse détaillée des conditions climatiques prévalant durant le passé récent ainsi qu'une évaluation de la variabilité naturelle du climat du Québec nordique.

Dans ce but, le projet a été divisé en trois étapes. La première étape a consisté en une revue de littérature portant sur le climat passé, avant et pendant le dernier âge glaciaire, soit du 13^e au 18^e siècle. Des études paléoclimatiques, des documents historiques, des reconstructions du climat passé, etc. ont été considérés au cours de cette première partie. Cette étape avait pour but de recenser les connaissances que nous avons sur le climat passé du Québec. Les résultats de cette revue de littérature nous ont permis de constater le peu d'études effectuées sur le nord du Québec. Néanmoins, certaines études ont été faites pour le sud de la province et pour d'autres pays nordiques et leurs résultats ont été examinés au cours de cette première partie du projet. Les résultats de cet exercice ne seront pas inclus dans ce document.

La deuxième partie portait sur le climat présent du Québec. Afin de caractériser le climat présent, une étude approfondie des diverses sources d'observations des variables environnementales a été réalisée – en particulier de la température de l'air à 2m et de la précipitation. Les sources des données analysées comprennent différents réseaux de stations météorologiques, plusieurs grilles d'observations interpolées et des modèles climatiques à différentes résolutions. L'objectif était d'exploiter au maximum les opportunités que ces données nous offrent pour mieux caractériser le climat du nord du Québec, ainsi que d'évaluer l'incertitude dans nos connaissances du climat de cette région. La comparaison de ces données nous a permis de caractériser les régions et sous-régions climatiques et d'évaluer la variabilité climatique que subissent les différents systèmes écologiques.

La troisième étape du projet concernait les scénarios du climat futur simulés par des modèles globaux et régionaux du climat. Afin de relier les paramètres climatiques avec les facteurs biologiques, différents indices bioclimatiques ont été définis. Ces indices font le lien entre les variables climatiques principales telles que la précipitation et la température de l'air et les différentes étapes du développement phénologique des plantes : le bourgeonnement, la floraison, la saison de croissance, etc. Ainsi, certains indices sont associés au stress thermique et hydrique que les végétaux subissent dans certaines conditions météorologiques telles que la sécheresse ou les températures extrêmes. Mentionnons que certains indices, notamment les indices d'endurcissement et désendurcissement, ont été peu utilisés jusqu'à date en Science du climat à Ouranos. Les définitions sont nombreuses et variées, des discussions lors de l'utilisation des résultats présentés ici pourraient s'avérer nécessaires.

Le chapitre 2 du document présente les données disponibles. Les analyses du climat présent sont décrites dans le chapitre 3, tandis que les résultats de ces analyses sont présentés dans le chapitre 4. Les indices bioclimatiques développés pour ce projet font l'objet du chapitre 5 et les scénarios du climat futur sont présentés dans le chapitre 6. Finalement, les discussions et les conclusions de cette étude sont proposées dans le chapitre 7.

Données disponibles

Ce chapitre présente une revue des diverses sources de données disponibles (plus particulièrement pour la température de l'air à 2 mètres et pour la précipitation) qui ont été considérées pour dresser un portrait du climat présent du Québec nordique et évaluer sa variabilité climatique. Le tableau 2.1 résume les diverses sources de données dont nous disposons et présente les périodes qu'elles couvrent.

La première colonne du tableau contient les données aux stations d'observations de surface provenant des réseaux des différents partenaires : Environnement Canada (EC), Rio Tinto Alcan (RTA) et le Centre d'études nordiques (CEN).

Dans la deuxième colonne du tableau 2.1, nous présentons des observations sur grille régulière à différentes résolutions spatiales. Trois premières bases de données (CRU2, NRCAN, ANUSPLIN) sont disponibles à l'échelle mensuelle et la dernière (NLWIS) est fournie à l'échelle quotidienne. Toutes ces quatre bases de données ont été produites en utilisant la méthode d'interpolation ANUSPLIN¹ (Hutchinson (1991)). Les valeurs mesurées aux stations servent de données de base pour générer les données interpolées sur une grille régulière. Dans le cas de la température, l'interpolation sur une grille est produite en tenant compte de l'élévation du terrain.

Nous disposons aussi des simulations de modèles dynamiques du climat (troisième colonne du tableau 2.1). Plusieurs simulations du Modèle régional canadien du climat (MRCC version 4, Musić and Caya (2007) ; Caya and Laprise (1999)), produites par Ouranos, sont utilisées dans notre étude. Nous avons basé notre analyse sur des simulations à une résolution horizontale de 45 km produites sur deux domaines de tailles différentes – l'un couvrant l'Amérique du Nord (domaine "AMNO" d'environ 9000 km par 8646 km) et l'autre plus petit, plutôt centré sur le Québec et couvrant le nord-est de l'Amérique du Nord (d'environ 3375 km par 3375 km), ainsi qu'une simulation à une résolution plus fine de 15 km également produite sur le domaine centré sur le Québec. Toutes les simulations historiques du MRCC couvrent la période de 40 ans (1961-2000). Dans une région similaire à celle couverte par le domaine "AMNO", nous disposons également de plusieurs simulations effectuées par d'autres groupes de recherche dans le cadre du projet NARCCAP ("North American Regional Climate Change Assessment Program", Mearns et al. (2009)). Tous ces mo-

1. "software package, which employs thin plate smoothing splines to develop elevation dependent spatially continuous climate surfaces from noisy weather station data"

dèles régionaux du climat ont produit des simulations historiques à une résolution d'environ 50 km pour la période de 1980-2000. Toutes les données de simulations de modèles de climat régionaux sont généralement disponibles à toutes les 3 ou 6 heures.

Les données NARR ("North American Regional Reanalysis", Mesinger et al. (2006)) proviennent des réanalyses régionales qui couvrent l'Amérique du Nord à 0.3° de résolution (environ 32 km) sur une période de 25 ans (1979-2003). Elles sont disponibles toutes les 3 heures. Les réanalyses de Brown et al. (2003) fournissent des données quotidiennes de l'équivalent en eau de neige et de la hauteur de neige pour la période 1979-1997 au-dessus de l'Amérique du Nord à 0.3° de résolution sur une projection latitude-longitude.

Finalement, la cinquième colonne du tableau 2.1 présente les données satellitaires provenant d'instruments du module MODIS ("Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer", <http://modis.gsfc.nasa.gov/>) installés sur les plateformes "Terra" et "Aqua" de la NASA ("National Aeronautics and Space Administration"). Ces deux satellites ont été lancés en 1999 (Terra) et en 2002 (Aqua) afin de mesurer les traces de gaz à effet de serre, la couverture et le type de nuages, la radiation solaire et terrestre, les aérosols, etc. Les instruments sur ces plateformes mesurent à une résolution spatiale très élevée (1pixel = 1km²) et ont une couverture globale presque journalière ("near daily global coverage").

TABLE 2.1: Données disponibles pour une analyse du climat du Nord du Québec

Stations	Observations interpolées	Modèles climatiques	Réanalyses	Satellites
Environnement Canada (EC) 18xx-2000	CRU TS2.02 à 0.5° lat-lon (1901-2000)	MRCC4 à 45km (1961-2000)	NARR à 0.3° lat-lon (1979-2003)	MODIS à 1kmx1km à partir de 2002
Rio Tinto Alcan (RTA) à partir de 1957 à 2010	NRCAN à 10km (1901-2005)	MRCC4 à 15km (1961-2000)	Brown et al. (2003) à 0.3° lat-lon (1979-1997)	
Centre d'études nordiques (CEN) à partir de 2004/2005	ANUSPLIN à 2km (1961-2006)	NARCCAP à 50km (1980-2000)		
	NLWIS à 10km (1961-2003)			

2.1 Observations aux stations

Parmi les trois sources de données d'observations aux stations, le réseau de stations d'EC est celui qui contient le plus de stations. Ces données sont disponibles sous forme homogénéisée pour la température et la précipitation (voir explication plus loin) pour la période 1961-2000 (Vincent et al. (2002), Devine and Mekis (2008)). Il y a également des stations qui couvrent une période plus longue (avant 1961 et après 2000) et celles-ci sont disponibles à travers le portail DAI, "Data Access Integration Portal", <http://loki.qc.ec.gc.ca/DAI>. Nous avons utilisé ces données dans la section 3.5 de chapitre 3 afin d'analyser l'évolution du climat observée et simulée par le MRCC dans les régions d'intérêt. Les stations d'EC mesurent minimalement la température (minimale et maximale) et le taux de la précipitation mais peuvent également fournir des informations sur la hauteur de la neige, le vent, l'enneigement, la pression en surface, etc. Par contre, ces mesures ne sont pas faites systématiquement à toutes les stations. Une faiblesse importante de ce réseau est sa couverture insuffisante sur les territoires nordiques. Afin de pallier ce problème dans les régions nordiques qui nous intéressent particulièrement, nous avons exploré des données provenant d'autres sources. Parmi ces sources, il y avait les données du réseau de stations d'Hydro-Québec mais elles n'ont pu pas être utilisées dans notre analyse climatique car la période couverte est trop courte (les données validées sont disponibles seulement à partir de l'année 2005). Le réseau de stations du Centre d'études nordiques (CEN), mis en place en 2004/2005, pourrait être combiné avec des observations satellitaires afin de fournir des informations plus complètes sur le climat nordique pendant les années très récentes mais elles couvrent une trop courte période pour les utiliser dans une analyse climatique. Finalement, les stations de RTA sont situées autour du 49° parallèle (dans la région du bassin versant du Lac Saint-Jean) et elles ne sont pas nombreuses (consulter la figure 3.1). La majorité de ces stations couvre une période relativement courte (à partir des années 1980) malgré que quelques-unes font exception (certaines ont été installées en 1957, par exemple). Un important avantage de ce réseau pour notre analyse est qu'il est indépendant de toutes les données sur grille régulière. Nous avons donc choisi de les utiliser pour la validation des données sur grille. De façon générale, toutes ces données aux stations sont disponibles à l'échelle quotidienne.

Les défauts communs à tous les réseaux des stations météorologiques sont : les erreurs d'instruments, les changements des instruments ou/et d'observateurs, ou le déplacement de la station. Toutes ces sources peuvent introduire une erreur importante dans la série temporelle d'une station. Afin de réduire certaines de ces erreurs, il est possible d'homogénéiser la série temporelle de la station en la comparant avec certaines stations voisines. C'est pourquoi nous avons privilégié les données homogénéisées ou celles qui ont subi un contrôle de qualité lorsqu'elles étaient disponibles. L'homogénéisation s'applique principalement aux données de température et de précipitation. Toutefois, d'autres défauts d'un réseau ne peuvent pas être réduits ou éliminés, comme c'est le cas pour les valeurs manquantes, par exemple.

Une autre question importante est de savoir si la station est vraiment représentative de sa région. Dans le nord du Québec, par exemple, presque toutes les stations sont situées sur les côtes. Ainsi, certains effets locaux seraient propres à la station (p.ex., la proximité de l'océan, présence/absence de glace de la mer, la position de la station dans une vallée ou proche d'un fleuve, etc.), sans être réellement représentatifs de l'environnement pour lequel on veut une mesure. Par conséquent, ces

effets ont un impact lorsqu'on effectue une interpolation sur grille régulière, même dans les cas où l'on tient compte de l'élévation (comme le fait la méthode ANUSPLIN (Hutchinson (1991))). Par exemple, à cause d'un ou plusieurs de ces effets, la station peut être plus chaude/froide que son environnement et, par la suite, une interpolation entre deux stations donnera une température de la région plus/moins élevée qu'en réalité. De cette façon, les effets locaux observés en un point (la station) peuvent influencer la représentation du climat d'une vaste région si elle est peu couverte par des stations.

2.2 Observations sur grille régulière – modèles d'interpolation

À partir des années 1990 (p.ex., Giorgi (1990)), les modèles régionaux du climat ont été développés afin de simuler le climat présent et futur à plus fine échelle spatiale que les modèles globaux. L'étape de validation des modèles est essentielle et elle est basée sur des observations. La difficulté dans ce type de comparaison est que le modèle climatique résout les équations dynamiques sur une grille tuilée (45 km par 45 km, par exemple) alors que les stations sont locales et distribuées irrégulièrement dans l'espace. L'approche privilégiée est d'interpoler les données aux stations dans l'espace afin de les agréger. Comme il a été discuté dans l'introduction du chapitre 2, l'interpolation permet de passer des valeurs ponctuelles d'une variable mesurée à une station à un champ continu dans l'espace. Plusieurs méthodes d'interpolations sont utilisées par les différents groupes de chercheurs à travers le monde. Les données interpolées sur grille utilisées dans notre étude sont les données CRU2 ("Climatic Research Unit", CRU TS2.02 Mitchell and Jones (2005)), les données de NRCan/RNCan (Ressources naturelles Canada, McKenney et al. (2006)) et les données NLWIS/SNITE (National Land and Water Information Service/Service national d'information sur les terres et les eaux, Hutchinson et al. (2009)). Ces bases de données ont été obtenues en utilisant l'interpolation qui tiens compte de l'élévation en employant la méthode "thin-plate splines" déjà mentionnée (Hutchinson (1991)).

Un des défauts de ces "observations sur grille régulière" (peu importe la méthode d'interpolation utilisée) est que leur incertitude est inconnue dans les régions sans stations. Normalement, une méthode d'interpolation est accompagnée d'une évaluation de l'erreur introduite par la méthode (le plus souvent "Cross Validation"). Pourtant, cette validation est possible seulement pour des régions où il y a beaucoup de stations. On peut donc supposer que l'erreur est du même ordre de grandeur pour la région sans stations, mais sa valeur, quand même, reste inconnue.

2.2.1 Données CRU2

Les données du CRU2 (Mitchell and Jones (2005); version TS2.02) contiennent les valeurs de la température minimale et maximale mensuelles et le taux de précipitation moyen mensuel pour la période de cent ans (1901-2000) sur le globe entier (sur tous les continents sauf l'Antarctique; sans données sur les grandes surfaces d'eau). La résolution horizontale de données CRU2 est de 0.5° sur une projection latitude/longitude (environ 50 km). Ces données sont fréquemment utilisées et sont une référence à travers le monde, notamment dans la validation des modèles climatiques.

2.2.2 Données NRCan/RNCan

Il existe des observations sur grille régulière ayant une résolution horizontale plus fine que celle des données CRU2. Nous avons utilisé deux bases de données de RNCan (McKenney et al. (2006)) avec une résolution de 10 km (sera identifiée dans le texte par "NRCAN") et de 2 km ("ANUSPLIN"). Ces données contiennent les valeurs de la température minimale et maximale mensuelles et l'accumulation de la précipitation mensuelle. Les données d'ANUSPLIN couvrent le Québec et celles du NRCAN couvrent l'Amérique du Nord (le Canada et les États Unis). De plus, les données NRCAN contiennent une trentaine de variables importantes pour l'agriculture (p.ex. la longueur de la saison de croissance, nombre annuel de degrés-jours de la saison de croissance, etc.)

2.2.3 Données NLWIS/SNITE

Les données NLWIS/SNITE (National Land and Water Information Service/Service national d'information sur les terres et les eaux, Hutchinson et al. (2009)) ont une résolution horizontale égale à 10 km par 10 km et elles sont fournies à l'échelle quotidienne. Ces données couvrent le Canada au sud de 60°N. Les variables disponibles sont la température minimale et maximale et la précipitation totale pour la période 1961-2003. Les données NLWIS/SNITE ont été produites à partir des mesures aux stations en utilisant la méthode ANUSPLIN (Hutchinson (1991)). Ces données ont été utilisées pour présenter le climat de référence du Québec-Labrador.

2.3 Réanalyses d'observations

Les analyses et les réanalyses sont principalement utilisées en prévision du temps. Elles représentent le produit complexe d'une combinaison optimale des observations météorologiques et d'un modèle numérique de la prévision du temps. Les données d'observations sont utilisées ("assimilées") par le modèle numérique afin de produire une prévision météorologique, par exemple pour les 6 prochaines heures. Par la suite, dans 6 heures, la prévision générée précédemment devient valide (nous sommes "maintenant") et sert de "champ d'essai" pour dresser un portrait de la situation météorologique actuelle. Au champ d'essai s'ajoutent toutes les nouvelles observations disponibles maintenant, et qui seront assimilées par le modèle numérique, afin de générer un meilleur portrait de la situation actuelle. Avec cette approche d'assimilation, les observations prendront plus d'importance dans les régions où elles sont nombreuses, alors que le modèle aura plus de poids dans les régions où il y a peu d'observations. Ce champ "combiné" représente l'analyse qui servira ensuite à initialiser la prochaine prévision, et ainsi de suite. De cette façon, le modèle est "amené" vers l'état réel de l'atmosphère afin de produire une meilleure prévision.

Dans les centres de prévisions, les modèles numériques évoluent avec la science et les analyses produites au fil du temps sont donc générées à partir de versions de modèles qui diffèrent. Les réanalyses se distinguent (des analyses) car elles sont produites sur une longue période en utilisant toujours le même modèle numérique (toujours la même version du modèle). Ceci permet de les

utiliser pour analyser les séries temporelles, un peu avec la même philosophie que les données homogénéisées aux stations. Les deux réanalyses utilisées ici sont :

1. NARR ("North American Regional Reanalysis", Mesinger et al. (2006)) - produites en utilisant le modèle de prévision météorologique ETA (Mesinger et al. (1988), Black (1988), Janjić (1994)) et son système d'assimilation des données d'observations
2. Brown et al. (2003) - données quotidiennes de la hauteur de neige et de l'équivalent en eau de neige produites à partir des mesures d'épaisseur de neige au sol aux stations et d'un modèle de neige simple

2.3.1 Réanalyses "NARR"

Les réanalyses de NARR ("North American Regional Reanalysis", Mesinger et al. (2006)), sont des réanalyses produites à haute résolution horizontale de 0.3° latitude/longitude. Ces données sont disponibles pour la période 1979-2003 (25 ans), toutes les 3 heures et elles couvrent l'ensemble de l'Amérique du Nord. Comme ces données proviennent d'un modèle numérique, elles contiennent beaucoup de variables avantageuses pour une analyse climatiques. Néanmoins, les régions nordiques qui nous intéressent particulièrement ne sont pas bien couvertes par des stations météorologiques, donc dans les réanalyses, le poids est donné au modèle plutôt qu'aux observations dans ces régions. Par conséquent, le signal proviennet principalement du modèle et ne pas des observations. Pour cette raison nous n'avons pas utilisé ces réanalyses afin de tester nos observations sur grille régulière ni nos modèles climatiques au Nord du Québec. Par contre, dans les régions bien couvertes par des stations, les réanalyses de NARR peuvent être très utiles pour une validation des modèles climatiques au-dessus de ces régions.

2.3.2 Réanalyses de Brown et al. (2003)

Cette base de données contient des valeurs quotidiennes de la hauteur de la neige et de l'équivalent en eau correspondant, au-dessus de l'Amérique du Nord pour la période 1979-1997. Leur résolution horizontale est de 0.3° sur une projection latitude/longitude. Les données d'observation de la hauteur de la neige provenant de 8 000 stations climatologiques (situées aux États-Unis et au Canada) ont été interpolées en utilisant la méthode d'interpolation optimale introduite par Brasnett (1999). Toutefois, ces données d'observations de neige sont concentrées au sud du 55e parallèle et sont donc très éparées dans les régions nordiques. Afin de pallier ce problème, un "champ d'essai" est généré sur tout le domaine de l'Amérique du Nord à partir d'un modèle simple de neige (qui simule l'évolution de la hauteur de neige, de son vieillissement et de sa fonte). Ce modèle est alimenté par des données de température moyenne et de précipitation toutes les 6 heures, provenant des réanalyses (ERA-15) du Centre européen pour la prévision météorologique à moyen terme (CEPMMT/ECMWF) et des archives des données opérationnelles du Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe (TOGA). Ainsi, le champ d'essai dominera dans

les régions où les données d'observations sont rares. L'équivalent en eau de la neige est évalué en utilisant la densité de la neige simulée par le modèle de neige.

2.4 Données satellitaires - MODIS

Les variables disponibles de MODIS ("MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer", <http://modis.gsfc.nasa.gov/>) sont la température de la surface, l'albédo de la surface, la couverture de neige, la couverture de glace, l'indice de la végétation, etc.

Il existe également des estimations de la température de l'air provenant de satellites (AMSR-E, Jones et al. (2010)) mais ces données sont disponibles seulement à partir de l'année 2002. Ces données couvrent ainsi une période qui n'est pas commune à celles des autres observations disponibles (sauf pour les stations du CEN). De plus, ces données contiennent une erreur d'estimation de la température qui serait d'au moins 4 degrés (Jones et al. (2010)). Ceci ajoute une source d'incertitude relativement importante, en plus du manque de stations dans le Nord. D'ailleurs, ces données sont disponibles seulement pour la saison sans couverture de neige, qui n'est pas de longue durée sur le Nord du Québec. Pour toutes ces raisons, les données satellitaires de la température de l'air sont considérées peu utiles pour notre étude et ne seront pas utilisées désormais. Les données satellitaires pourraient tout de même être utilisées pour une analyse de la distribution spatiale de la température ou de la couverture de neige, par exemple. Elles pourraient montrer le patron spatial d'un champ météorologique au-dessus d'une vaste région peu couverte par des stations.

2.5 Modèles dynamiques du climat

Les variables mesurées le plus souvent aux stations sont la température et la précipitation. Comme le climat d'une région n'est pas caractérisé uniquement par ces deux variables, il est nécessaire d'en estimer d'autres. De plus, les stations fournissent des valeurs ponctuelles qui ne sont pas nécessairement représentatives d'une grande région (section 2.1). Un outil permettant de contourner ce problème est le modèle dynamique du climat. Ce type de modèle est un système complexe de programmes qui résolvent différents processus météorologiques décrits par des équations. Ces équations sont résolues sur chaque tuile d'une grille régulière et avancent dans le temps à chaque pas de temps du modèle. Ainsi, les processus atmosphériques qui existent de façon continue dans l'espace et dans le temps sont discrétisés dans ces modèles numériques du climat.

Parmi les modèles numériques du climat, les plus connus sont les modèles de climat globaux (MCG) qui couvrent la terre entière. Avec la puissance de calcul d'ordinateurs présentement disponible, ces modèles peuvent atteindre des résolutions spatiales (des tuiles) de l'ordre de centaines de kilomètres, ce qui demeure encore assez grossier pour les besoins des études d'impact. Cela implique que les processus météorologiques qui se produisent à plus fine échelle qu'une centaine de kilomètres, et qui sont nombreux (les nuages, les précipitations convectives, la turbulence près de la surface, etc.), ne peuvent pas être résolus explicitement dans ces modèles. En conséquence, l'évolution de ces processus doit être "paramétrisée" à l'échelle des tuiles du modèle. Paramétriser signifie

qu'on inclut dans le modèle uniquement les effets d'un phénomène météorologique sur l'état de l'atmosphère mais qu'on ne simule pas le phénomène lui-même. D'autres processus importants pour le climat local tels que les processus qui se produisent près du sol ou par la présence de végétation ne sont pas non plus bien résolus dans un modèle global. En outre, un MCG est un modèle "libre" ; il est libre de créer son propre climat puisqu'il couvre la terre entière. Seulement au moment de débiter sa simulation lui impose-t-on ("on le force avec") des données réelles (ou des moyennes climatiques de données réelles). En principe, le climat créé par un MCG n'a aucune relation temporelle avec le climat observé, c'est-à-dire que les années réelles ne peuvent être comparées directement à celles qui sont simulées. Ce sont uniquement les statistiques des données simulées sur de longues périodes (p.ex. moyenne, écart-type sur 30 années) qui peuvent être comparées aux statistiques observées dans la réalité. Les MCG ont été conçus pour simuler les changements climatiques causés par des changements à certains "forçages" tels que la constante solaire ou la concentration des gaz à effet de serre, par exemple. Ils n'ont aucun lien avec les années réelles, n'étant forcés (ou guidés) directement par aucune observation (contrairement aux modèles de prévision numérique du temps).

Les modèles régionaux du climat (MRC) ont été développés afin de simuler les processus météorologiques à une échelle plus fine que celle qui est résolue par les MCG. L'approche des MRC consiste à se concentrer sur une région d'intérêt (p.ex. l'Amérique du Nord ou le Québec), ce qui leur permet de simuler à plus fine échelle que les MCG avec la même puissance de calcul. Ils peuvent ainsi mieux simuler certains processus importants qui prennent place dans la région d'intérêt. Par contre, le fait de se concentrer sur une région ("aire") limitée génère des "frontières" latérales aux périmètres de leur domaine. Ceci fait en sorte que le modèle doit obtenir des informations à ses frontières latérales afin de rester "en contact" avec les événements météorologiques qui se produisent en dehors de son domaine. Ces conditions s'ajoutent aux conditions initiales à lui fournir en début de simulation.

Dans notre étude, nous avons utilisé les données provenant de plusieurs simulations du Modèle régional canadien du climat (MRCC, version 4 Musić and Caya (2007), Caya and Laprise (1999)), lesquelles ont été produites par Ouranos. Ces simulations ont déjà été décrites dans l'introduction du chapitre 2 et nous résumons ici les trois simulations analysées dans cette étude :

- MRCC à 45 km de résolution sur le domaine AMNO (amno45) (version 4.2.3)
- MRCC à 45 km de résolution sur le domaine du Québec (qc45)(version 4.2.4)
- MRCC à 15 km de résolution sur le domaine du Québec (qc15)(version 4.2.4)

Le domaine "AMNO" couvre l'Amérique du Nord (environ 9000 km par 8646 km) alors que le domaine du Québec est plus petit, centré sur le nord-est de l'Amérique du Nord (environ 3375 km par 3375 km). Les trois simulations historiques du MRCC couvrent la période de 40 ans (1961-2000) et sont pilotées à leurs frontières latérales par des réanalyses d'observations.

Nous avons également analysé les données de simulation produites avec les modèles régionaux du climat participant au projet NARCCAP ("North American Regional Climate Change Assessment Program", Mearns et al. (2009)). Les modèles de NARCCAP utilisés sont listés dans le tableau 2.2. Tous ces modèles régionaux ont produit des simulations historiques à une résolution d'environ 50 km (sur un domaine semblable à "AMNO"), couvrant la période de 1980-2000 et pilotées à leurs frontières latérales par des réanalyses d'observations. Pour plus d'informations sur ce projet

et sur les caractéristiques plus spécifiques des modèles participants, vous pouvez consulter le site web : <http://narccap.ucar.edu/data/rcm-characteristics.html> Les données de simulations de MRC sont généralement disponibles à toutes les 3 ou 6 heures.

TABLE 2.2: Informations sur les modèles participant dans le projet NARCCAP

	CRCM	ECPC	WRFP	MM5I	RCM3
Nom du modèle	Canadian Regional Climate Model	Experimental Climate Prediction Center model	Weather Research and Forecasting model	Iowa State University model	Regional Climate Model version 3
Institutions participantes	Ouranos/ Université du Québec à Montréal	Scripps Institute of Oceanography/ UC San Diego	Pacific Northwest National Lab	Iowa State University	University of California Santa Cruz
Chercheurs principaux	Biner, S. Caya, D. Laprise, R.	Nunes, A. Roads, J.	Leung, R. Correia, J. Qian, Y.	Gutowski, W. Arritt, R. ; Flory, D. Takle, G. Zoellick, C. Macintosh, C.	Snyder, M. Sloan, L. O'Brien, T.

Analyses effectuées

La problématique de l'analyse du climat présent du Nord du Québec peut être résumée de la façon suivante :

- Il y a peu de stations au nord et celles-ci sont situées principalement sur les côtes ; ceci met en question la représentativité des stations pour une région plus grande.
- La majorité des stations ont des séries temporelles très courtes ou avec des discontinuités (des données manquantes).
- Les données interpolées sur grille régulière contiennent des incertitudes dues à la méthode d'interpolation, spécialement dans les régions où il y a peu ou pas de stations.
- Les modèles dynamiques du climat fournissent des données sur des grilles régulières qui couvrent tout le Québec mais ils sont également entachés d'incertitudes dues à la discrétisation numérique et aux simplifications des équations décrivant les processus atmosphériques.

Afin d'obtenir un portrait du climat présent du Québec le plus juste possible, nous avons fait une analyse de toutes les bases de données disponibles. Les résultats de cette analyse devraient aider à répondre aux questions suivantes :

- Quelle base de données serait de meilleure qualité et pour quelle région ?
- Quelles sont les incertitudes les plus importantes pour chaque source de données ?
- Quelles sont les différences principales entre les différentes bases de données ?
- Dans quelles régions les différences entre les bases de données sont-elles les plus importantes ?
- Comment caractériser le climat d'une région où les différences entre toutes les bases de données sont importantes ?

La première étape de notre analyse a été de comparer les différentes bases de données entre elles. Cette méthodologie nous a permis de produire une cartographie (distribution spatiale) des différences entre les bases de données sur notre région d'intérêt. Nous avons également comparé les cycles annuels moyens et les évolutions temporelles historiques. Ce chapitre décrit plus en détail la série d'analyses effectuées alors que le chapitre Résultats : analyse du climat présent en présente les résultats.

3.1 Validation des données d'observations sur grille régulière par le modèle ANUSPLIN à 2 km

Ayant la résolution la plus fine, les données ANUSPLIN à 2 km ont été initialement utilisées comme référence dans la comparaison avec les autres données d'observations sur grille régulière, soit :

- NRCAN à 10km
- CRU2 à 0.5° longitude-latitude

Le but de cette analyse était de voir si la très haute résolution ajoute des informations supplémentaires par rapport aux données à résolution plus grossière. Nous avons calculé les moyennes saisonnières de la température et du taux de précipitation pour chacune des bases de données analysées. Ensuite, la différence de chacune de ces moyennes a été obtenue par rapport aux moyennes des données de référence d'ANUSPLIN. Afin d'avoir une différence du champ de précipitation relative en pourcentage, nous avons calculé la différence entre le champ analysé et la référence (ANUSPLIN) en le normalisant par le champ de référence. Cette analyse nous permet d'obtenir une cartographie (distribution spatiale) de la différence entre deux champs étudiés. De cette manière, nous pouvons identifier facilement dans quelle région cette différence est la plus grande. Les résultats de ces comparaisons sont montrés dans la section 4.1.

3.2 Comparaisons avec les observations aux stations

Afin d'estimer l'erreur ou l'incertitude associée aux différentes bases de données (observations sur grille régulière et modèles dynamiques du climat) par rapport à une valeur mesurée, nous avons effectué la comparaison avec les observations aux stations. Nous avons défini la période de validation comme étant la période la plus longue commune aux deux séries de données : les données à comparer et les données à la station. Ainsi, pour chacune des bases de données sur grille régulière nous avons choisi le point de grille qui était situé le plus près de chacune des stations choisies. À chacun de ces points de grille, nous avons extrait la série temporelle. La période de la série extraite a été choisie de façon à correspondre à la période de validation. Nous avons ensuite calculé la moyenne mensuelle, autant pour les données sur grille que pour les données quotidiennes aux stations. Finalement, une moyenne de ces données pour la période de validation a permis d'évaluer le cycle annuel moyen pour la température (minimale, maximale et moyenne) et pour le taux de précipitation moyen. Pour ces analyses, nous nous sommes basés sur les données d'observations de Rio Tinto Alcan (RTA), dont le réseau de stations est présenté à la figure 3.1 Nous avons également utilisé les données quotidiennes homogénéisées d'Environnement Canada (EC). Les stations d'EC choisies sont celles qui ont des séries temporelles suffisamment longues pour nos analyses et celles qui sont situées dans nos trois régions d'intérêt, soient : La Basse Côte Nord, La Baie James et La Péninsule d'Ungava. Ces stations sont montrées sur la figure 3.2.

Les résultats des comparaisons entre différentes bases de données avec observations aux stations sont discutés dans la section 4.2.

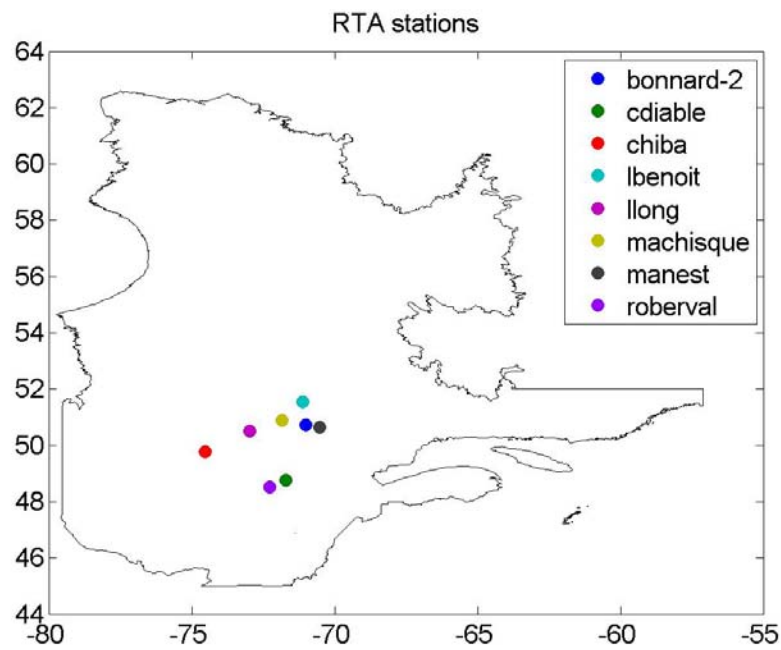


FIGURE 3.1: Stations du réseau de Rio Tinto Alcan.

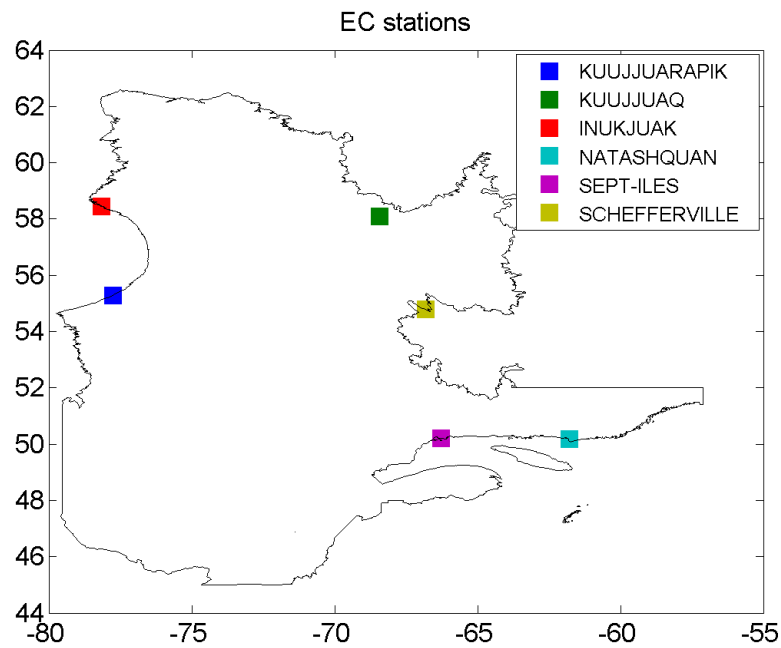


FIGURE 3.2: Stations du réseau d'Environnement Canada.

3.2.1 Validation des observations sur grille régulière par des stations RTA

Les données CRU2, ainsi que celles du réseau de NRCan/RNCan sont obtenues à partir du réseau de stations d'EC. Afin de valider ces données sur grille au-dessus de notre région d'intérêt, il a fallu trouver des stations provenant d'autres réseaux, des stations qui soient indépendantes de celles qui ont été utilisées dans le processus d'interpolation. Les données du réseau de RTA ont donc servi à ce type de validation. Toutes les stations de RTA sont concentrées dans une zone relativement petite et certaines parmi elles ont des séries temporelles assez courtes. Donc, on n'a trouvé que six stations dans la région d'intérêt ayant les séries suffisamment longues pour l'analyse. Malgré ces limites, les résultats de cette validation nous montrent la différence entre les données sur grille régulière par rapport aux données ponctuelles mesurées aux stations.

Les données validées par les stations de RTA sont les suivantes :

- NRCAN à 10 km
- ANUSPLIN à 2 km
- CRU2 à 0.5° latitude-longitude

Les résultats de ces comparaisons se trouvent dans la sous-section 4.2.1.

3.2.2 Comparaison des modèles NARCCAP aux stations RTA

Le projet NARCCAP ("North American Regional Climate Change Assessment Program", Mearns et al. (2009)) nous permet de comparer les données produites par différents modèles climatiques ayant une résolution similaire et intégrés sur des domaines semblables. Cette analyse nous donne une estimation de l'incertitude des modèles climatiques due aux différents traitements des processus physiques dans les modèles (différentes paramétrisations employées dans chacun des modèles), aux différents algorithmes utilisés pour résoudre les équations hydrodynamiques, aux différents schémas de discrétisation adoptés dans chacun des modèles, etc.

Quatre modèles régionaux de climat d'autres groupes de recherche participant au projet NARCCAP, ainsi qu'une simulation du MRCC produite par Ouranos spécifiquement pour ce projet, ont été comparés aux données aux stations de RTA. La résolution de tous les modèles est d'environ 50 km et les simulations sont effectuées sur un domaine semblable au domaine AMNO. La période commune aux simulations est : 1980-2000. La comparaison avec la station est faite pour la plus longue période commune aux deux séries de données qui sont comparées. La sous-section 4.2.2 contient les résultats reliés à cette analyse.

3.2.3 Comparaison du modèle MRCC aux stations RTA

Le modèle régional canadien du climat (MRCC, Musić and Caya (2007), Caya and Laprise (1999)) a été aussi validé par des stations du réseau de RTA. Trois simulations différentes du MRCC ont été analysées :

- MRCC à 45 km sur le domaine AMNO (ci-après désignée par "amno45")

- MRCC à 45 km sur le domaine du Québec (ci-après désignée par "qc45")
- MRCC à 15 km sur le domaine du Québec (ci-après désignée par "qc15")

La comparaison a été faite pour le point de grille du modèle situé le plus près de la station. Les variables analysées sont la température minimale, maximale et moyenne et le taux moyen de précipitation. Toutes les simulations du MRCC couvrent la période historique de 40 ans (1961-2000) et la majorité des stations RTA ont été installées après 1961. La période de validation est donc choisie comme la plus longue période commune aux deux bases de données comparées. La sous-section 4.2.3 contient les résultats de cette comparaison.

3.2.4 Comparaison des modèles NARCCAP aux stations EC

Les modèles de NARCCAP (Mearns et al. (2009)) ont aussi été comparés aux données des stations du réseau d'EC. Les stations analysées ici sont choisies selon les régions d'intérêt (section 3.2). Étant donné que la période de mesure pour toutes les stations d'EC choisies est 1961-2000, la période commune avec les modèles correspond à la longueur des simulations de NARCCAP : 1980-2000. L'analyse comparative est donc faite pour la période 1980-2000. Les résultats de cette analyse se trouvent dans la sous-section 4.2.4.

3.2.5 Comparaison du modèle MRCC aux stations EC

Les trois simulations du MRCC (amno45, qc45 et qc15) ont été comparées aux données aux stations du réseau d'EC. La méthodologie employée ici est identique à celle qui a été utilisée pour la comparaison avec les stations de RTA (sous-section 3.2.3). Parmi les nombreuses stations disponibles d'EC, nous avons choisi celles qui étaient situées au nord du Québec et ayant des séries temporelles correspondantes à la période des simulations : 1961-2000. Alors, dans ce cas, la comparaison a été effectuée pour cette période de 40 ans. Les résultats de cette analyse sont montrés dans la sous-section 4.2.5.

3.3 Validation du MRCC à 15km par les données NRCAN

Le but de cette analyse était de valider la simulation à haute résolution du MRCC (désignée par qc15) par les observations. Une résolution du modèle très fine est nécessaire pour capturer les processus qui se produisent à petite échelle et qui ont des effets importants sur la biodiversité, tels que la proximité de la mer/océan, la topographie, etc. Les données de validation choisies ici pour l'analyse sont les données NRCAN à 10 km, qui ont la résolution la plus près de celle de la simulation du MRCC à 15 km. La section 4.3 contient des résultats reliés à cette validation.

3.4 Comparaison des différentes simulations du MRCC

Une comparaison des différentes simulations d'un même modèle, effectuées sur des domaines de tailles différentes, nous donne une estimation de l'incertitude liée au choix de la taille du domaine. De plus, la différence entre deux simulations au-dessus d'un domaine de même taille mais de résolutions différentes montrera les effets du changement de résolution du modèle sur le résultat. Les trois simulations du MRCC ont été comparées entre elles :

- MRCC à 45 km sur le domaine AMNO (amno45)
- MRCC à 45 km sur le domaine du Québec (qc45)
- MRCC à 15 km sur le domaine du Québec (qc15)

Les moyennes saisonnières de la température minimale, maximale et moyenne, de l'amplitude journalière de la température (différence entre la température maximale et la température minimale journalières), ainsi que la moyenne saisonnière du taux de précipitation pour la période 1961-2000 ont été analysées. La section 4.4 contient les résultats reliés à cette analyse.

3.5 Régionalisation : tendances observées versus simulées

L'idée principale était de diviser le Québec en plusieurs régions et de choisir des stations avec des séries temporelles les plus longues possibles pour représenter chaque région afin d'analyser :

1. Les tendances de la température : mesurées à une station et simulées par le modèle au point de grille le plus proche de la station.
2. Le modèle a-t-il la même tendance que celle qui est observée ?
3. La variabilité inter-annuelle du modèle suit-elle bien la variabilité inter-annuelle d'une station ?
4. Les séries temporelles du modèle et de la station sont-elles bien corrélées à l'échelle annuelle ?

Les quatre régions avec les stations utilisées pour chacune sont montrées sur la figure 3.3. Pour être en mesure de faire des analyses de tendances et de variabilité, il est important d'avoir des séries suffisamment longues. Nous voulions avoir le plus de stations possible au nord du Québec, donc nous avons choisi l'année 1926 comme l'année d'installation de la dernière station dans cette région. Quand même, les données pour certaines stations ne sont pas toujours disponibles à partir de la première année de leurs installations. Pour cette raison, on peut voir que les séries temporelles de toutes les stations choisies ne commencent pas avant le 1^{er} janvier 1926 (figures 4.25 - 4.28). La région avec le plus de stations est celle nommée "sud" (en cyan sur la figure 3.3). Dans l'est (en bleu), la majorité des stations avec les longues séries temporelles sont situées sur la péninsule de la Gaspésie et il y en a très peu sur la Côte-Nord (toutes situées le long de la côte). Les stations dans la région "ouest" (en vert) ne sont pas nombreuses non plus et elles sont toutes situées très près l'une de l'autre. La plus grande région sur la figure, nommée "nord" (en rouge), contient le moins de stations et couvre le plus grand territoire.

Les séries temporelles de stations choisies ont été aussi comparées au MRCC et aux observations de NRCAN. Étant donné que les stations de RTA sont indépendantes de données NRCAN (sous-section 3.2.1), l'idée était de vérifier les données NRCAN par ces stations et de tester leur comportement de même façon qu'on le fait pour le modèle (questions décrites au paragraphe précédent). Cette analyse nous aidera à décider si le climat récent du Nord du Québec est mieux représenté par le modèle désigné qc15 ou par les données sur grille régulière (NRCAN) et dans quelles régions. Les résultats reliés à cette analyse sont discutés dans la section 4.5.

3.6 Validation de la simulation MRCC à 15 km pour la neige

Étant donné que la neige est une variable importante pour caractériser le climat d'une région nordique, nous avons évalué la capacité du MRCC à 15 km (simulation qc15) à simuler l'équivalent en eau de la neige ainsi que la hauteur de neige au sol. Pour cette analyse, nous avons utilisé les données de réanalyses de Brown et al. (2003) à 0.3° latitude/longitude et la hauteur de la neige mesurée aux stations météorologiques du réseau d'EC. Les résultats sont discutés dans la section 4.6

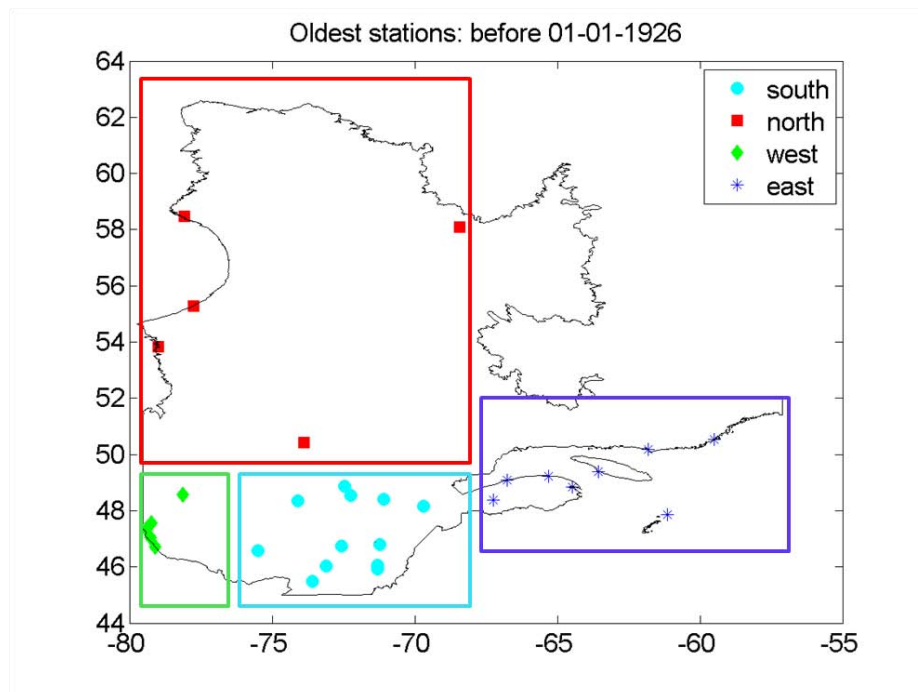


FIGURE 3.3: Région du Québec contenant des stations d'EC avec séries le plus longues.

3.6.1 Équivalent en eau de la neige : qc15 versus réanalyses de Brown et al. (2003)

On a comparé les valeurs mensuelles et saisonnières de l'équivalent en eau de la neige (EEN) ("snow water equivalent", en anglais) simulées par le MRCC à 15 km (qc15) avec celles des réanalyses de Brown et al. (2003) décrites dans la section 2.3.2. Cette comparaison nous permet d'obtenir une cartographie (distribution spatiale) des différences moyennes entre les deux bases de données pour chaque mois de l'année, couvrant la période 1979-1997.

3.6.2 La neige au sol : MRCC à 15 km versus stations

Le cycle annuel de la hauteur de neige simulée par le MRCC à 15km (qc15) a été comparé aux données des stations météorologiques du réseau d'EC. La comparaison est faite en utilisant le point de grille le plus près de la station. Dans la comparaison, nous avons aussi inclus les autres simulations du MRCC à 45 km (amno45 et qc45), ainsi que les réanalyses de Brown et al. (2003).

Résultats : analyse du climat présent

Dans ce chapitre on présente des résultats des analyses décrites plus en détail dans le chapitre Analyses effectuées.

4.1 Validation des données d'observations sur grille régulière par le modèle ANUSPLIN à 2 km

Nous avons fait une comparaison de toutes les bases de données disponibles avec le modèle ANUSPLIN, étant donné qu'il a la plus fine résolution. Le but de cette analyse était de voir où sont situées les différences principales entre les bases de données sur grille régulière, et de déterminer laquelle de ces données conviendrait le mieux en tant que référence pour nos analyses du climat présent.

4.1.1 CRU2 à 50 km versus ANUSPLIN à 2 km

Puisque les données du CRU2 (Mitchell and Jones (2005)) sont vastement utilisées pour la validation de sorties de modèles, ainsi que pour des analyses du climat présent, nous avons comparé ces données avec les données ANUSPLIN (McKenney et al. (2006)). Les différences entre ANUSPLIN et CRU2 sont montrées sur la figure 4.1. D'abord, les données du CRU2 ont été interpolées sur la grille d'ANUSPLIN de 2 km en utilisant la méthode « nearest neighbour ». Ensuite la différence entre deux bases de données a été calculée. Pour les trois variables étudiées (température maximale, température minimale et la précipitation) les différences les plus grandes se trouvent dans les régions montagneuses. Puisque la résolution des deux bases de données est très différente, la différence dans la représentation de la topographie dans chacune d'elles doit être importante. Les stations utilisées pour produire les deux bases de données sont presque identiques, de même que la méthode d'interpolation employée. Cette méthode implique un effet de l'élévation du terrain sur le gradient de la température. Néanmoins, les montagnes sont des régions où il y a peu de stations.

Aussi, dû au manque de stations dans le Nord, les deux bases de données sont considérées moins fiables dans ces régions (New et al. (1999) ; McKenney et al. (2006)). Il n'est donc pas possible de déterminer laquelle de ces bases de données serait la plus juste, mais les différences entre les deux nous permettent d'évaluer l'ordre de grandeur de l'incertitude dans ces régions. Parce que les données ANUSPLIN montrent plus de détails que les données de CRU2, ANUSPLIN a été choisie comme référence pour les analyses qui suivront.

4.1.2 NRCAN à 10 km versus ANUSPLIN à 2 km

La manipulation des données ANUSPLIN exige beaucoup de temps et de mémoire d'ordinateur à cause de leur très fine résolution. Puisque nous disposons des données NRCAN (McKenney et al. (2006)) ayant une résolution plus grossière qu'ANUSPLIN mais plus fine que CRU2, et sachant que leur manipulation demande beaucoup moins de temps et d'espace, nous avons décidé de voir si ces deux bases de données produisent des résultats de qualité comparable.

Les données NRCAN ont été interpolées sur la grille d'ANUSPLIN en employant la méthode de « nearest neighbour ». Par la suite la différence entre deux bases de données a été calculée sur la grille commune de 2 km de résolution. La figure 4.2 présente les différences entre ANUSPLIN à 2 km et NRCAN à 10 km et montre qu'elles sont négligeables. La seule différence provient de la représentation de la topographie qui est différente dans chacune des bases des données, en lien avec leur résolution différente. C'est vrai pour toutes les variables et pour toutes les saisons. Dans les régions montagneuses, les valeurs positives et négatives de la différence entre ANUSPLIN et NRCAN se trouvent sur des pixels adjacents, ce qui indique que l'un n'est pas meilleur que l'autre mais qu'ils sont simplement différents à cause de leur résolution qui est différente. Étant donné que l'utilisation d'ANUSPLIN nécessite un effort technique supplémentaire pour un gain relativement faible par rapport aux données de NRCAN, il a été décidé de choisir NRCAN comme la base de données de référence pour les validations futures de nos modèles (e.g. la simulation MRCC à 15km au-dessus du Québec (qc15)). De plus, avec ses 10 km, NRCAN a une résolution comparable aux 15 km de la simulation qc15, ce qui est avantageux pour les comparer.

4.2 Validation des données par les observations aux stations

Dans cette section nous présentons des résultats de comparaison des modèles d'interpolation (les données sur grille régulière) et des simulations de modèles dynamiques du climat, avec les stations du réseau de RTA et d'EC, en utilisant les points de grille des modèles qui sont situés le plus près de la station d'observation.

4.2.1 Données sur grille régulière versus stations RTA

Les données des trois modèles d'interpolation sur grille régulière (CRU2, NRCAN et ANUSPLIN) ont été comparées aux données indépendantes des stations de Rio Tinto Alcan (figures 4.3 et

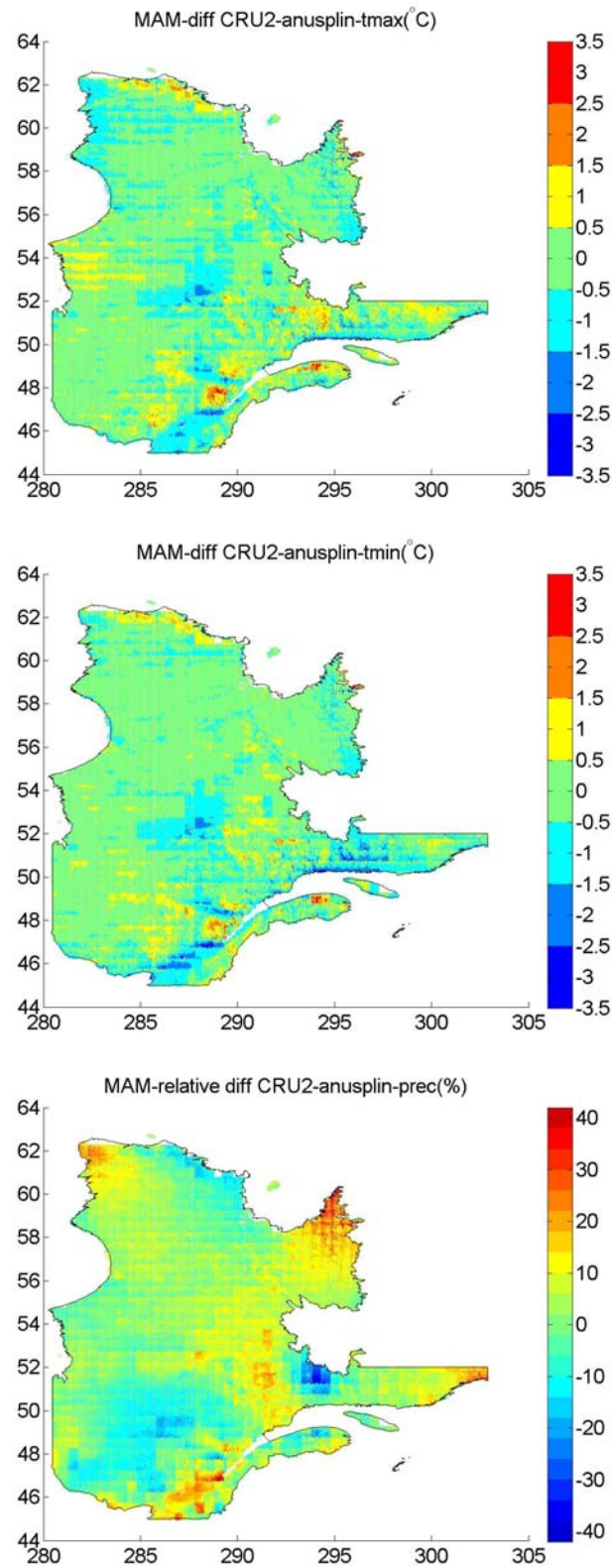


FIGURE 4.1: Différence entre ANUSPLIN à 2 km et CRU2 à 50 km pour la saison du printemps sur période 1961-2000 ; la température maximale(en haut), la température minimale (au centre) et la précipitation (en bas).

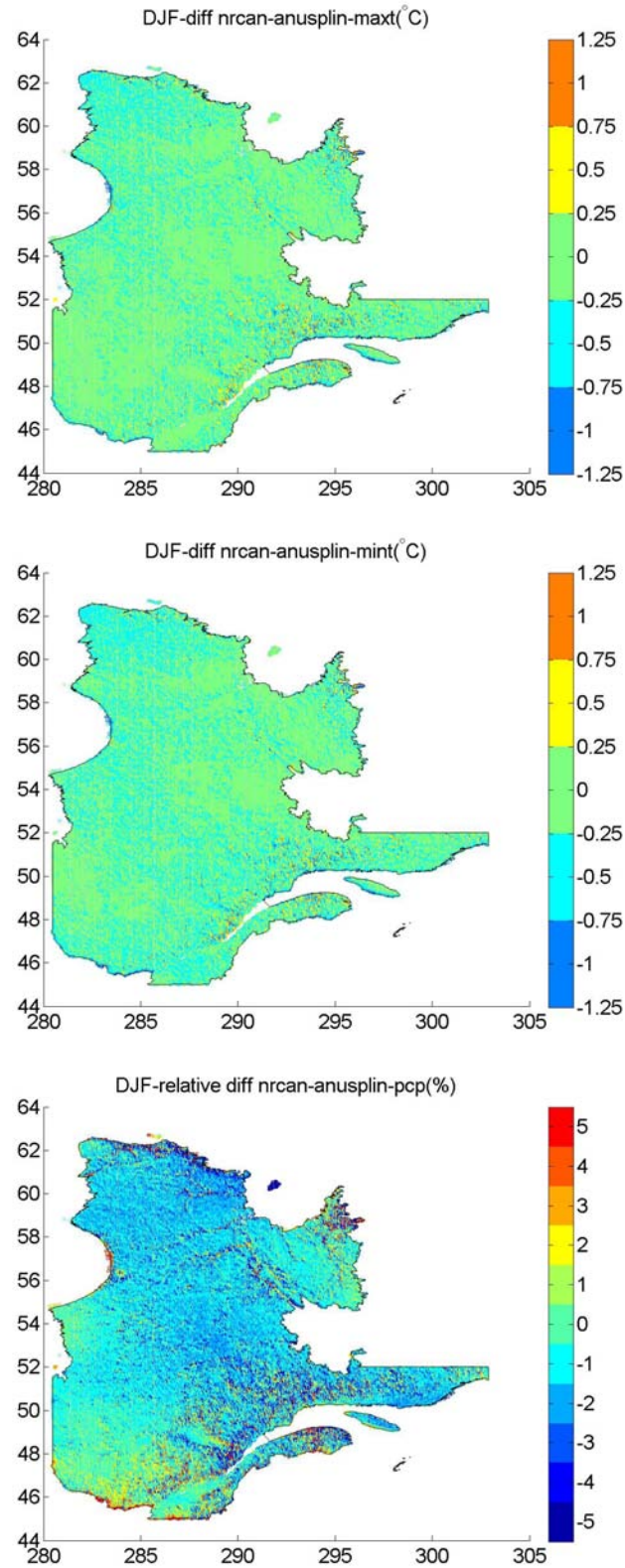


FIGURE 4.2: Différence entre les champs d'ANUSPLIN à 2km et de NRCAN à 10km pour la saison d'hiver sur la période 1961-2000 ; la température maximale (en haut) ; la température minimale (au centre) et la précipitation (en bas).

4.4). Pour la température, CRU2, NRCAN et ANUSPLIN donnent des résultats très similaires l'un à l'autre, avec des valeurs semblables à celles de la station. De façon générale, les observations sur grille régulière donnent une température minimale plus élevée et une température maximale plus basse que celles qui sont observées à la plupart des stations de RTA. Ceci signifie que l'amplitude journalière de la température sur grille (différence entre la température maximale et la température minimale journalières) est plus petite que celle mesurée à la station (figure 4.3). Ce phénomène est surtout important pendant l'hiver. Pour la précipitation, les données CRU2 sous-estiment le deuxième maximum de l'année qui se produit en septembre et ce, pour les deux stations montrées ici. Les précipitations sur grille sont aussi différentes des observations en avril et en novembre pour la plupart des stations (figure 4.4). Pendant ces deux mois, pour la précipitation, la différence entre les données des trois modèles d'interpolation est la plus importante. Dans le cas de la station Lac Benoît, la précipitation sur grille est de meilleure qualité que l'amplitude de la température. Pour la station de Chibougamau, au contraire, la différence avec les stations est plus importante pour la précipitation que pour l'amplitude de la température journalière.

4.2.2 Modèles NARCCAP versus stations RTA

La figure 4.5 présente les résultats de la comparaison des simulations des modèles NARCCAP (Mearns et al. (2009)) avec une station de Rio Tinto Alcan (Lac Benoit). Le tableau 2.2 présente les informations sur les modèles de NARCCAP utilisés dans cette sous-section. Pour la comparaison, le cycle annuel des données obtenues par les divers modèles d'interpolation (données sur grille régulière) est aussi montré. Le but de cette comparaison était de voir s'il existe un patron général dans le comportement de tous les modèles considérés ici. Étant donné que la majorité des stations dont nous disposons sont situées sur les côtes, leur représentativité d'une région plus grande est mise en question. La présence d'un patron commun à tous les modèles nous aiderait à faire un diagnostic de la représentativité des stations. Si les comportements de tous les modèles sont différents de celui de la station mais similaires entre eux (par exemple, si tous les modèles sont plus chauds que la station), on pourrait conclure que la station n'est peut-être pas représentative de sa région (car elle est plus froide que son entourage). Malheureusement, un tel patron commun à tous les modèles n'a pas été trouvé.

Le modèle WRFP est en général froid pendant toute l'année, sauf au mois de mai où il est plus chaud que la station. Le modèle MM5I est très froid pendant le printemps et l'automne et le RCM3 est trop chaud en hiver et trop froid pour les autres saisons. L'ECPC suit assez bien le cycle annuel de la température pour la majorité de stations, mais la précipitation n'est pas aussi bien représentée par ce modèle ; elle est fortement surestimée. De la même façon, RCM3 donne trop de précipitation pour tous les mois. Pour la plupart des stations, MM5I et WRFP ne simulent pas bien les minimums et les maximums annuels de précipitation ; leurs cycles de précipitations sont décalés par rapport à la station. Le Modèle régional canadien du climat (MRCC (en anglais, CRCM)) est généralement trop froid, surtout pendant l'hiver et l'automne. La précipitation est généralement bien simulée par le MRCC : les maximums et les minimums annuels sont simulés aux bons moments. Par contre, pour la plupart des stations, le MRCC surestime la précipitation pour la période mai-juin-juillet.

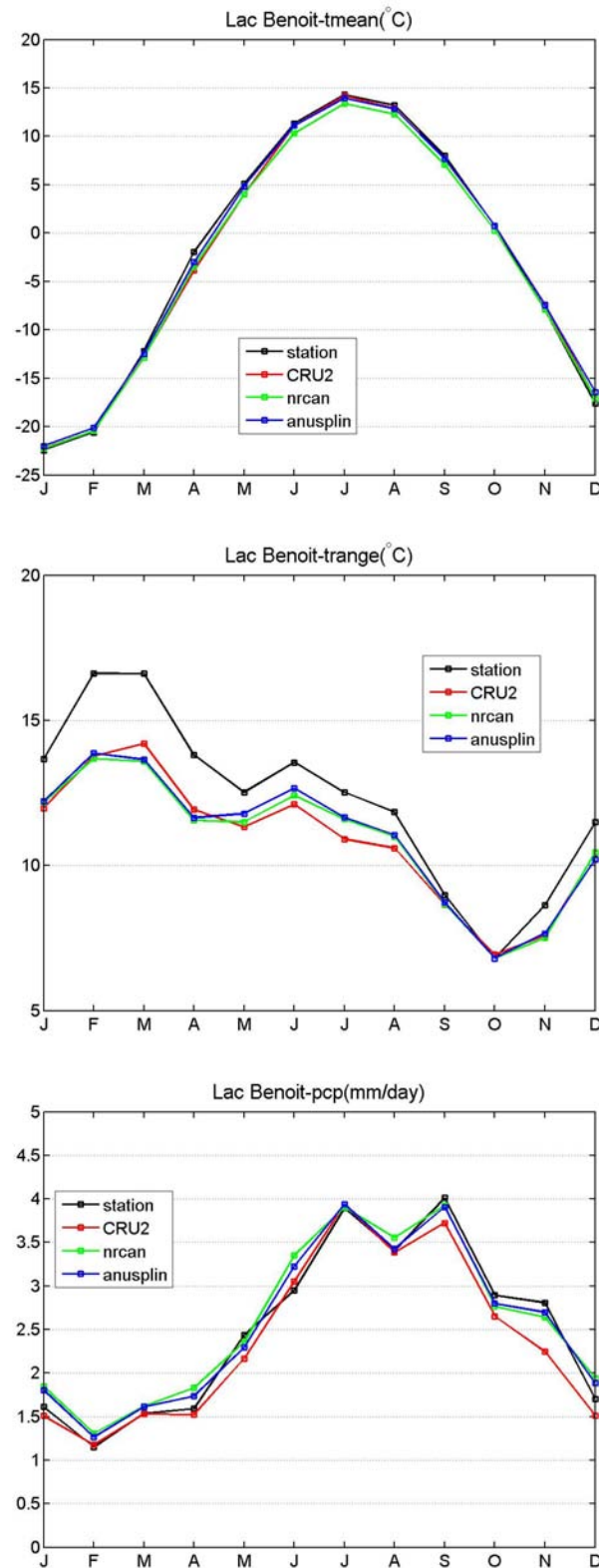


FIGURE 4.3: Cycle annuel de la température moyenne (en haut), de l'amplitude journalière de la température (au centre) et de la précipitation (en bas) mesuré à une station du réseau RTA (Lac Benoit) et provenant des trois modèles d'interpolation pour la période 1984-2000.

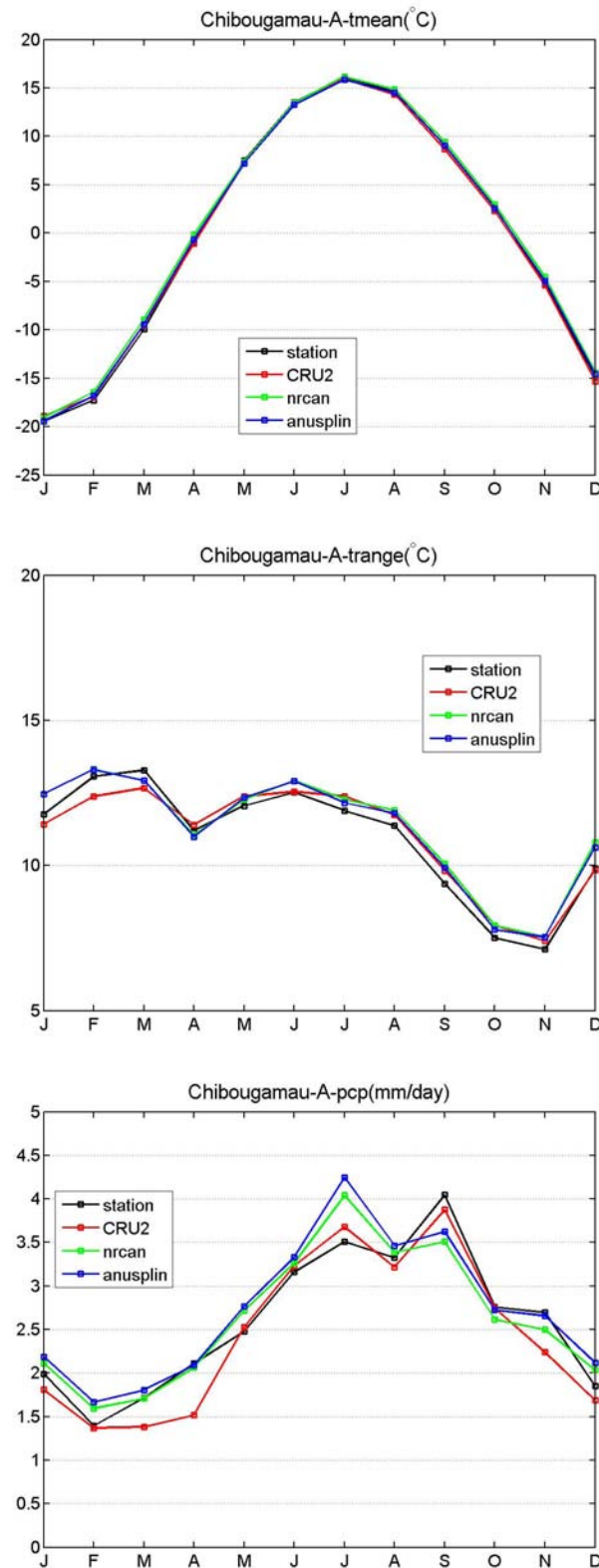


FIGURE 4.4: Cycle annuel de la température moyenne (en haut), de l'amplitude journalière de la température (au centre) et de la précipitation(en bas) mesuré à une station du réseau RTA (Chibougamau-A) et provenant des trois modèles d'interpolation pour la période 1971-2000.

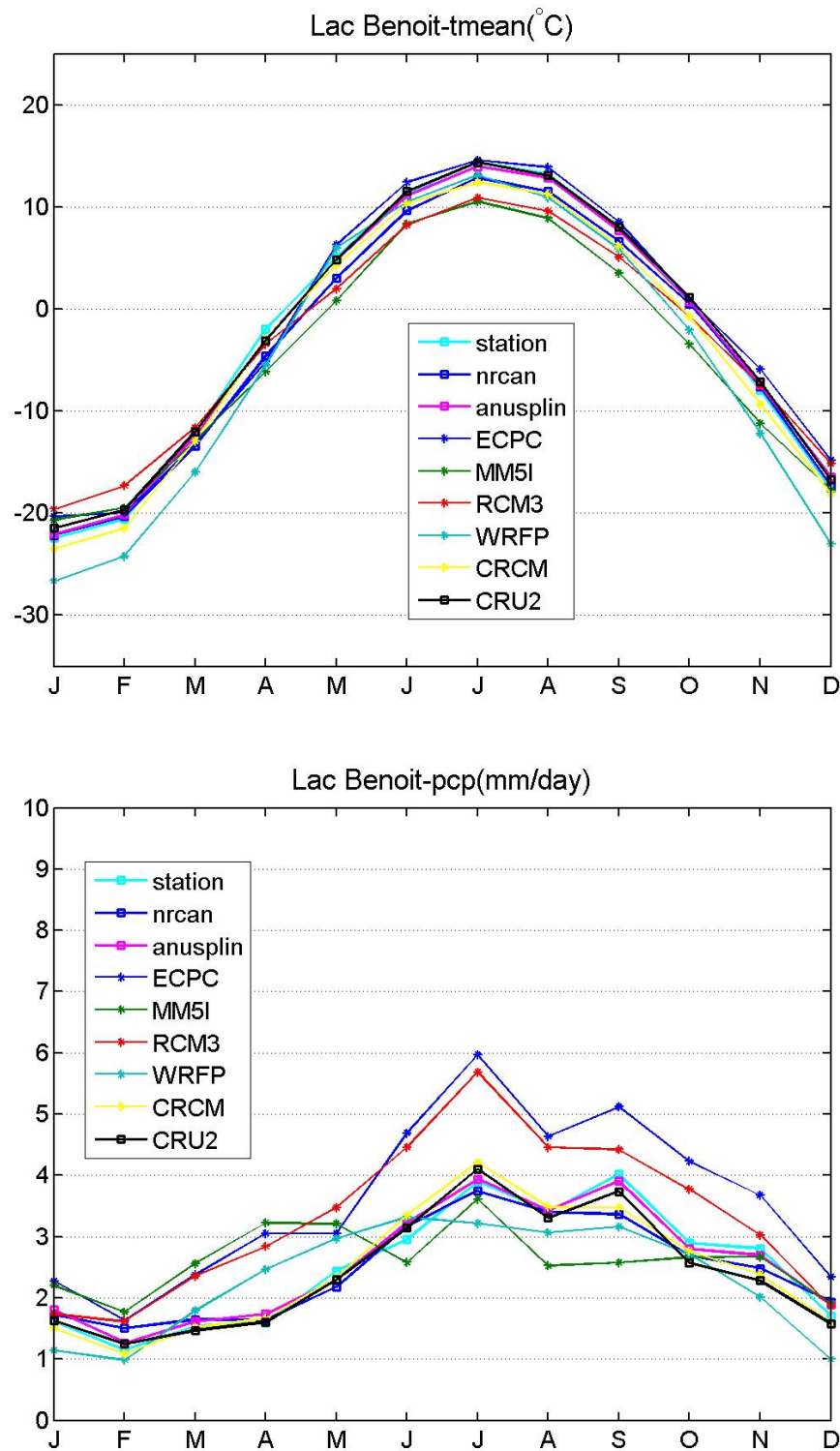


FIGURE 4.5: Cycle annuel de la température moyenne et de la précipitation mesuré à une station du réseau RTA, provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2), et simulé par des modèles NARCCAP pour la période 1980-2000.

4.2.3 Modèle MRCC versus stations RTA

Nous avons comparé plusieurs simulations du modèle MRCC (mentionnées dans la section 3.2.3) avec les données des stations RTA afin d'évaluer l'impact de la résolution et de la taille du domaine sur les résultats. Les trois simulations du MRCC (amno45, qc45 et qc15) ont un biais froid par rapport aux stations (figure 4.6), mais c'est l'amno45 qui est la plus froide. La plus grande différence entre les trois simulations se trouve en été, pendant les mois de juillet, août et septembre. Pendant cette période l'amno45 est 2-3°C plus froide que les deux autres simulations. La meilleure concordance entre les 3 simulations du MRCC on trouve pendant la période octobre-décembre. Les simulations produites sur le domaine du Québec sont très semblables entre elles pendant toute l'année (qc15 et qc45), mais la qc15 est en général, un peu plus froide pendant l'hiver.

Dans le voisinage de la majorité des stations de RTA, la simulation à 15 km (qc15) surestime la précipitation pendant toute l'année, sauf en hiver ; la surestimation est la plus importante en été. Les simulations à 45 km (qc45) et 15 km (qc15) sont très semblables pendant la période novembre-mai, mais pour le reste de l'année, la précipitation de la qc45 est plus proche des observations. La simulation amno45 sous-estime fortement la précipitation en janvier, et, pour la plupart de stations, elle ne génère pas le deuxième maximum annuel observé en septembre. Pour les autres mois, amno45 est plus proche des observations que les simulations du MRCC sur le domaine du Québec (qc45 et qc15), sauf au mois de juillet où la surestimation de la précipitation de la amno45 est plus importante que celle de la qc45 pour certaines stations. Il faut noter aussi que pour certaines stations et certaines périodes de l'année, les observations sur la grille régulière (produites par les modèles d'interpolation) ne suivent pas très bien le cycle annuel de la précipitation à la station, se confondant parfois avec les valeurs simulée par le MRCC (figure 4.7 ; la période décembre-avril).

4.2.4 Modèles NARCCAP versus stations EC

La comparaison des simulations des modèles NARCCAP avec les données des stations du réseau d'EC est montrée sur les figures 4.8 et 4.9. Les conclusions sont similaires à celles de la comparaison avec les stations RTA. Une différence par rapport à la comparaison précédente est que pour certaines stations, certains modèles ne simulent pas bien le cycle annuel de la température. Ainsi, la température dans les modèles augmente plus lentement que celle des observations au cours de l'été, alors qu'elle diminue plus vite à l'automne (figure 4.9). La plupart des modèles n'arrivent pas à simuler le maximum de précipitation au bon moment de l'année. L'intensité de la précipitation n'est pas bien simulée, non plus ; la différence entre les modèles est importante pour tous les mois. Le MRCC simule mieux la précipitation aux stations situées près de l'Ungava (Kuujuarapik) que sur la Basse Côte-Nord (Sept-Îles).

4.2.5 Modèle MRCC versus stations EC

Les trois simulations du MRCC sont comparées aux stations d'EC situées au nord du Québec afin d'estimer le comportement du modèle dans cette région. En général, les trois simulations sont similaires entre elles pour la température (figures 4.10, 4.11, 4.12). Au printemps, amno45 est plus

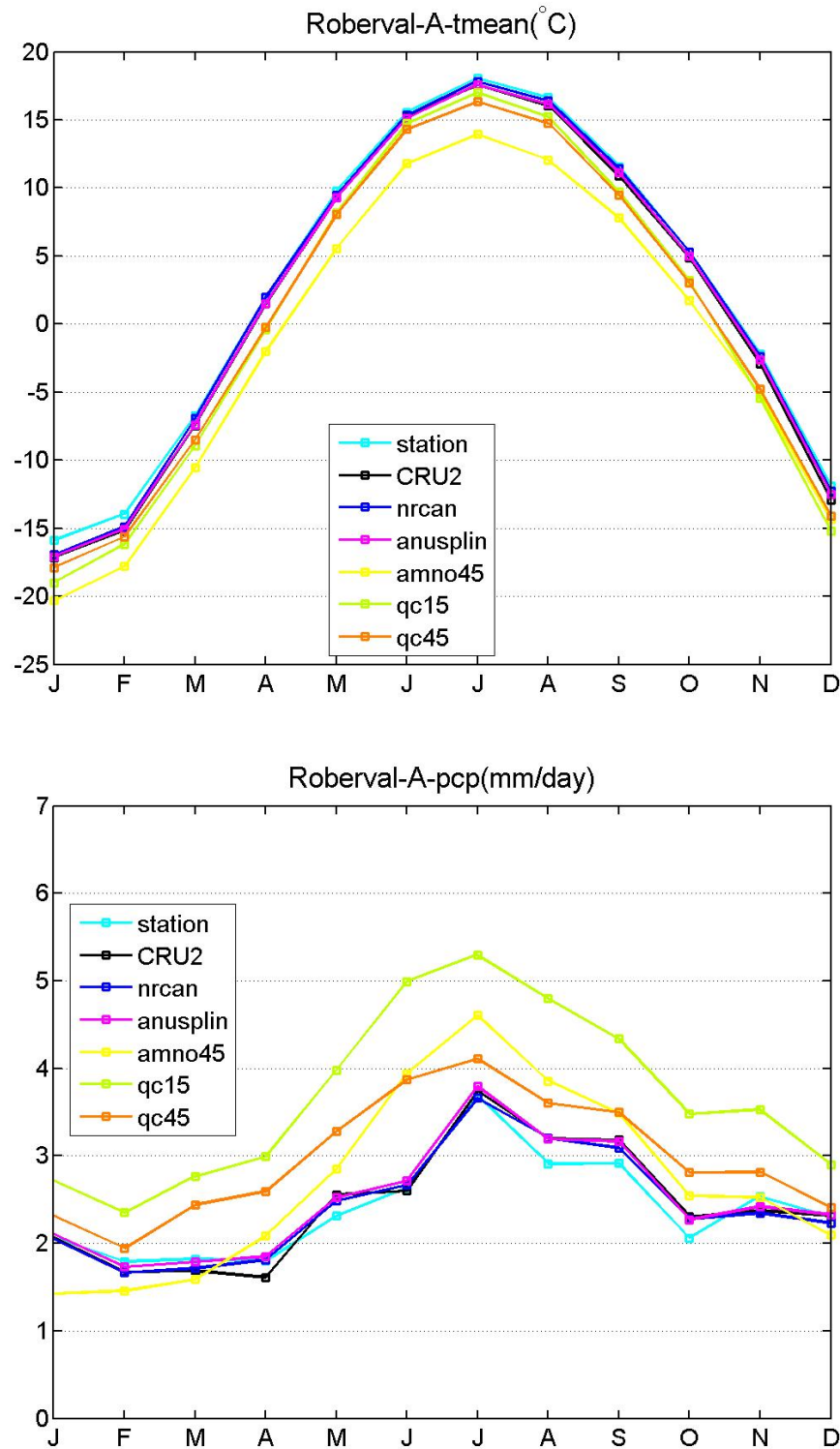


FIGURE 4.6: Cycle annuel de la température moyenne et de la précipitation mesuré à une station du réseau RTA (Roberval), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par le MRCC à 45km sur le domaine AMNO (amno45), sur le domaine du Québec (qc45) et par le MRCC à 15km sur le domaine du Québec (qc15) pour la période 1961-2000.

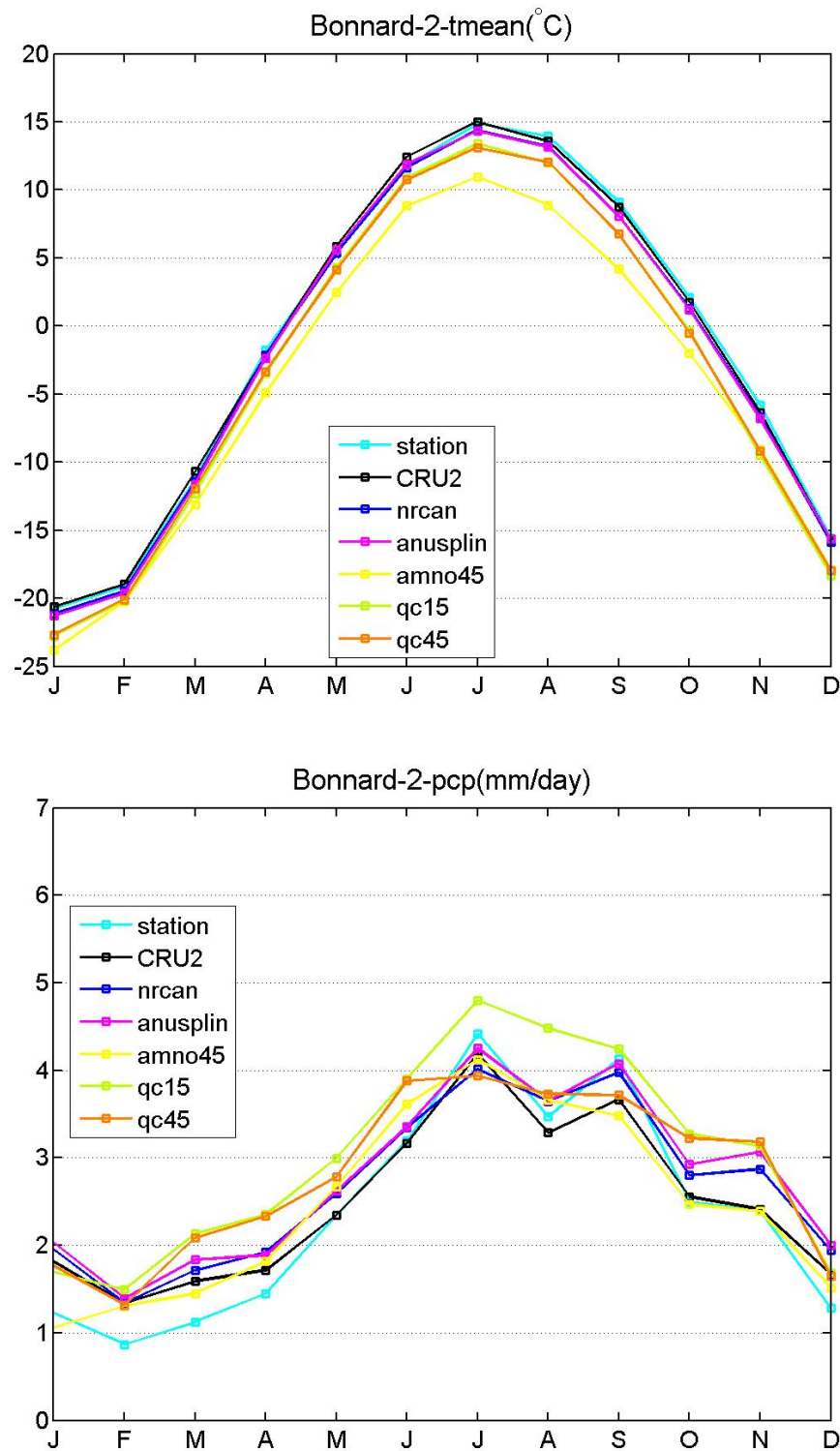


FIGURE 4.7: Cycle annuel de la température moyenne et de la précipitation mesuré à une station du réseau RTA (Bonnard 2), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par le MRCC à 45km sur le domaine AMNO (amno45), sur le domaine du Québec (qc45) et par le MRCC à 15km sur le domaine du Québec (qc15) pour la période 1987-2000.

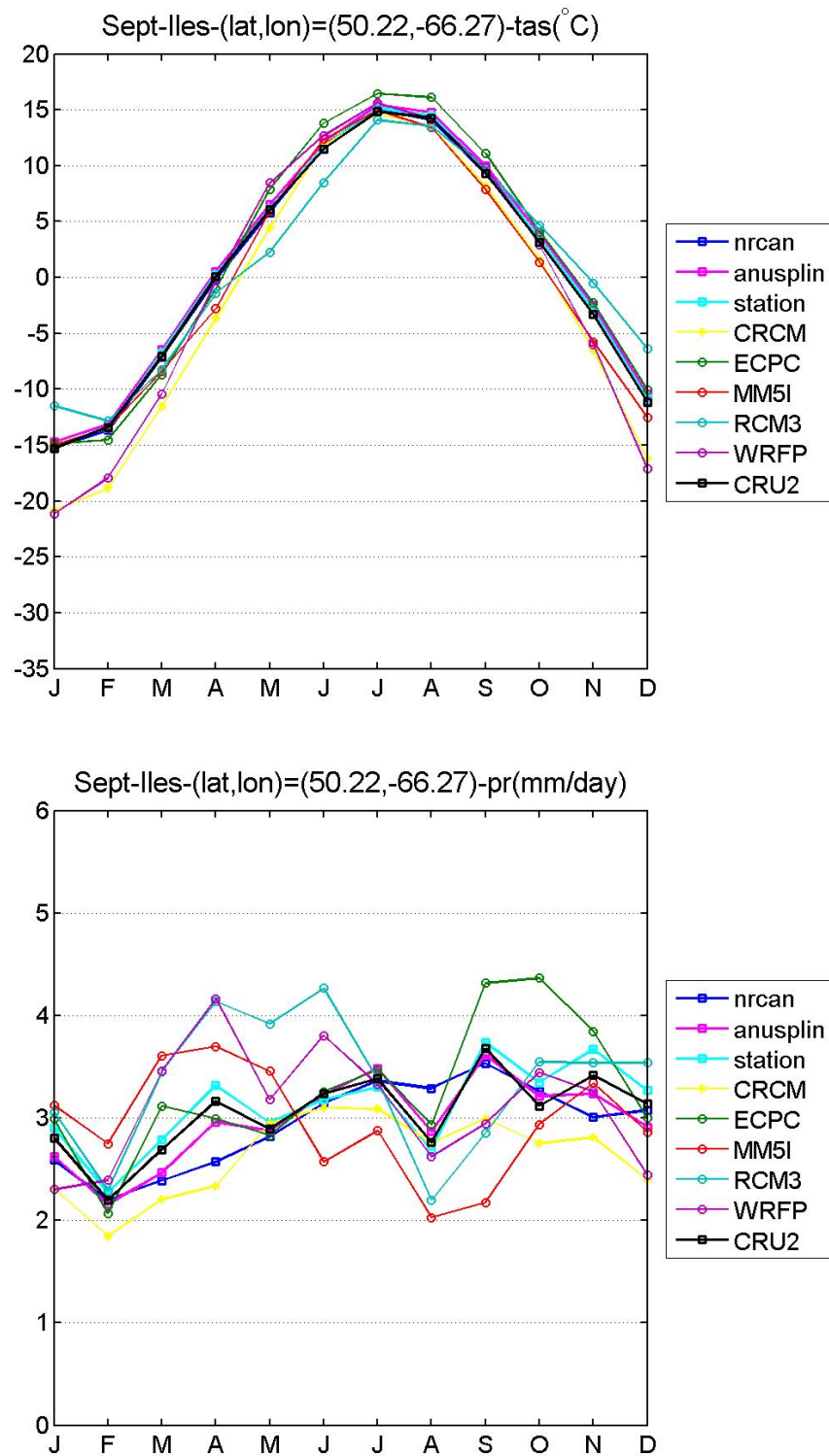


FIGURE 4.8: Cycle annuel de la température moyenne et de la précipitation mesuré à une station du réseau EC (Sept-Îles), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par les modèles climatiques NARCCAP pour la période 1980-2000.

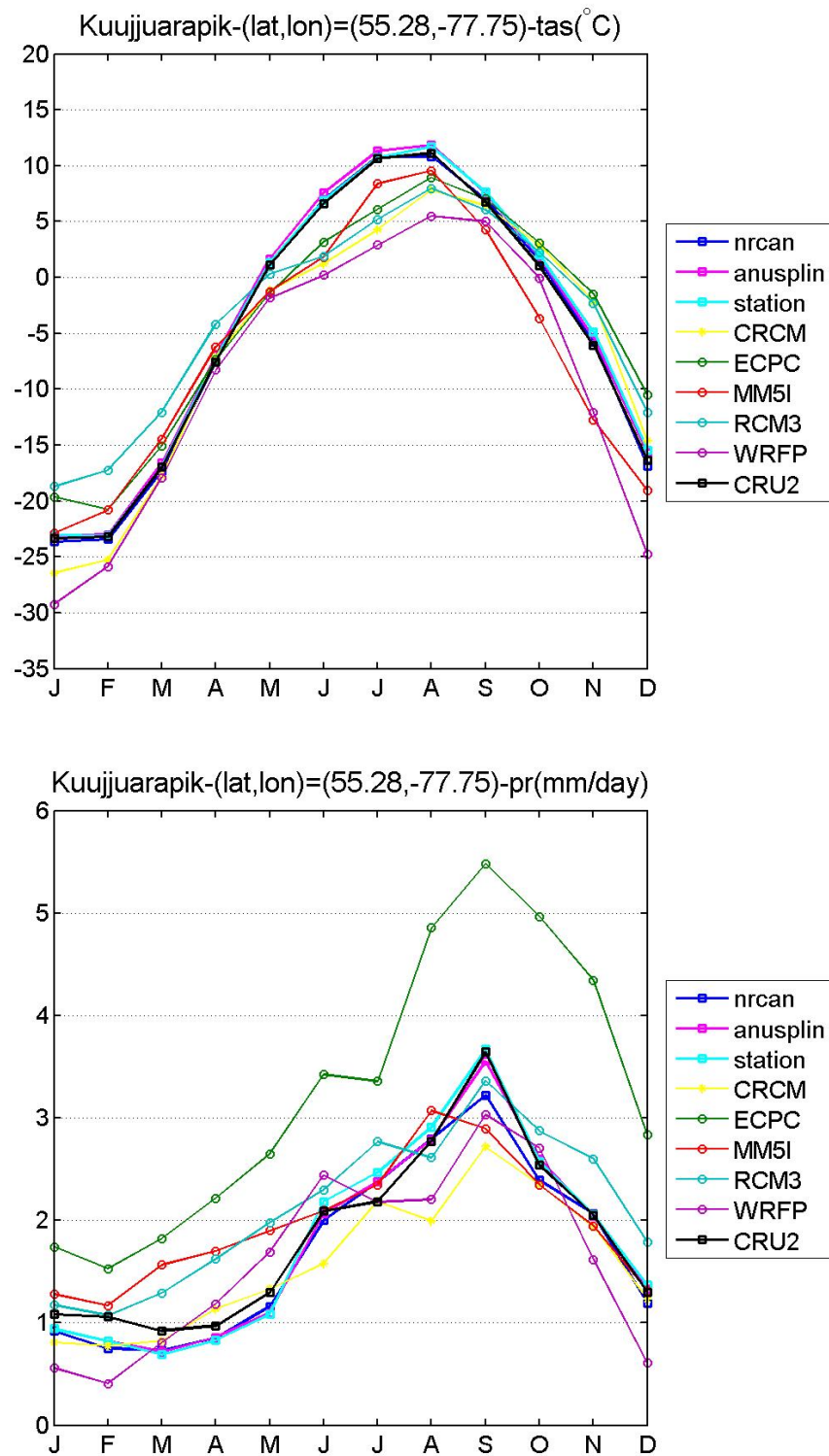


FIGURE 4.9: Cycle annuel de la température moyenne et de la précipitation mesuré à une station du réseau EC (Kuujuaupik), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par les modèles climatiques NARCCAP pour la période 1980-2000.

chaude que les stations situées sur la Péninsule d'Ungava, alors que les deux autres simulations sont plus froides. Sur la Côte-Nord (station Natashquan), les trois simulations du MRCC s'accordent le mieux avec les observations au cours de l'été alors qu'elles sont trop froides le reste de l'année. Il est important de remarquer que pour certaines stations (Kuujuaq, figure 4.11), les observations sur la grille régulière diffèrent des valeurs mesurées à la station et parfois de façon plus importante que la différence entre les simulations et la station.

La simulation du MRCC à 15 km (qc15) surestime la précipitation observée aux stations au-dessus de la Péninsule d'Ungava, surtout en été. Pour la station de Natashquan (figure 4.12), il se trouve que c'est en été que la précipitation simulée par la qc15 est la plus près des observations. De façon générale, le cycle annuel de la précipitation simulée par les deux simulations sur le domaine du Québec (qc45 et qc15) est semblable mais la qc45 produit généralement moins de précipitation (surtout en été), se rapprochant le plus souvent des valeurs observées aux stations. Au-dessus de la Péninsule d'Ungava, le MRCC à 45km sur le domaine AMNO (amno45) surestime la précipitation au printemps, alors qu'en été et en automne il est plus près des observations que les deux autres simulations. Sur la Côte-Nord (Natashquan), la amno45 sous-estime la précipitation d'octobre à décembre.

4.3 Validation du MRCC à 15km par les données NRCAN

Afin d'évaluer la simulation du MRCC à plus fine résolution, produite sur le domaine du Québec (désignée par qc15), nous l'avons comparée aux données NRCAN sur grille régulière. Les résultats de cette comparaison sont montrés sur les figures 4.13 - 4.16. On peut voir que pendant l'automne (SON, figure 4.16) et l'hiver (DJF, figure 4.13) la simulation qc15 est plus froide que les observations NRCAN, surtout au nord du Québec, et de façon plus importante pour la température minimale que pour la température maximale (surtout pour l'automne). Au printemps (MAM) et en été (JJA) (figures 4.14 et 4.15), la simulation qc15 a un biais chaud par rapport à NRCAN pour la température maximale et maintient un biais froid pour la température minimale (le biais froid étant moins important en été qu'en automne); les deux biais sont plus importants au printemps qu'en été.

Pour la précipitation, on constate que le MRCC à 15 km produit généralement plus de précipitation que les données NRCAN sur grille régulière, particulièrement à l'ouest du domaine et surtout pendant les saisons du printemps et de l'été.

4.4 Comparaison des différentes simulations du MRCC

Afin de valider la simulation à fine résolution (qc15), nous l'avons comparée, en premier lieu, aux simulations dont nous connaissons le mieux le comportement, soit celles du MRCC produites à 45 km sur le domaine du Québec (qc45) et de l'Amérique du Nord (amno45).

La simulation à 45 km a été interpolée à la grille de 15 km et ensuite, la différence entre deux simulations a été calculée.

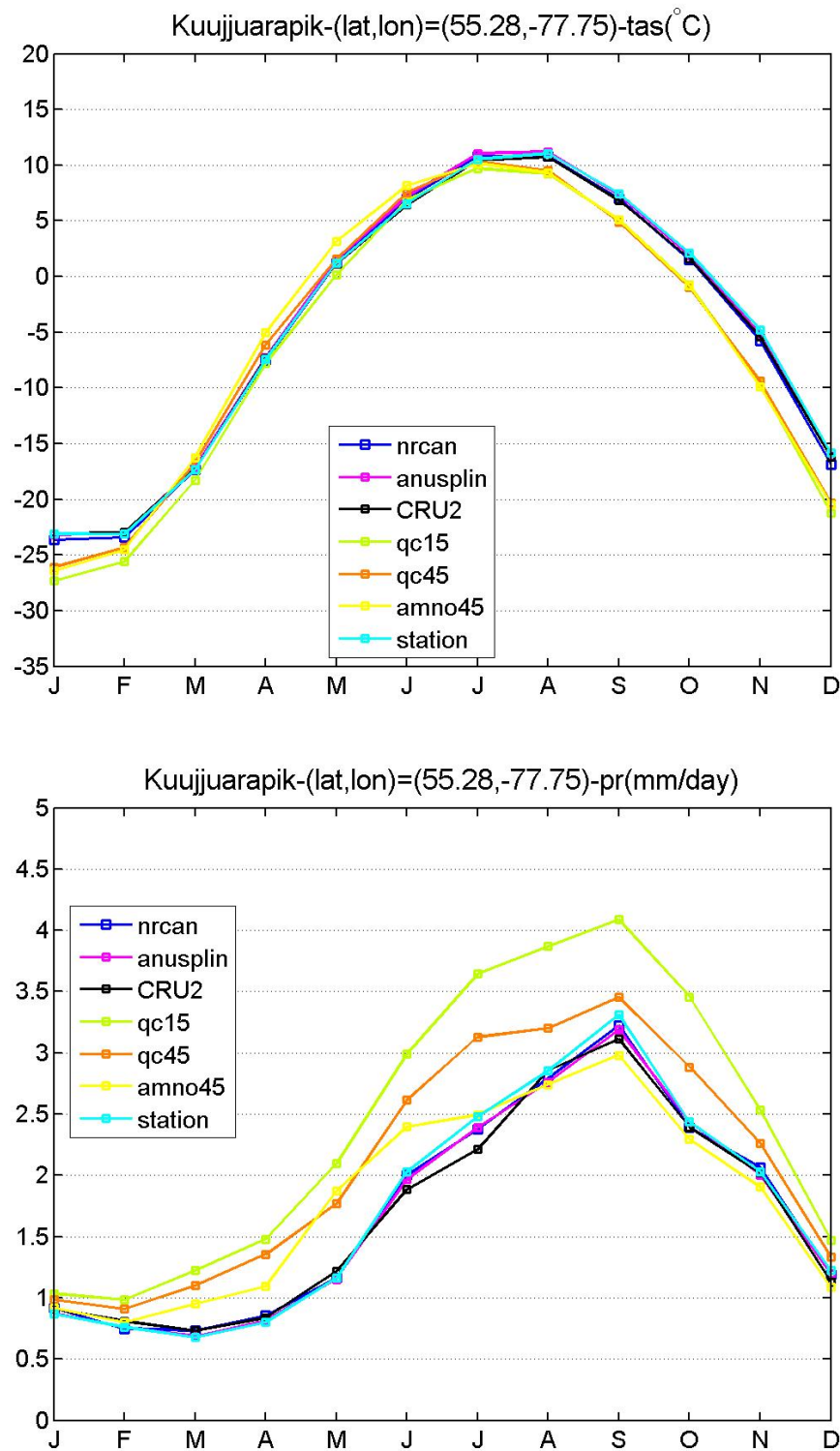


FIGURE 4.10: Cycle annuel de la température maximale et minimale et de la précipitation mesuré à une station d'EC (Kuujuarapik), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par le MRCC à 45km au-dessus du domaine AMNO (amno45), au-dessus du domaine QC (qc45), et par MRCC à 15km au-dessus du domaine QC (qc15) pour la période 1961-2000.

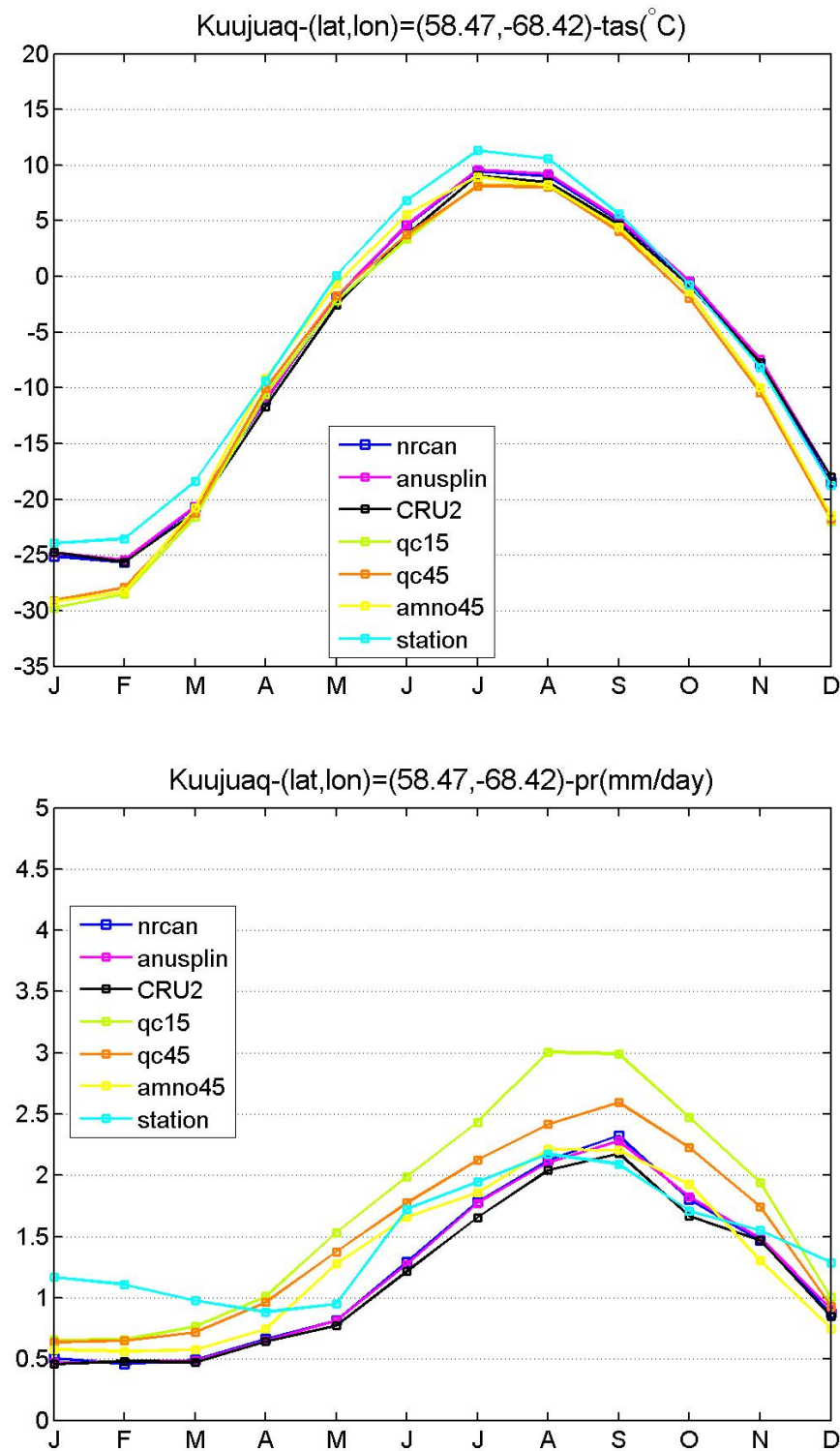


FIGURE 4.11: Cycle annuel de la température maximale et minimale et de la précipitation mesuré à une station d'EC (Kuujuuaq), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par le MRCC à 45km au-dessus du domaine AMNO (amno45), au-dessus du domaine QC (qc45) et par MRCC à 15km au-dessus du domaine QC (qc15) pour la période 1961-2000.

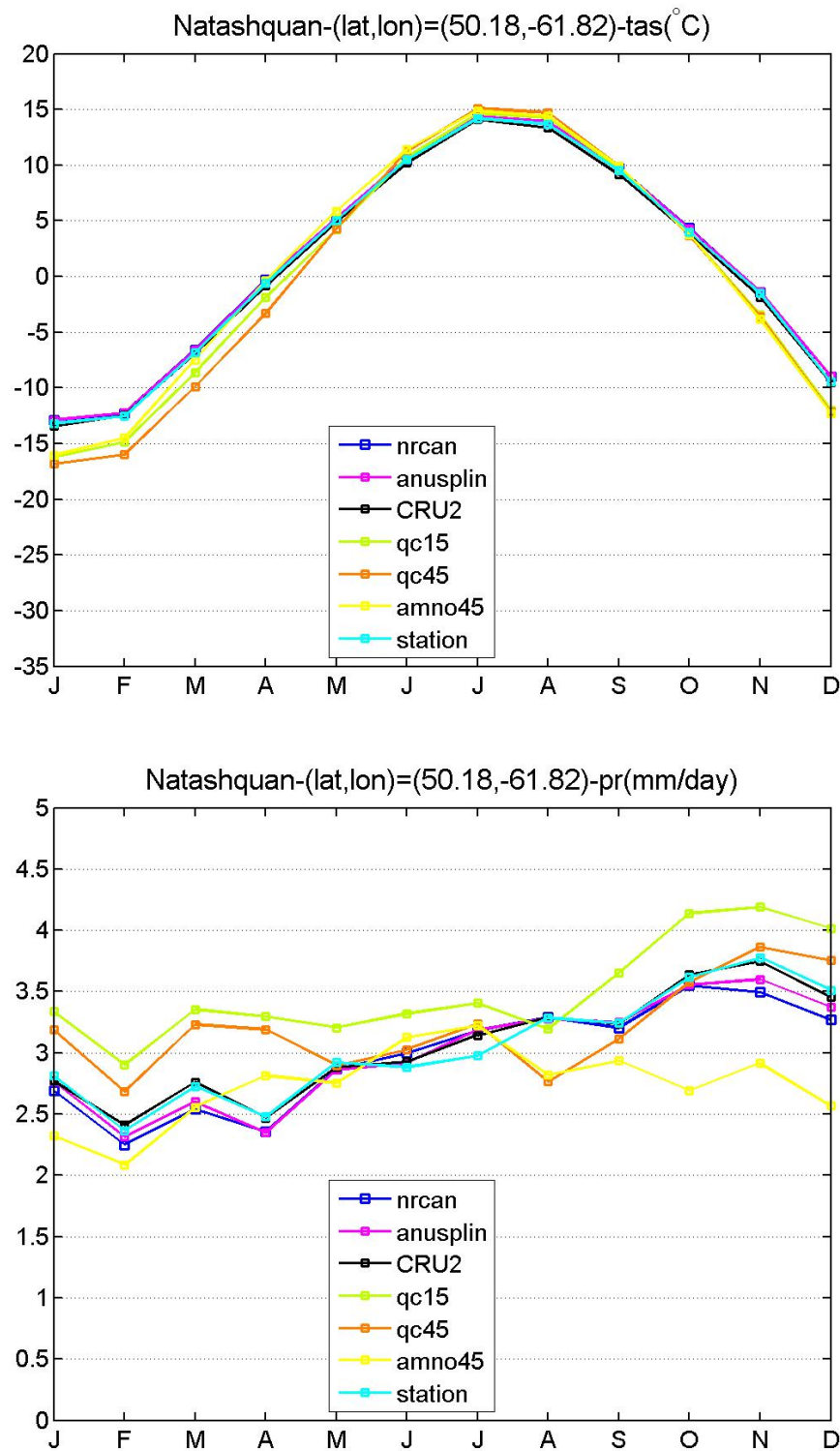


FIGURE 4.12: Cycle annuel de la température maximale et minimale et de la précipitation mesuré à une station d'EC (Natashquan), provenant des modèles d'interpolation (NRCAN, ANUSPLIN et CRU2) et simulé par le MRCC à 45km au-dessus du domaine AMNO (amno45), au-dessus du domaine QC (qc45) et par MRCC à 15km au-dessus du domaine QC (qc15) pour la période 1961-2000.

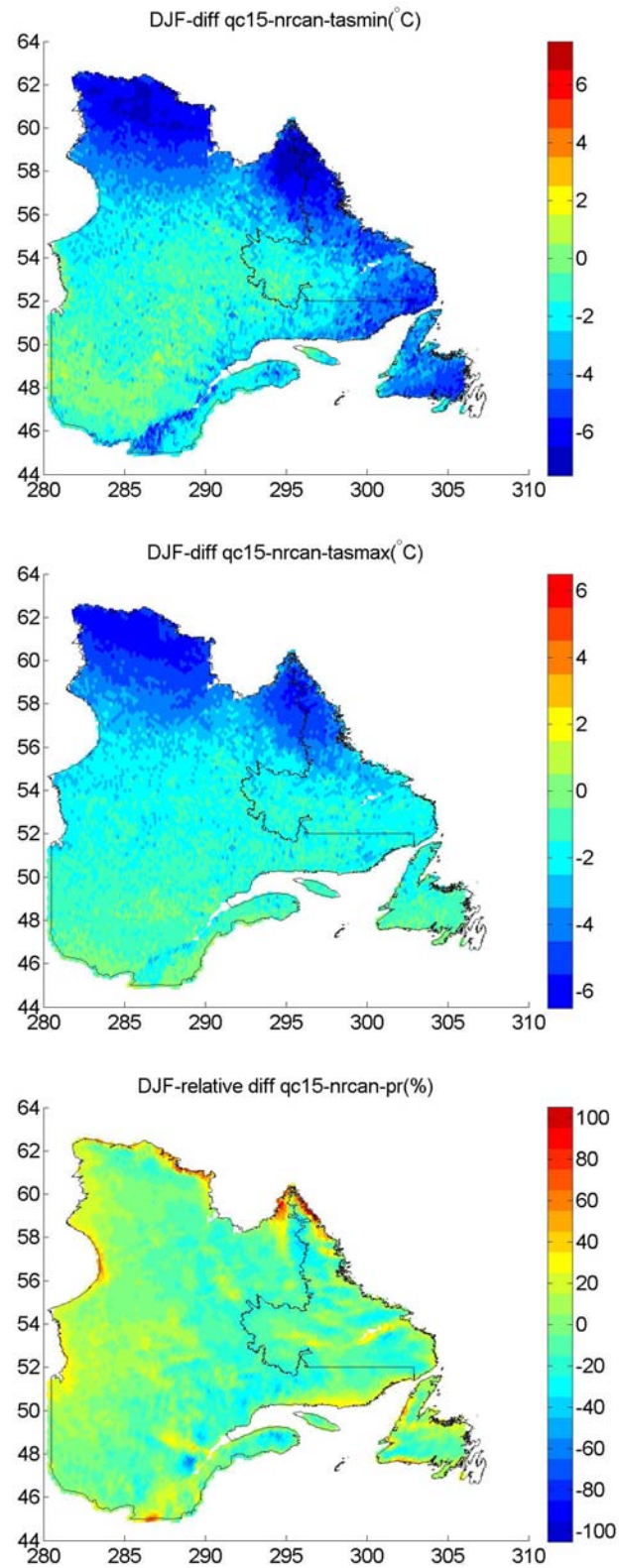


FIGURE 4.13: Différence entre la simulation du MRCC à 15 km (qc15) sur le domaine du Québec et la grille NRCAN pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison d'hiver.

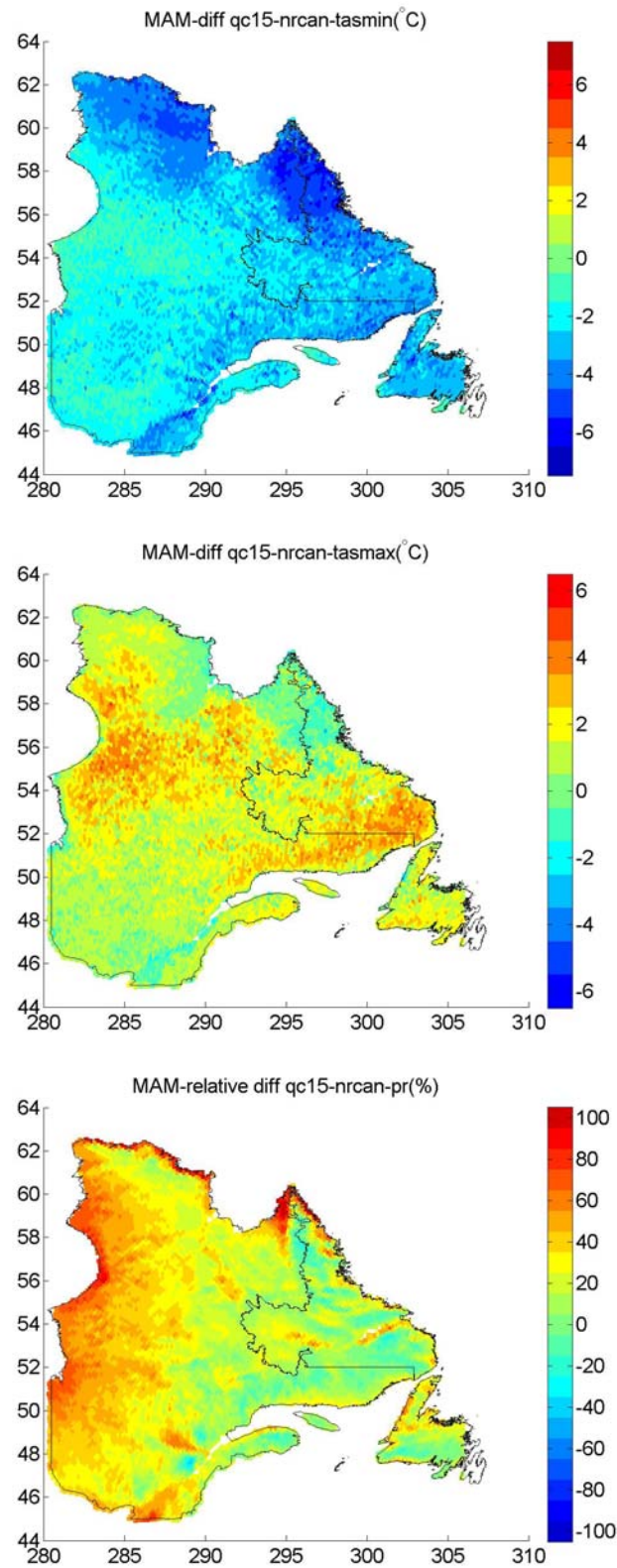


FIGURE 4.14: Différence entre la simulation du MRCC à 15 km (qc15) sur le domaine du Québec et la grille NRCAN pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison de printemps.

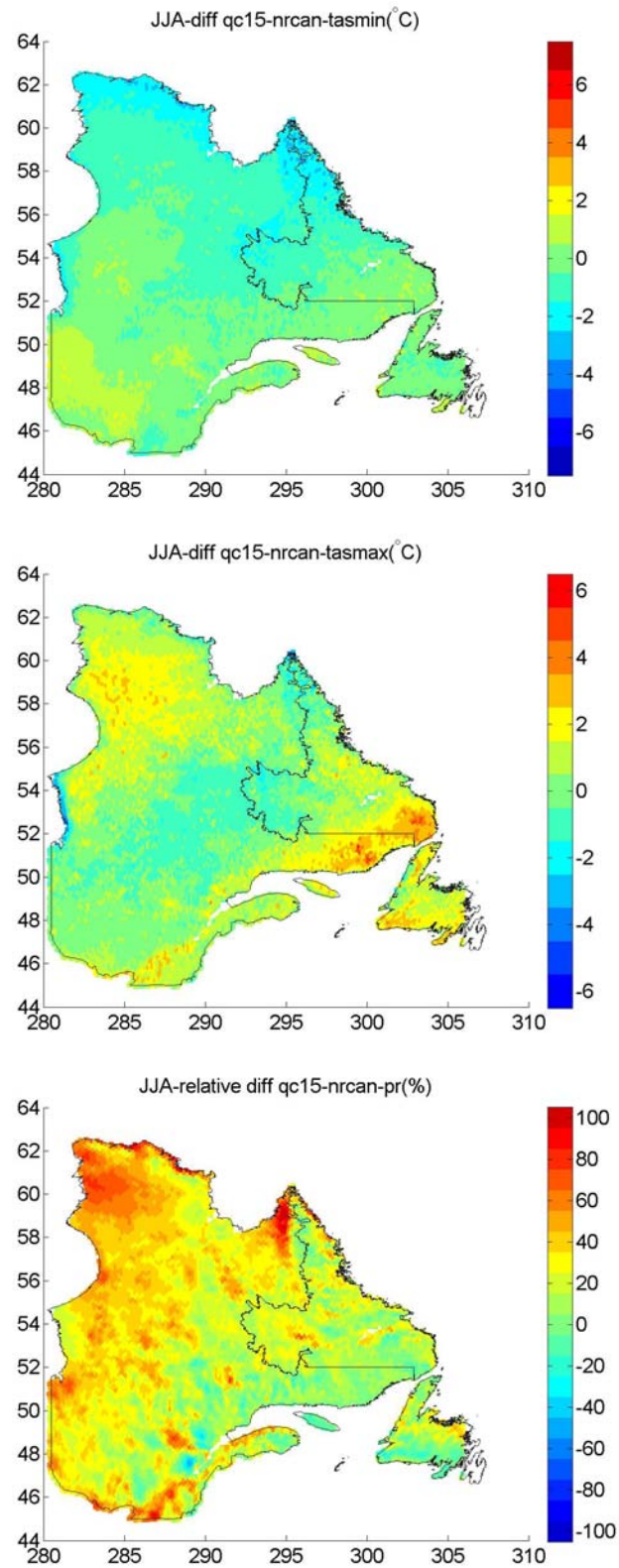


FIGURE 4.15: Différence entre la simulation du MRCC à 15 km (qc15) sur le domaine du Québec et la grille NRCAN pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison d'été.

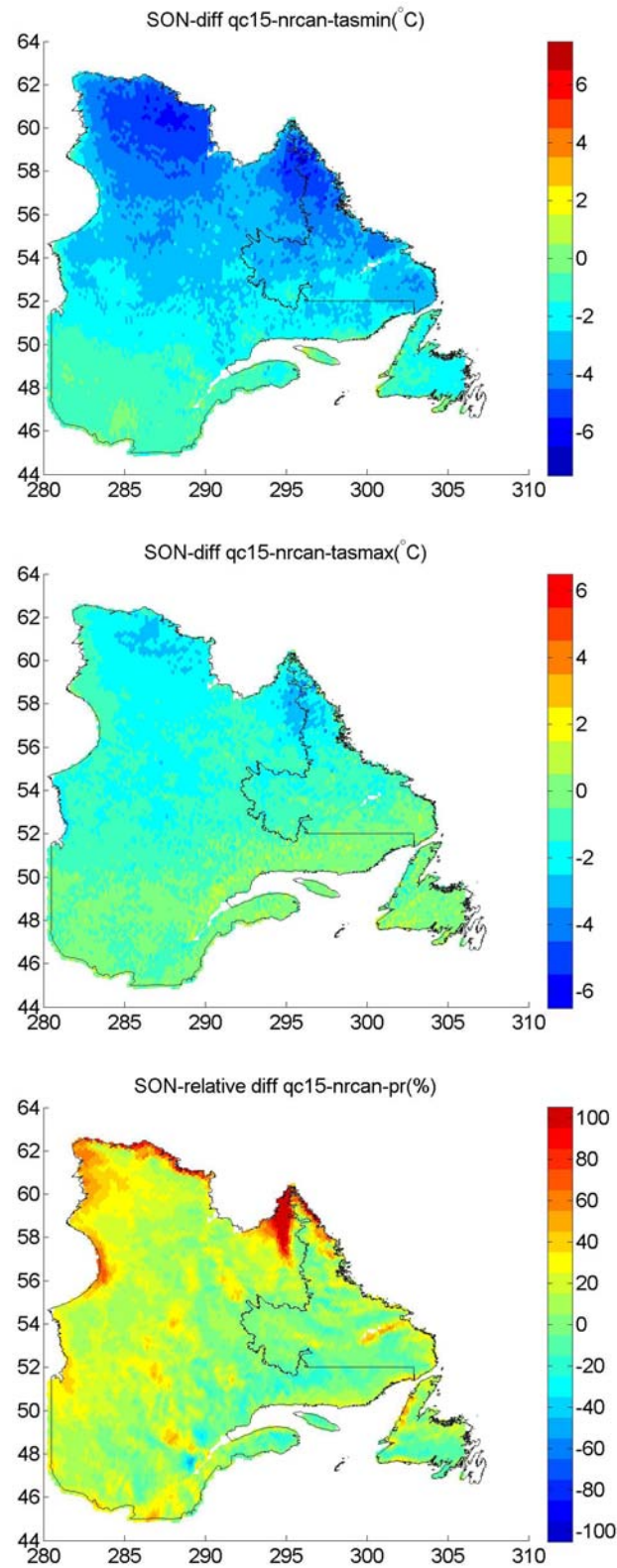


FIGURE 4.16: Différence entre la simulation du MRCC à 15 km (qc15) sur le domaine du Québec et la grille NRCAN pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison d'automne.

4.4.1 qc15 versus qc45

Dans cette section, nous avons comparé deux simulations du modèle MRCC, soit la qc15 contre qc45, dont la seule différence est la résolution horizontale (15 km versus 45 km). Donc, toutes les dissimilitudes entre les résultats de la simulation qc15 et qc45 sont associées à cette différence de résolution horizontale. Les résultats (figures 4.17, 4.18, 4.19, 4.20) montrent que la simulation à 15 km est plus froide que celle à 45 km pour ce qui est de la température minimale. Cette différence est surtout importante au nord du domaine et surtout pendant l'automne (SON) et l'hiver (DJF). Qui concerne la température maximale, le qc15 est un peu plus chaude que la qc45 surtout au printemps et en été. La qc15 est généralement plus humide sur la moitié ouest du domaine et plus sèche à l'est, par rapport à qc45, pour toutes les saisons sauf en été (JJA). En été, qc15 surestime généralement la précipitation par rapport à qc45 sauf sur la côte du Labrador où elle est plus sèche.

4.4.2 qc15 versus amno45

La comparaison entre les simulations qc15 (sur le domaine du Québec à 15km de résolution) et amno45 (sur le domaine AMNO à 45km de résolution) montre les dissimilitudes causées par la combinaison des différences dans la résolution horizontale et dans la taille du domaine (figures 4.21, 4.22, 4.23, 4.24). En général, qc15 est plus froide qu'amno45, avec la plus grande différence au printemps. En été, par contre, qc15 a un tasmax généralement plus élevée qu'amno45 (atteignant 2°C), sauf dans les régions côtières (et quelques régions montagneuses); pour tasmin, les différences se situent entre -1 °C et +1 °C, avec les différences négatives plutôt concentrées sur le nord du Québec. En automne, le patron géographique des différences pour tasmax et pour tasmin se trouve inversé, de façon à ce que les régions qui ont les valeurs négatives des différences de tasmax (qc15 moins amno45), se retrouvent avec des valeurs positives pour tasmin. Si on s'intéresse à la température moyenne (donnée par $[\text{tasmax} + \text{tasmin}]/2$) à l'automne (SON), il en résultera donc une petite différence entre ces deux simulations. Finalement, c'est pendant l'hiver que les deux simulations sont les plus semblables.

La simulation qc15 produit généralement plus de précipitation que la amno45, surtout en automne. Il est important de noter la présence d'une bande de précipitation importante simulée par la qc15, pour toutes les saisons, située en amont (à l'ouest) des montagnes Torngat. En effet, il est courant que des modèles à plus fine résolution produisent plus de précipitation près des montagnes, en lien avec leur meilleure définition du gradient topographique (i.e., les pentes). Cela dit, vu le manque de stations d'observations dans la région, il est difficile de juger si cette augmentation de la précipitation représente une amélioration de l'estimation par rapport à la plus grossière résolution (amno45). Pendant l'hiver et l'automne, la qc15 surestime la précipitation par rapport à l'amno45 surtout sur le sud du domaine et autour de la vallée du Saint-Laurent (jusqu'à 80-100%).

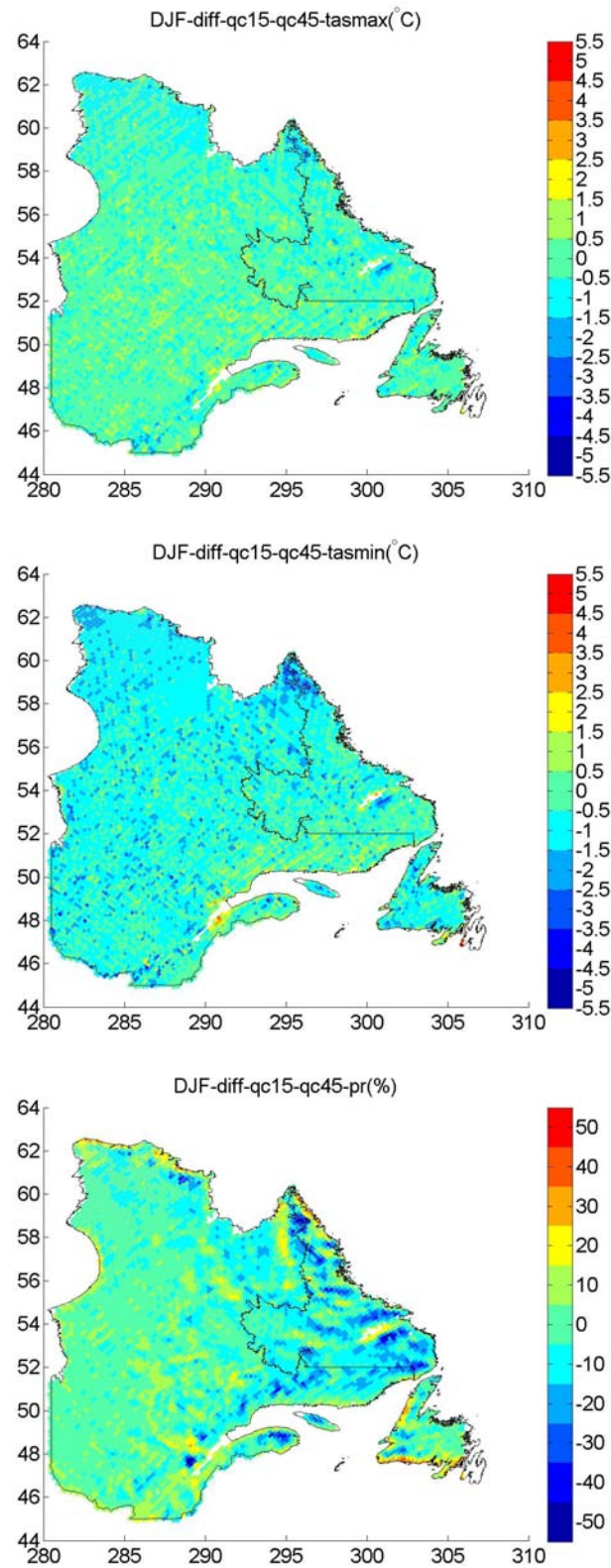


FIGURE 4.17: Différence entre les deux simulations du MRCC sur le domaine du Québec : qc15 et qc45 pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison d'hiver.

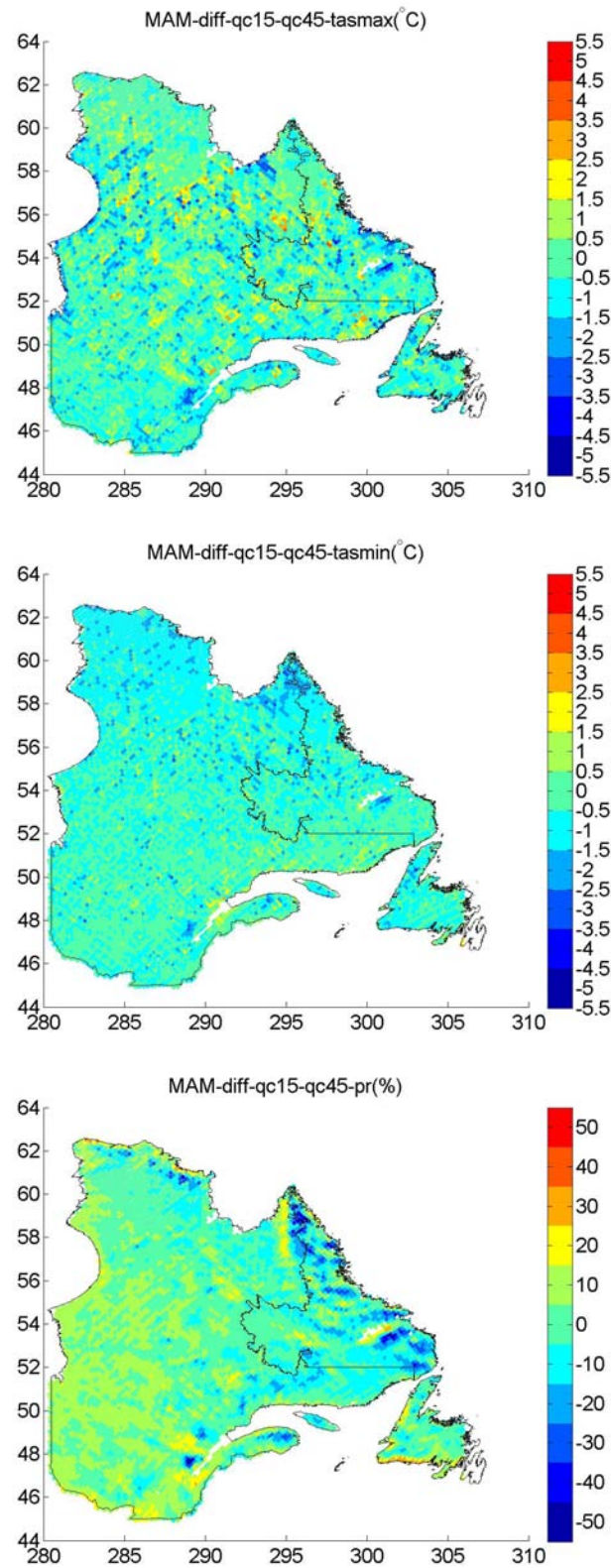


FIGURE 4.18: Différence entre les deux simulations du MRCC sur le domaine du Québec : qc15 et qc45 pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison de printemps.

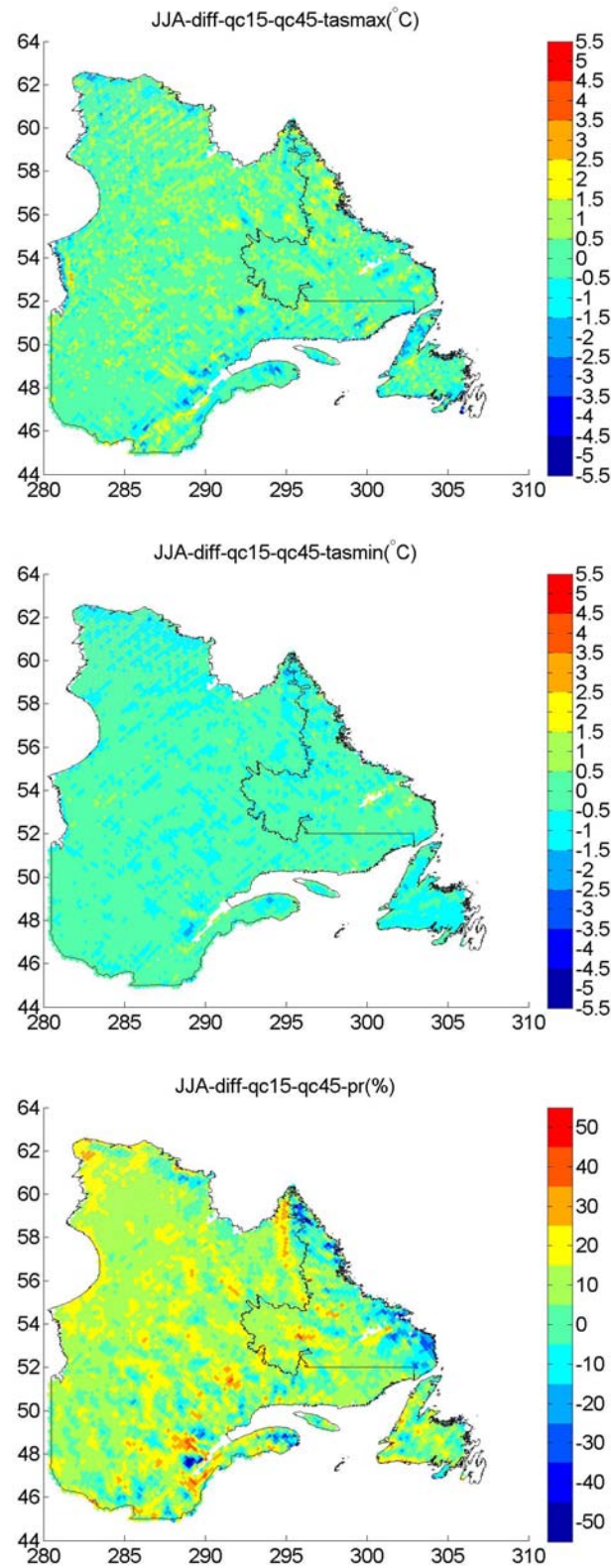


FIGURE 4.19: Différence entre les deux simulations du MRCC sur le domaine du Québec : qc15 et qc45 pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison d'été.

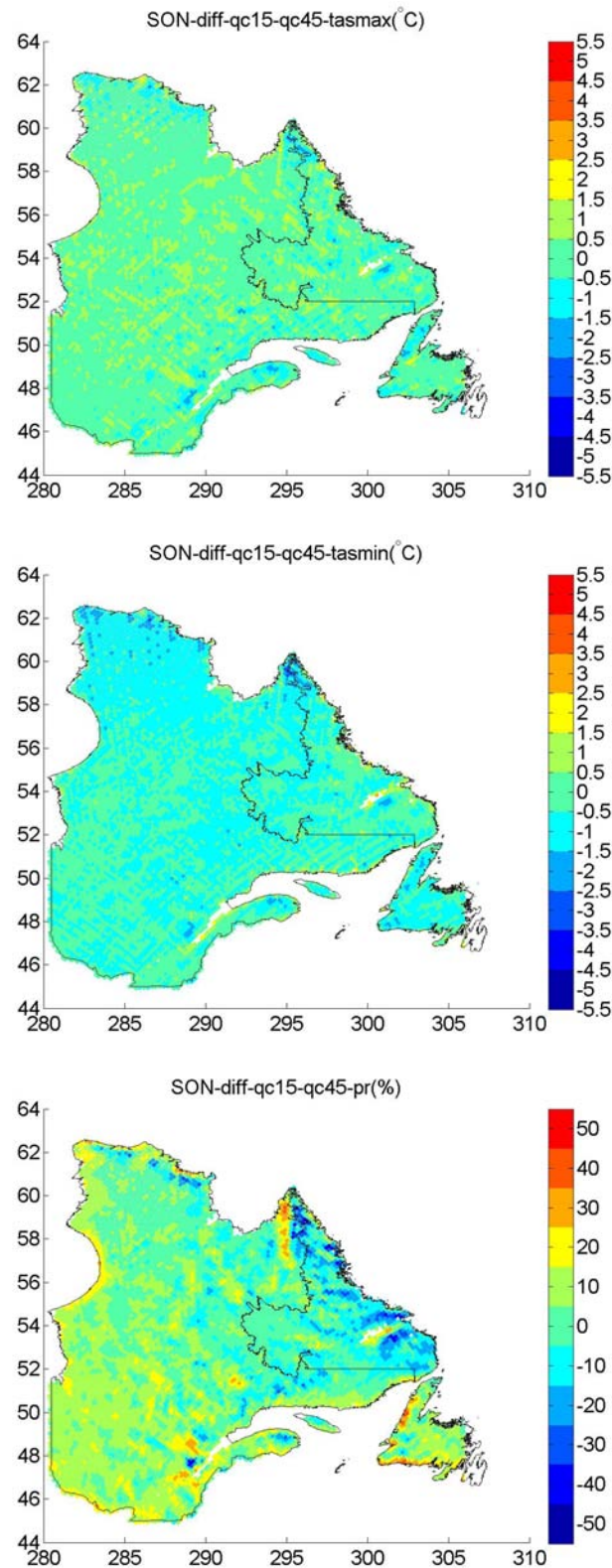


FIGURE 4.20: Différence entre les deux simulations du MRCC sur le domaine du Québec : qc15 et qc45 pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et de la précipitation (pr) ; saison d'automne.

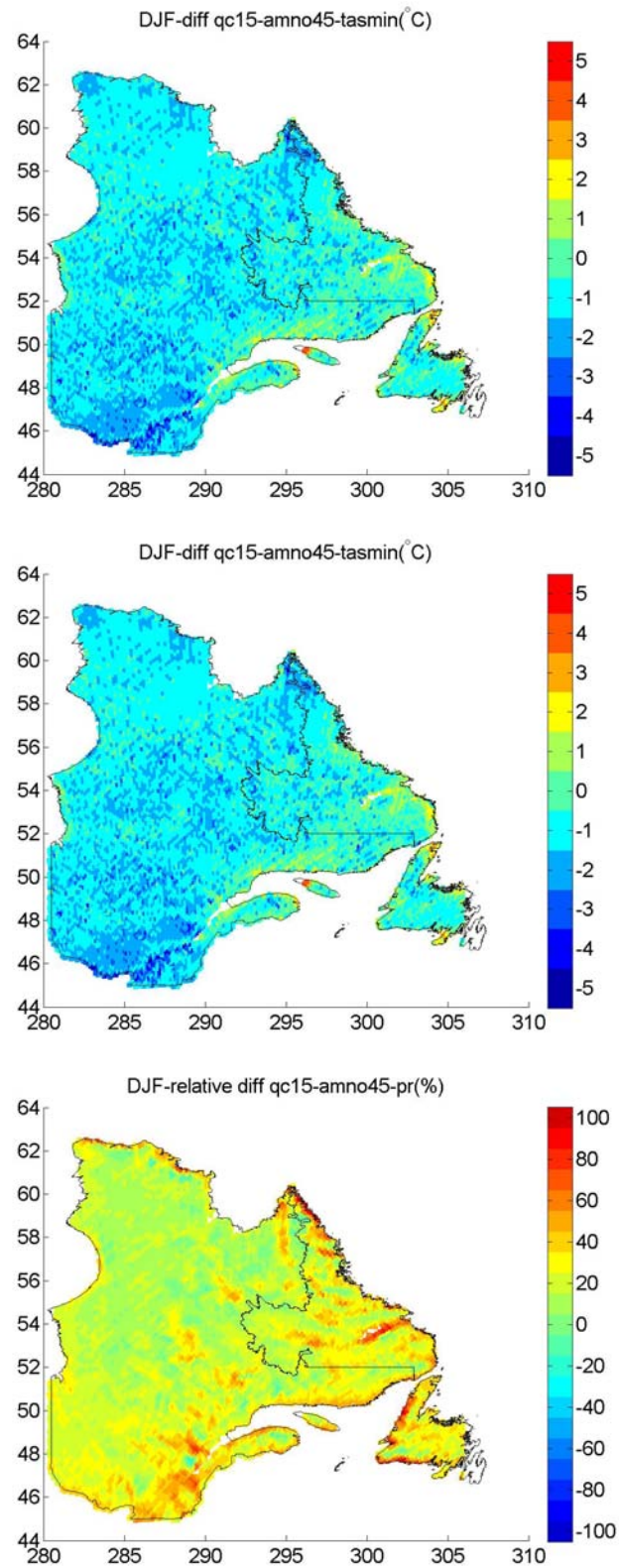


FIGURE 4.21: Différence entre la simulation du MRCC à 15km sur le domaine du Québec (qc15) et à 45km sur le domaine AMNO (amno45) : pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et la précipitation (pr) ; saison d'hiver.

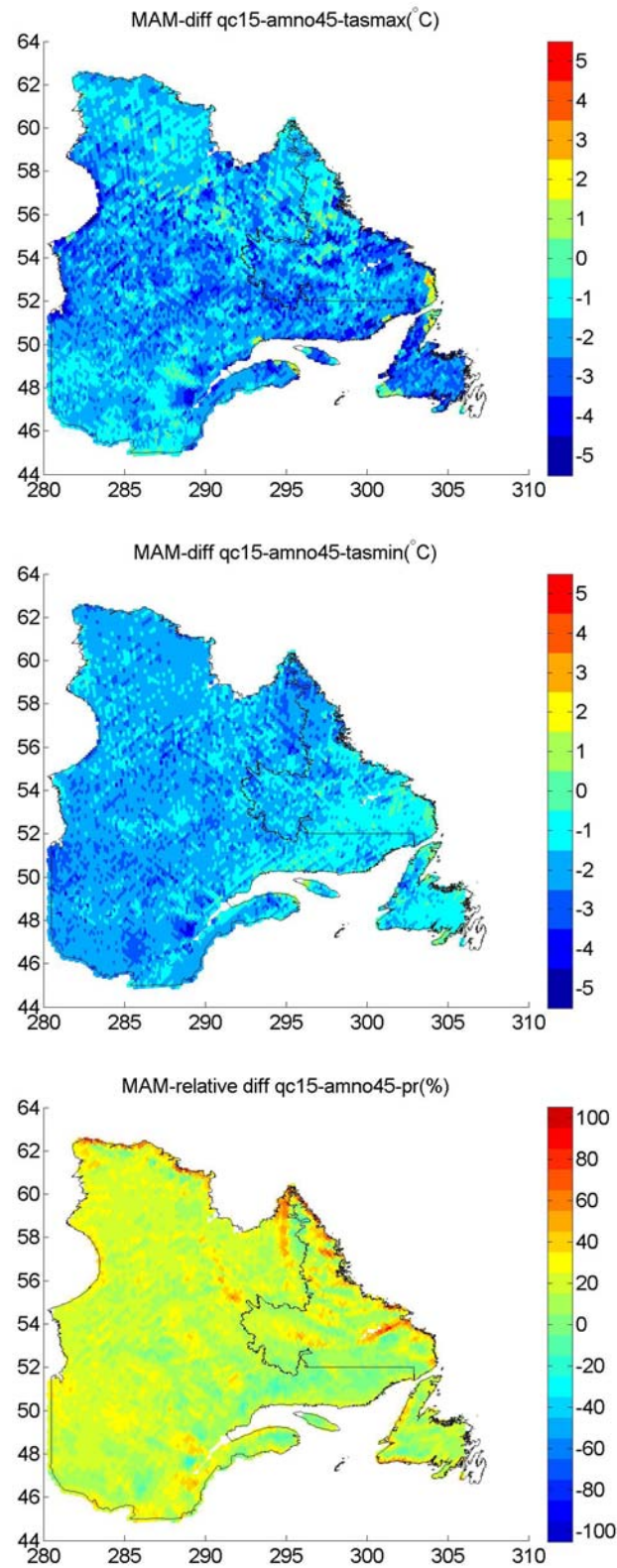


FIGURE 4.22: Différence entre la simulation du MRCC à 15km sur le domaine du Québec (qc15) et à 45km sur le domaine AMNO (amno45) : pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et la précipitation (pr) ; saison de printemps.

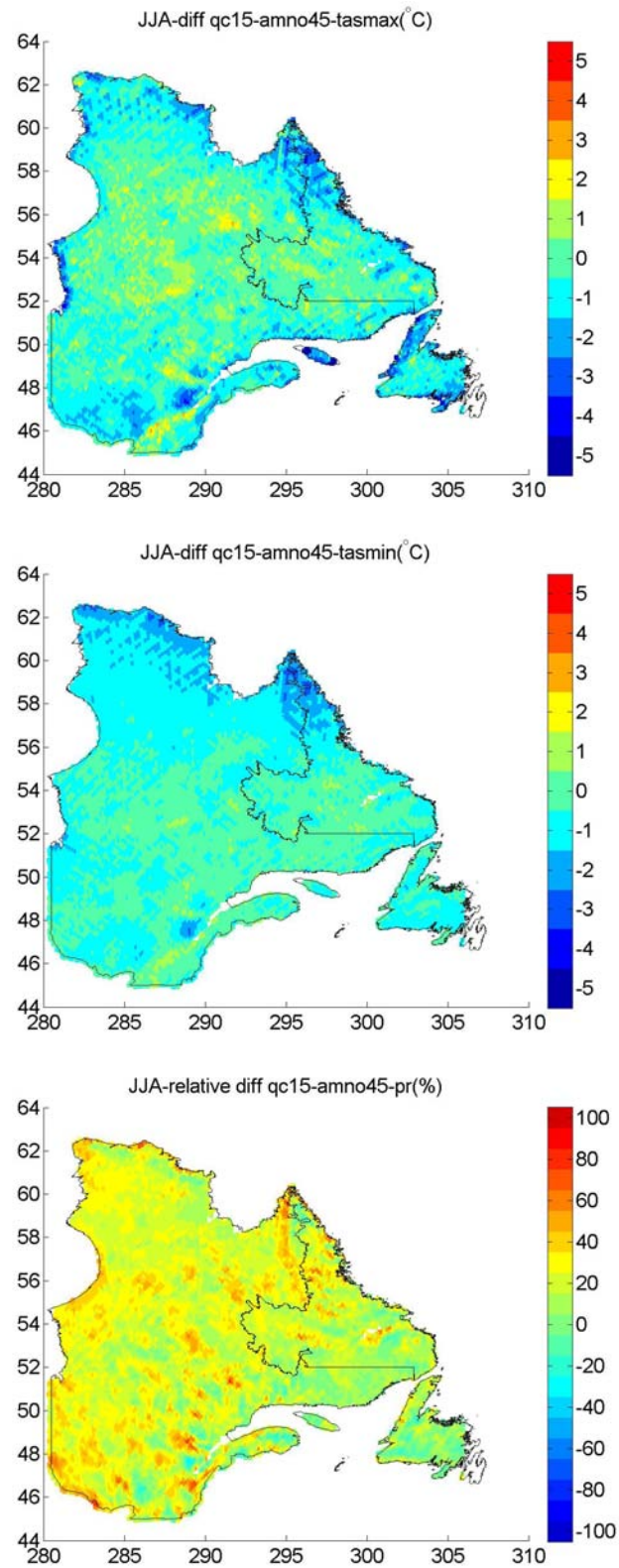


FIGURE 4.23: Différence entre la simulation du MRCC à 15km sur le domaine du Québec (qc15) et à 45km sur le domaine AMNO (amno45) : pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et la précipitation (pr) ; saison d'été.

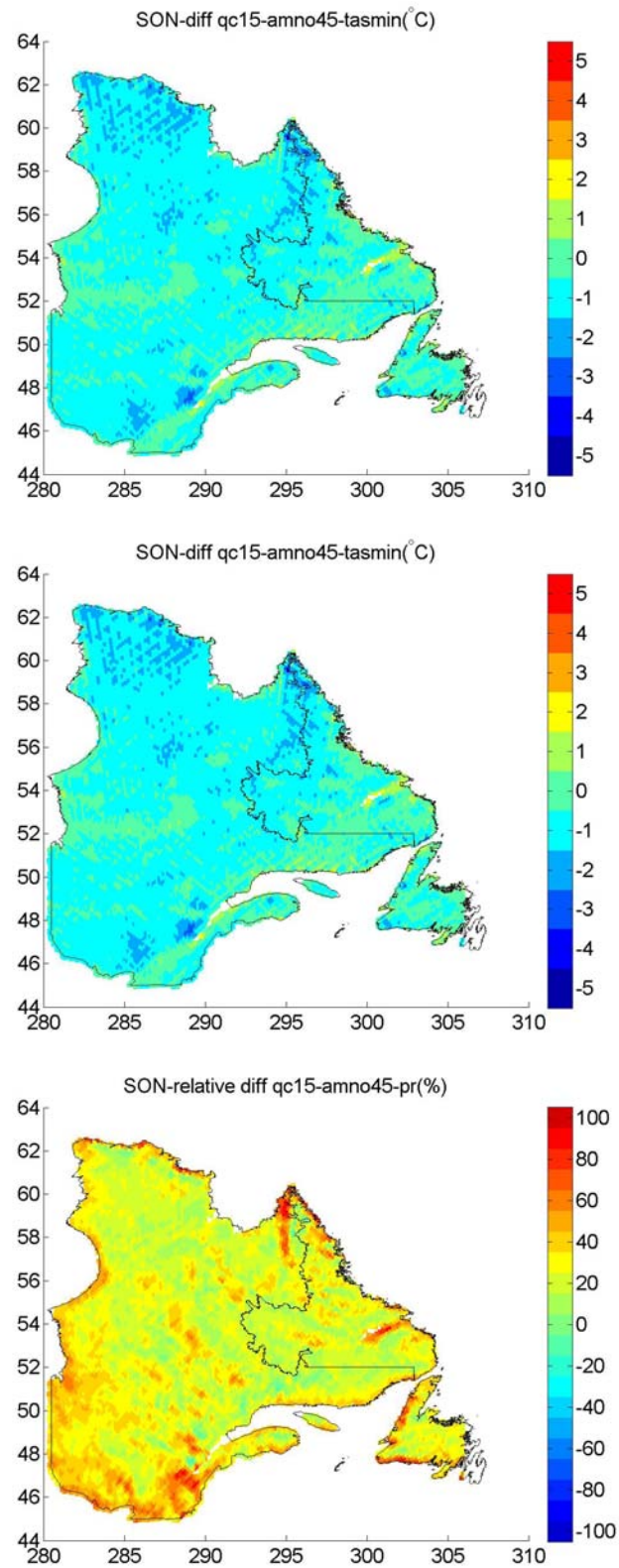


FIGURE 4.24: Différence entre la simulation du MRCC à 15km sur le domaine du Québec (qc15) et à 45km sur le domaine AMNO (amno45) : pour la température maximale (tasmax) et minimale (tasmin) et la précipitation (pr) ; saison d'automne.

4.5 Validation du MRCC par des séries temporelles aux stations

Le MRCC a été comparé aux données des stations du réseau d'EC ayant les séries temporelles les plus longues - qui commencent avant le 1^{er} janvier 1926. Le but de cette comparaison était d'obtenir les réponses aux questions soulevées dans la section 3.5. La même comparaison a été faite avec les stations du réseau de RTA afin d'évaluer la série temporelle des données sur grille de NRCAN par rapport à des stations indépendantes (qui n'ont pas été utilisées pour produire les données NRCAN).

4.5.1 Validation du MRCC par des stations d'EC avec les séries temporelles les plus longues

Les figures 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 montrent les séries temporelles des stations d'EC situées dans chacune des quatre régions définies sur la figure 3.3 pour leur période d'opération. La première chose notable est la plus grande variabilité inter-annuelle en hiver (février) qu'en été (juillet) pour toutes les régions et pour toutes les stations. Deuxièmement, on remarque la bonne corrélation entre les différentes stations d'une même région. Pour certaines stations, on peut aussi clairement noter l'augmentation de la température pendant la dernière vingtaine d'années. Par exemple, pour les stations de Kuujjuarapik et Kuujjuaq (figure 4.28), on remarque que les températures minimale et maximale du mois de juillet ont augmenté rapidement au cours des dernières 15-20 années.

La figure 4.29 montre les séries temporelles de la station Inukjuak d'EC, du modèle MRCC (3 simulations : qc15, qc45 et amno45) ainsi que des observations NRCAN sur grille régulière. Les séries du modèle et de NRCAN sont obtenues au point le plus proche de la station. On y présente les séries annuelles de la température maximale et minimale, pour les mois de février et de juillet. On peut faire les constats suivants :

1. la série annuelle du MRCC est bien corrélée avec la station
2. la variabilité inter-annuelle est bien simulée par le MRCC
3. le MRCC suit bien la tendance de la station

4.5.2 Validation du MRCC par des stations de RTA

La figure 4.30 présente les séries temporelles des stations de RTA pour leurs périodes d'opération respectives, qui sont plus courtes que celle des stations d'EC dont on a parlé à la sous-section précédente (4.5.1). De la même façon que pour les stations d'EC, on note ici aussi que la variabilité inter-annuelle est plus importante en février qu'en juillet, et que les stations sont bien corrélées entre elles. Par contre, un réchauffement n'est pas apparent pour ces stations, comme c'était le cas pour certaines stations d'EC situées plus au nord (telles que Kuujjuarapik et Kuujjuaq).

La figure 4.31 montre les séries temporelles du modèle MRCC (3 simulations : qc15, qc45 et amno45) et des observations interpolées (NRCAN) comparées à une station de RTA (Chute du

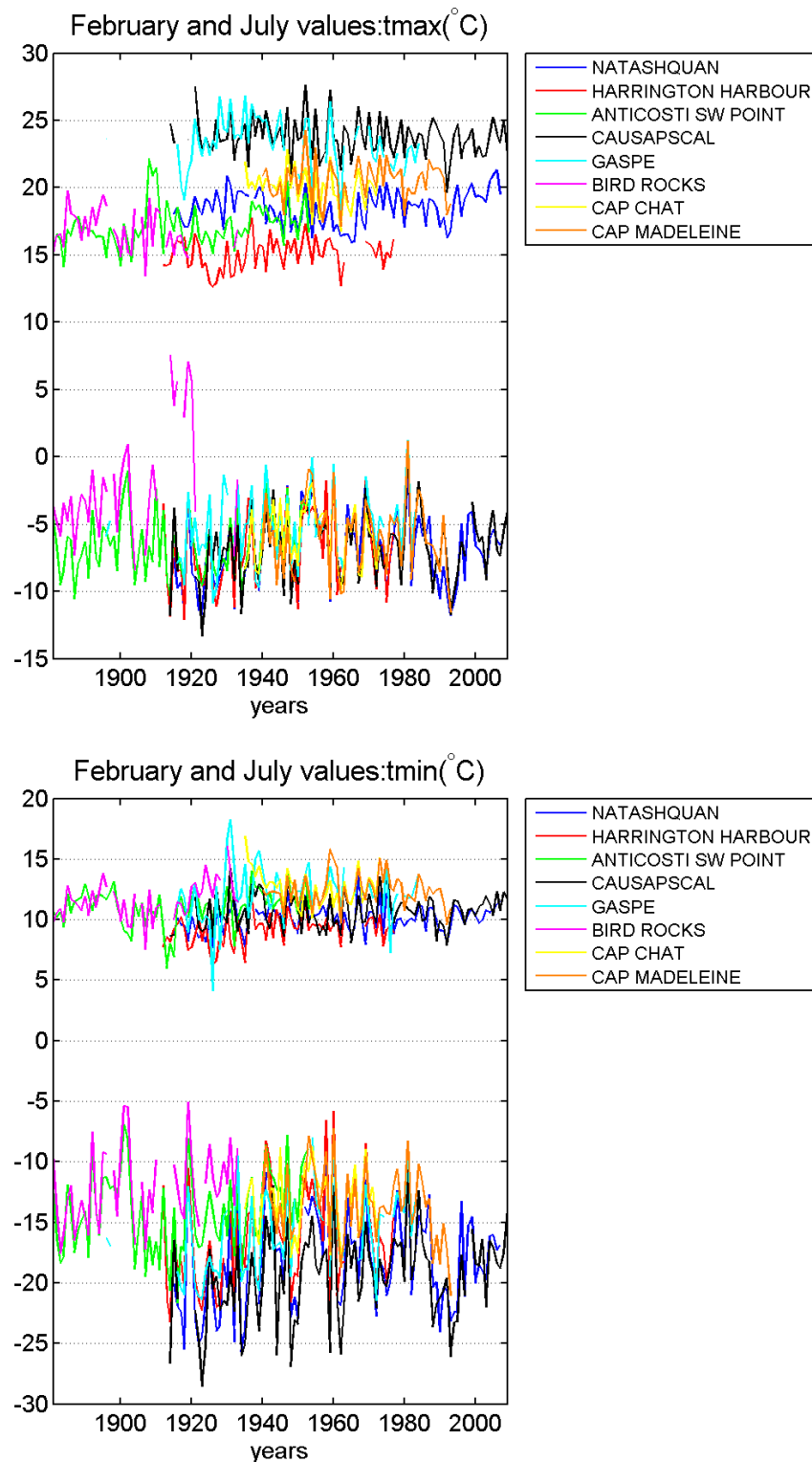


FIGURE 4.25: Séries temporelles de stations dans la région "est" pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

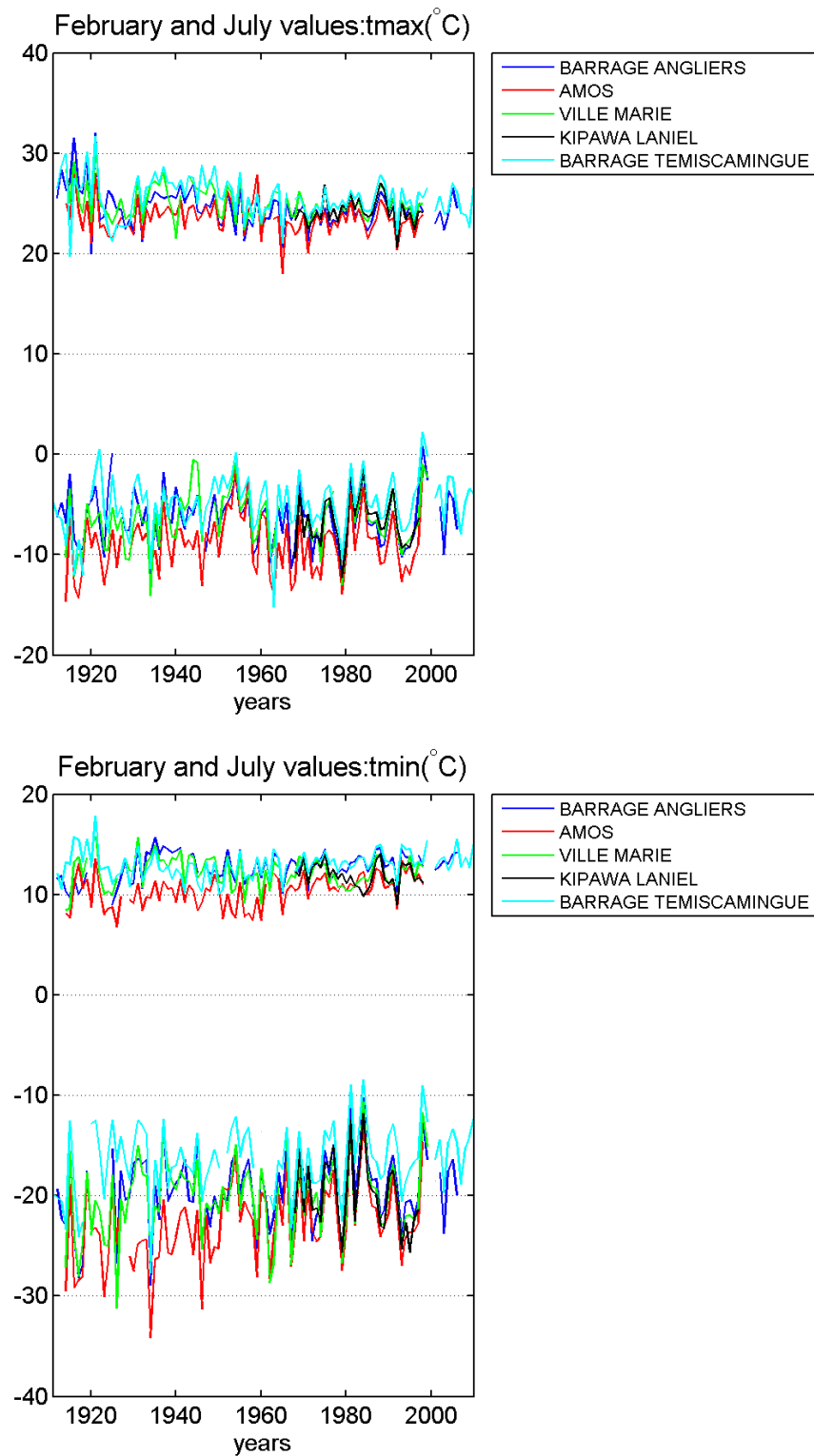


FIGURE 4.26: Séries temporelles de stations dans la région "ouest" pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

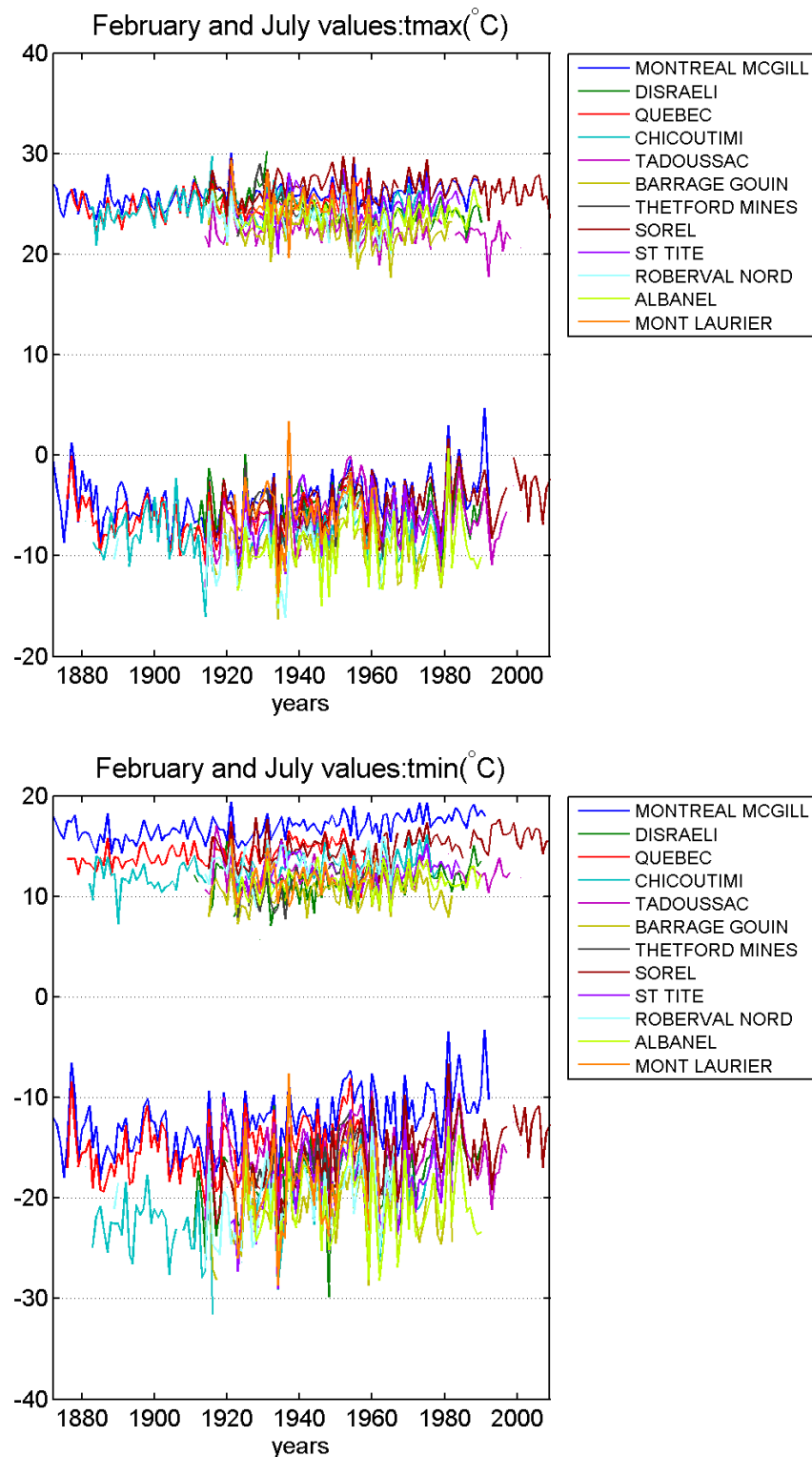


FIGURE 4.27: Séries temporelles de stations dans la région "sud" pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

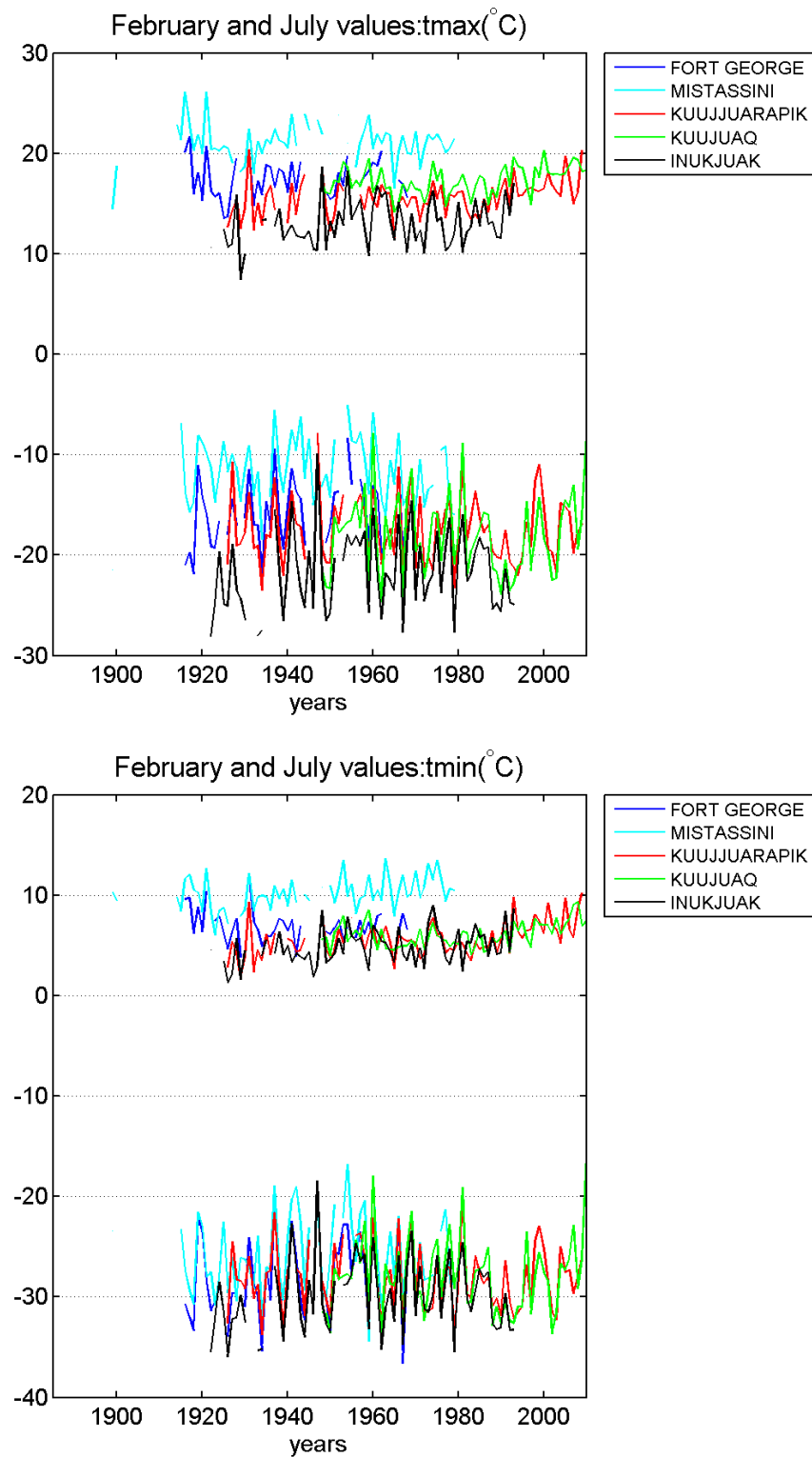


FIGURE 4.28: Séries temporelles de stations dans la région "nord" pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

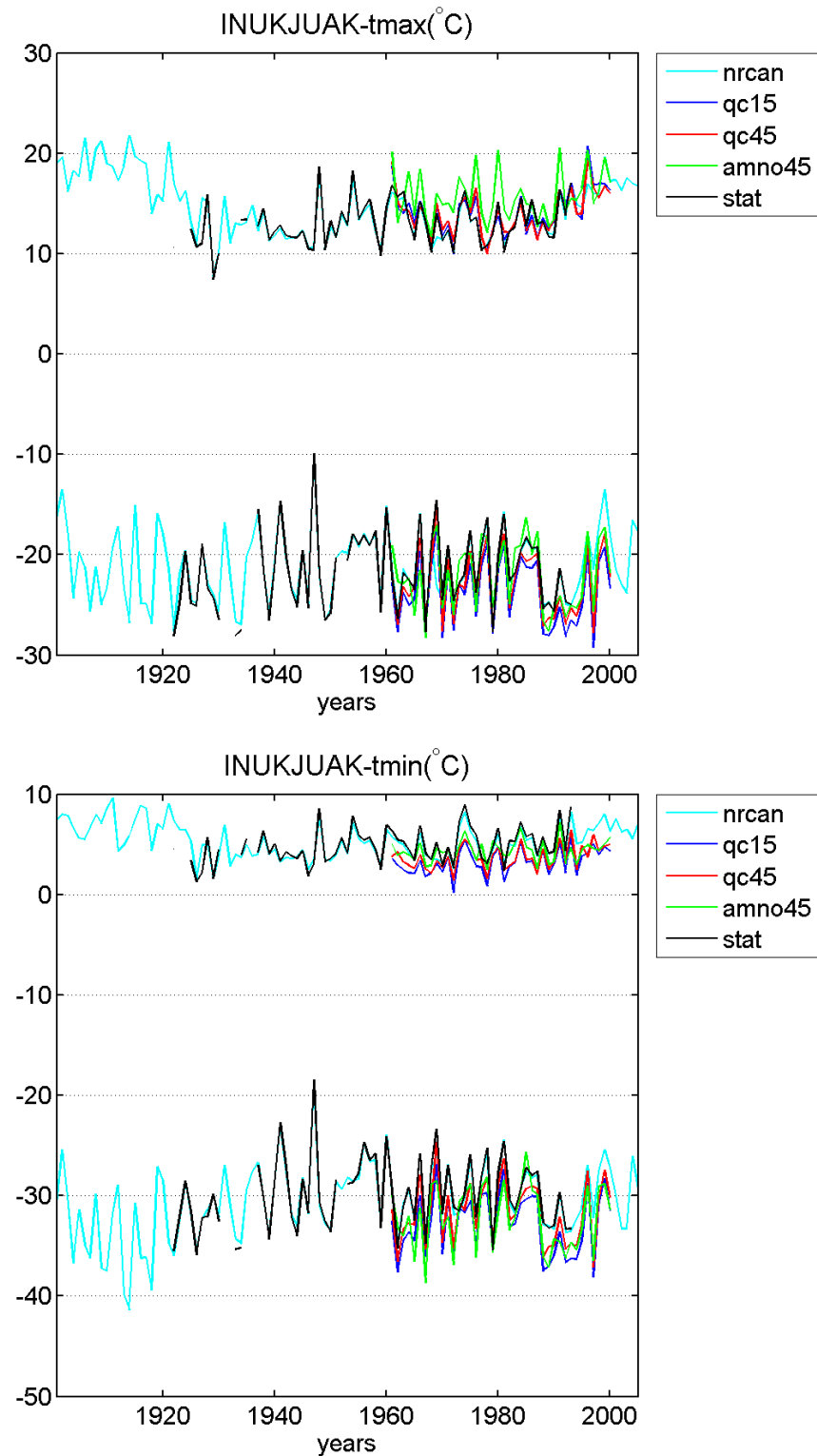


FIGURE 4.29: Séries temporelles de la station Inukjuak d'EC (stat) dans la région "nord", avec les données simulées par le modèle MRCC (qc15, qc45 et amno45) et les valeurs de NRCAN au point le plus proche de la station pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

Diable) pour la période commune à toutes les données (1961-2000). Pendant les années 1960 et 1970, on remarque que les valeurs des données de NRCAN ne sont pas plus près de celles de la station que celles des simulations du MRCC et ce, autant pour la température minimale (tmin) que maximale (tmax). Après cette période, la série de NRCAN s'approche de celle de la station, surtout pour la tmax. La tmin des 3 simulations du MRCC est trop basses en juillet la plupart du temps, mais elle n'est pas aussi basse que celle du NRCAN. Au contraire, la tmax du mois de juillet est trop élevée dans le modèle par rapport à la station et par rapport à NRCAN.

Le modèle a généralement un biais par rapport à la station ; soit froid ou chaud dépendant de la variable, du mois et de la simulation considérée. Néanmoins, le MRCC simule bien la variabilité inter-annuelle observée aux stations des deux réseaux (EC et RTA). Ceci est surtout vrai pour les deux simulations produites sur le domaine du Québec : qc15 et qc45. Quant au NRCAN, il ne suit pas exactement les séries temporelles des stations de RTA, surtout dans le cas de la température minimale au mois de février. De plus, pour certaines stations et pour certaines variables, le NRCAN a un biais par rapport à la station pour toute la période étudiée. Par exemple, pour la station Chute du Diable, (figure 4.31) en juillet, la température minimale du NRCAN est toujours inférieure que celle de la station et elle est également plus basse que celles des simulations du MRCC pendant les années 1960, 1970 jusqu'à la mi-1980. Ainsi, même pour une région relativement bien couverte par des stations, cette analyse démontre la difficulté de suivre les séries temporelles aux stations pour un produit tel que les données interpolées sur grille de NRCAN. Encore, pour quelques stations de RTA ayant les séries plus longues, le biais du NRCAN est particulièrement important vers le début de la série temporelle, et il diminue quand on s'approche des années actuelles. Ceci peut être expliqué par le fait que le nombre de stations augmente à partir des années 1960 pour atteindre le maximum vers la fin des années 1970, permettant aux données NRCAN de tenir compte de plus d'informations pendant cette période. Donc, au nord du Québec, où il y a peu de stations, on peut s'attendre à ce que les données sur grille de NRCAN contiennent des biais importants (et qui pourraient devenir plus grands que ceux du MRCC).

4.6 Validation de la simulation qc15 : la neige

Les variables étudiées ici sont l'équivalent en eau de la neige (EEN ou "snow water equivalent", swe en anglais) et la hauteur de neige (HN ou "snow depth", sd en anglais). Ces variables simulées par la qc15 du MRCC ont été validées par comparaison avec les réanalyses de Brown et al. (2003). La hauteur de neige est analysée en comparant les valeurs des simulations du MRCC à 15km et à 45km de résolution (qc15, qc45, amno45) aux valeurs observées aux stations situées au Nord du Québec.

4.6.1 Équivalent en eau de la neige : qc15 versus réanalyses Brown et al. (2003)

La plus grande différence entre la simulation qc15 du MRCC et les données de Brown et al. (2003) est observée au printemps (MAM) quand l'équivalent en eau de la neige atteint sa valeur

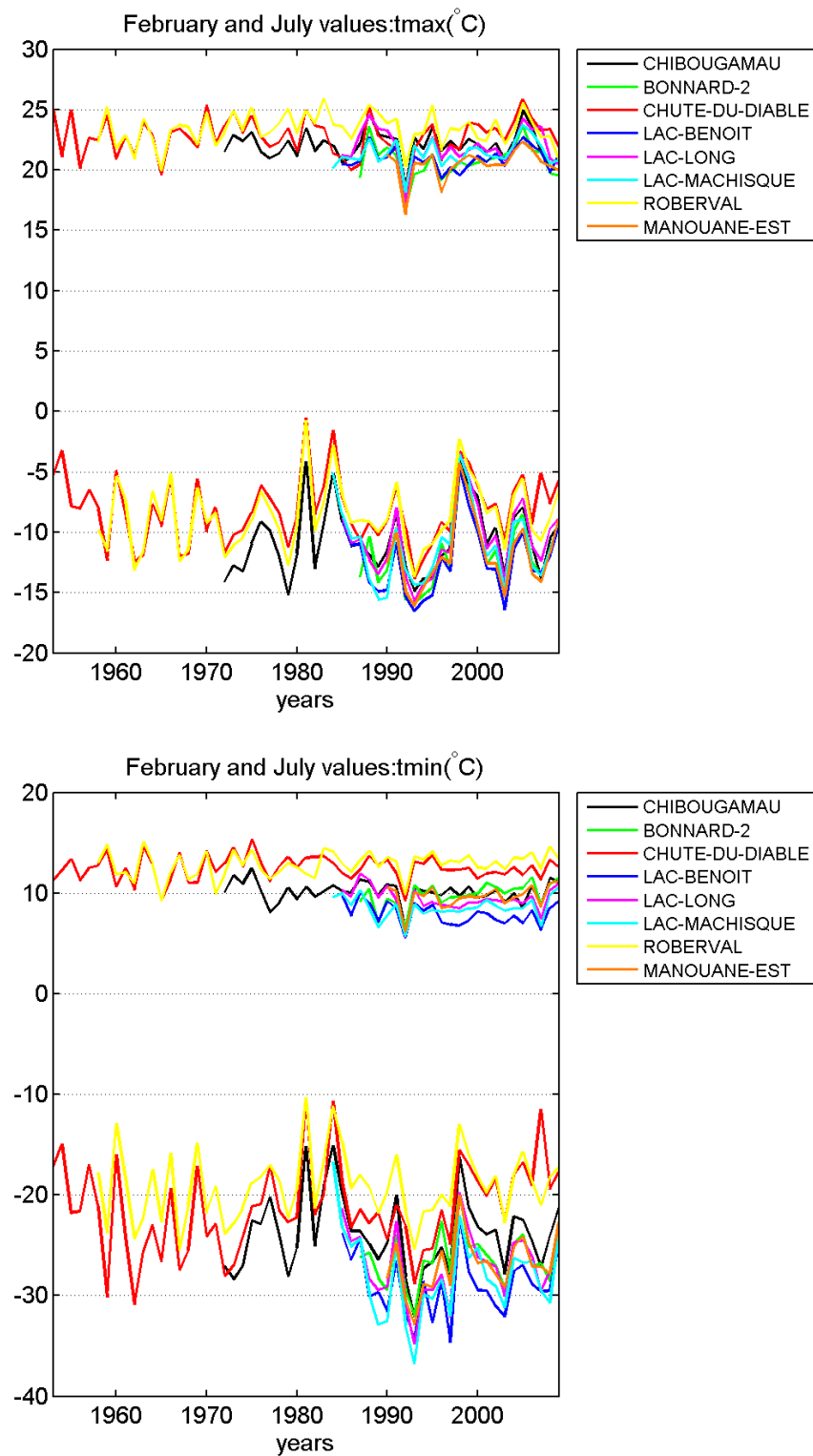


FIGURE 4.30: Séries temporelles de stations du réseau RTA pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

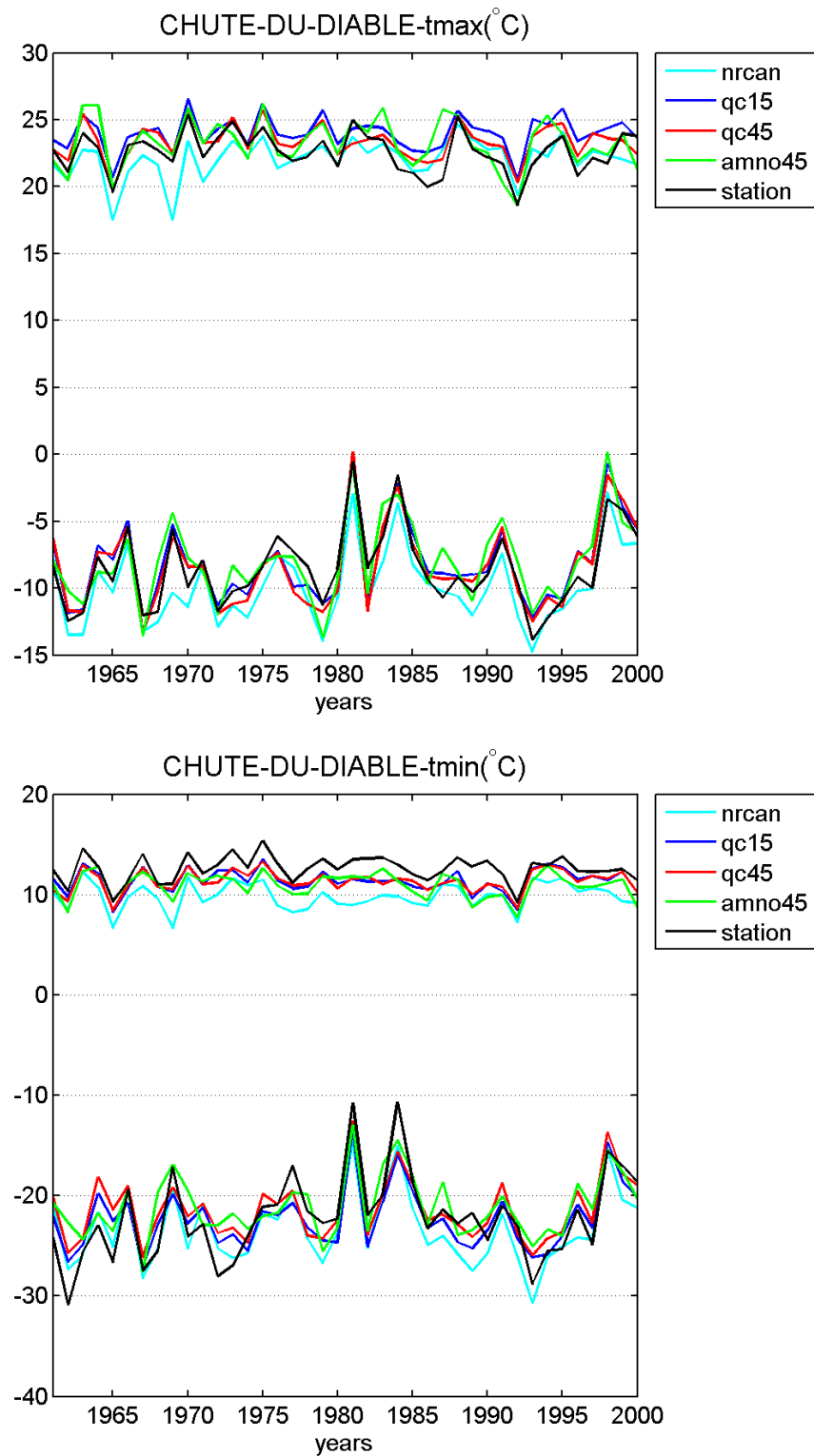


FIGURE 4.31: Séries temporelles de la station Chute du Diable du réseau RTA, avec les données simulées par le modèle MRCC (qc15, qc45 et amno45) et les valeurs de NRCAN au point le plus proche de la station pour la température maximale et minimale mensuelle au mois de février et de juillet.

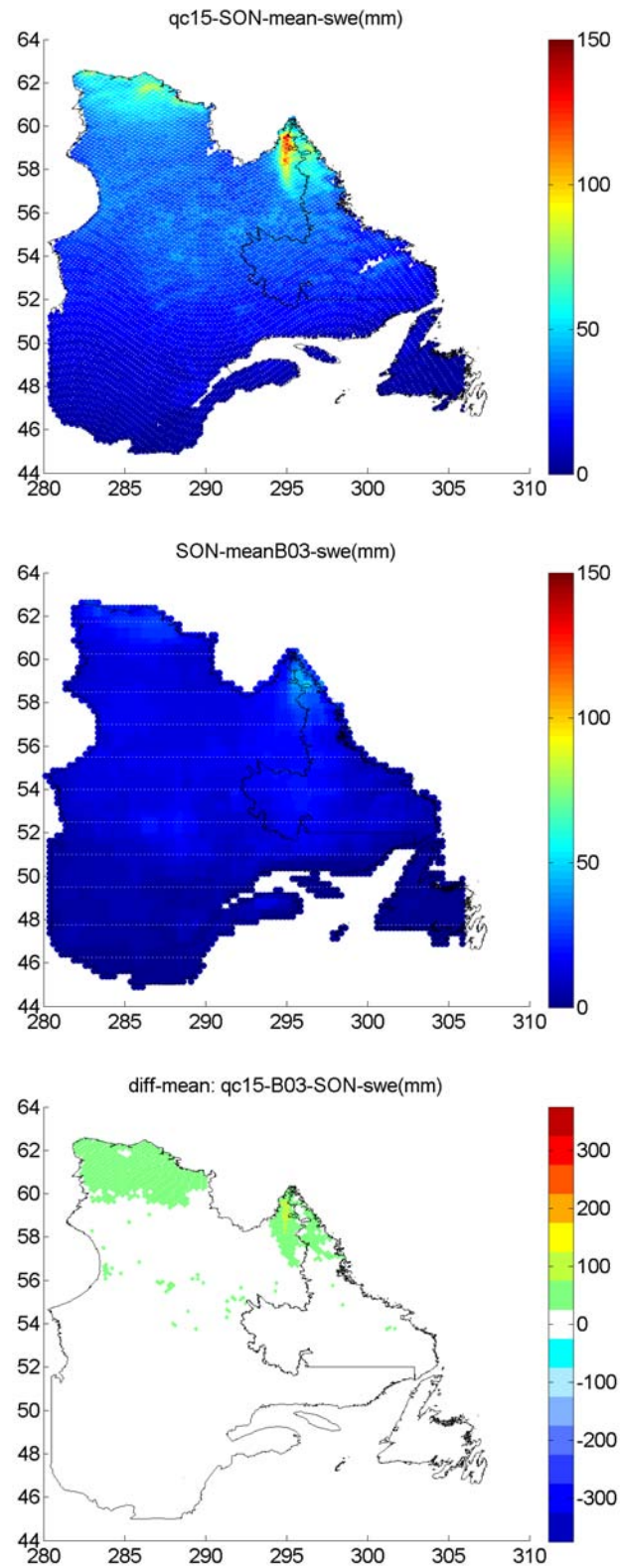


FIGURE 4.32: Équivalent en eau de la neige moyenné pour la période 1979-1997 pour la saison d'automne : simulé par la qc15 du MRCC (en haut), par Brown et al. (2003) (au centre), et la différence entre ces deux bases de données (en bas).

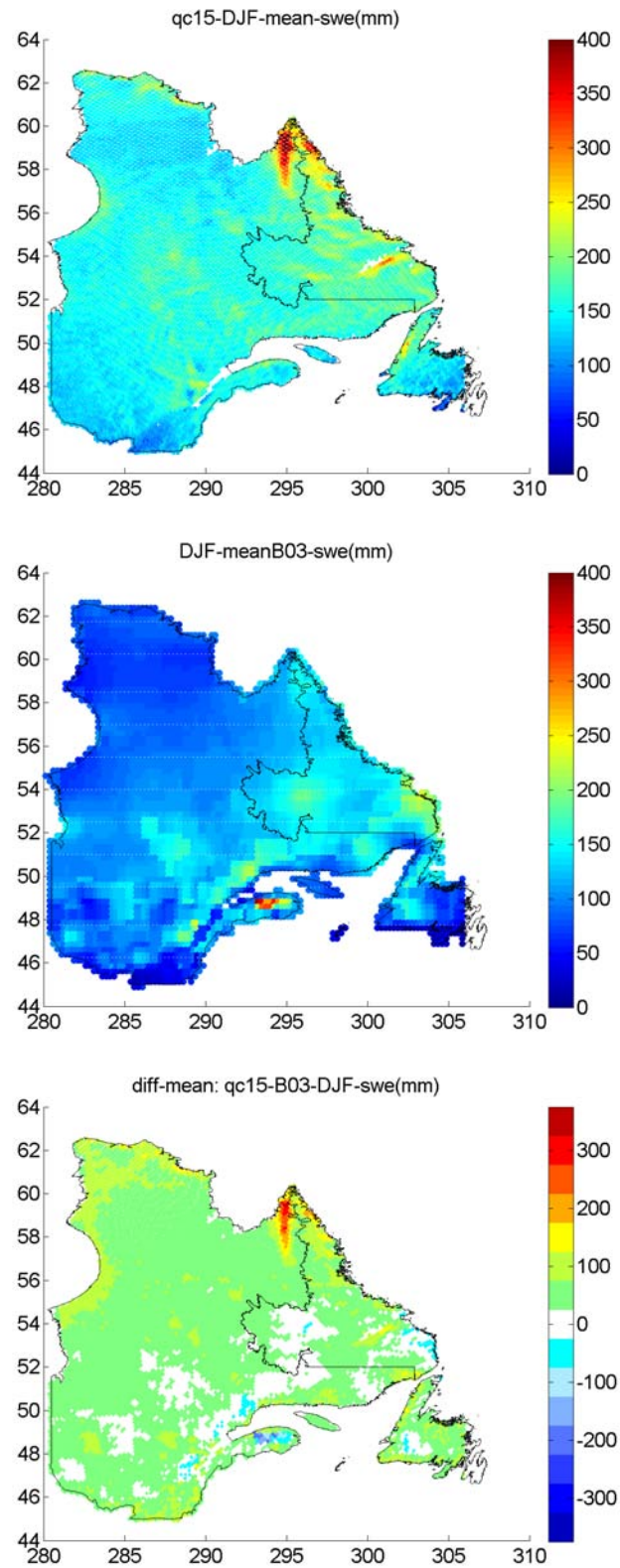


FIGURE 4.33: Équivalent en eau de la neige moyenné pour la période 1979-1997 pour la saison d'hiver : simulé par la qc15 du MRCC (en haut), par Brown et al. (2003) (au centre), et la différence entre ces deux bases de données (en bas).

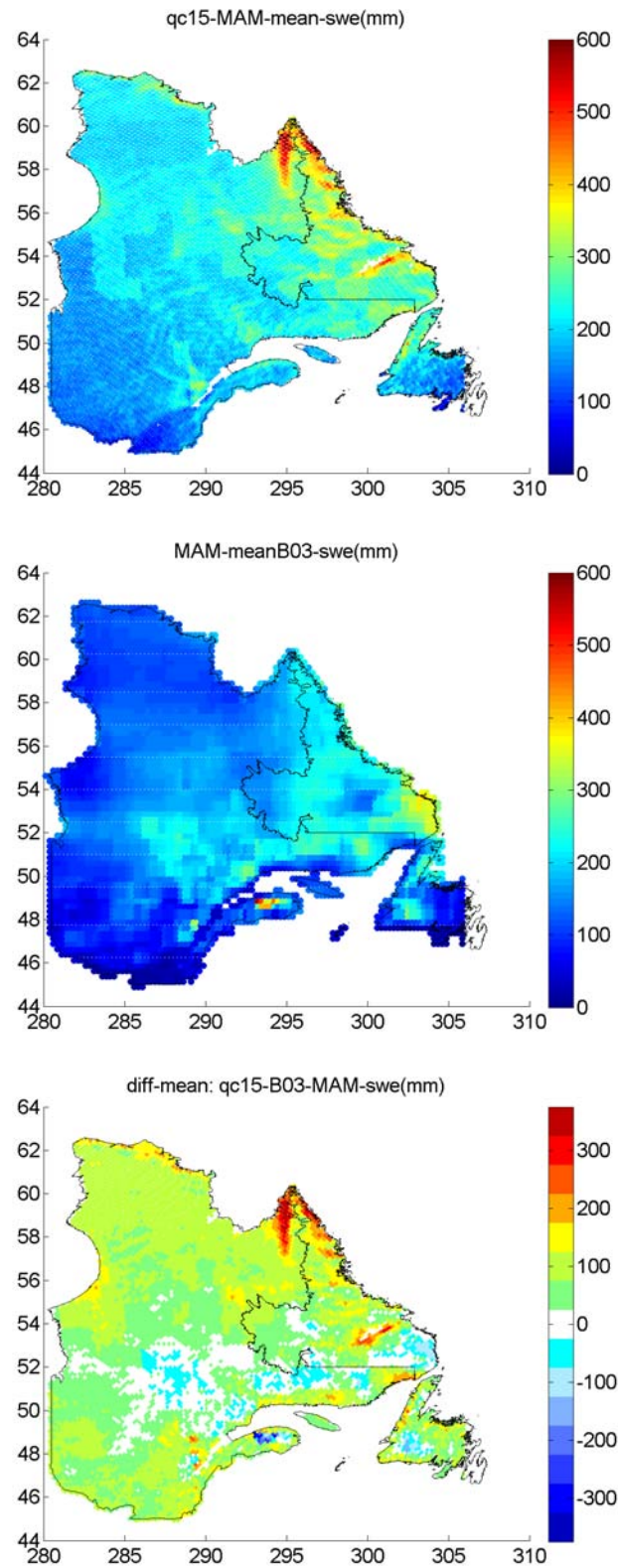


FIGURE 4.34: Équivalent en eau de la neige moyenné pour la période 1979-1997 pour la saison de printemps : simulé par la qc15 du MRCC (en haut), par Brown et al. (2003) (au centre), et la différence entre ces deux bases de données (en bas).

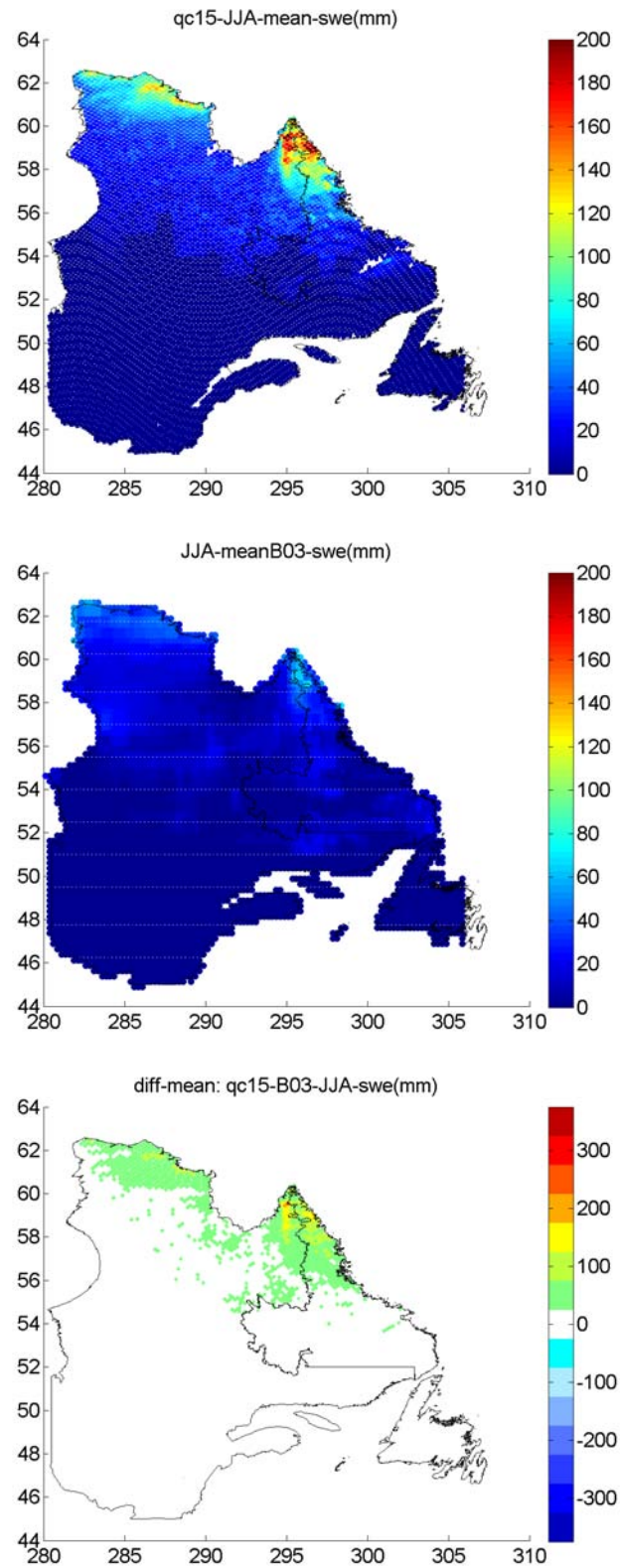


FIGURE 4.35: Équivalent en eau de la neige moyenné pour la période 1979-1997 pour la saison d'été : simulé par la qc15 du MRCC (en haut), par Brown et al. (2003) (au centre), et la différence entre ces deux bases de données (en bas).

maximale. En général, le modèle produit plus de EEN que les observations, surtout au nord du Québec : autour de la Péninsule d'Ungava et près des montagnes Torngat. Par contre, le modèle simule une quantité de neige beaucoup moins importante que ce qui est observée au-dessus des Monts Chic-Chocs en Gaspésie. Le même comportement au-dessus des Chic-Chocs est diagnostiqué pour les simulations du MRCC avec la résolution plus grossière, soit les qc45 et amno45.

Nous avons noté que le modèle simule aussi une importante quantité de neige dans la vallée du Saint-Laurent, particulièrement pendant les mois de février et de mars. Ceci est probablement un résultat de la surestimation générale de la quantité de la précipitation observée dans cette région pour la saison d'hiver et de printemps (figures 4.13 et 4.14).

4.6.2 La neige au sol : qc15 versus stations

Les figures 4.37 et 4.39 montrent la hauteur de neige mesurée aux quatre stations météorologiques d'EC (Kuujjuarapik, Kuujuaq, Natashquan et Fermont), les valeurs simulées par le MRCC (qc15, qc45 et amno45), ainsi que les valeurs de hauteur de neige obtenues par Brown et al. (2003) pour la période 1979-1997. On voit que, comparé aux observations aux stations, le modèle commence à accumuler la neige au sol plus tôt en automne, et que sa fonte de neige débute plus tard au printemps. Ceci fait en sorte que la période de couverture de neige continue est plus longue dans le modèle que celle qui est observée. De plus, la hauteur de neige du MRCC est plus grande que celle qui est mesurée à la station et que celle de Brown et al. (2003). D'ailleurs, le modèle ne simule pas toujours le maximum de la hauteur de neige au bon moment. Par exemple, les deux simulations sur le domaine du Québec (qc15, qc45) produisent la hauteur maximale de neige en avril alors qu'elle est observé en mars pour la station Kuujjuarapik (figure 4.37), par exemple.

Afin de comprendre pourquoi la période d'enneigement est plus longue dans le modèle qu'en réalité, nous avons comparé le cycle annuel de la température moyenne obtenu par les 3 simulations du MRCC à ce qui est mesuré aux 4 stations étudiées (figures 4.38 et 4.40). En général, les trois simulations sont plus froides que les stations à l'automne et atteignent donc le zéro degrés Celsius plus tôt que les stations. Étant donné que le MRCC produit de la précipitation sous forme de neige lorsque la température de l'air passe sous zéro, ce comportement des températures simulées cause l'accumulation hâtive de la neige au début de la saison. De plus, les simulations sur le domaine du Québec sont, en général, plus froides que les observations au printemps, ce qui explique la fonte tardive simulée par le MRCC (qc15 et qc45).

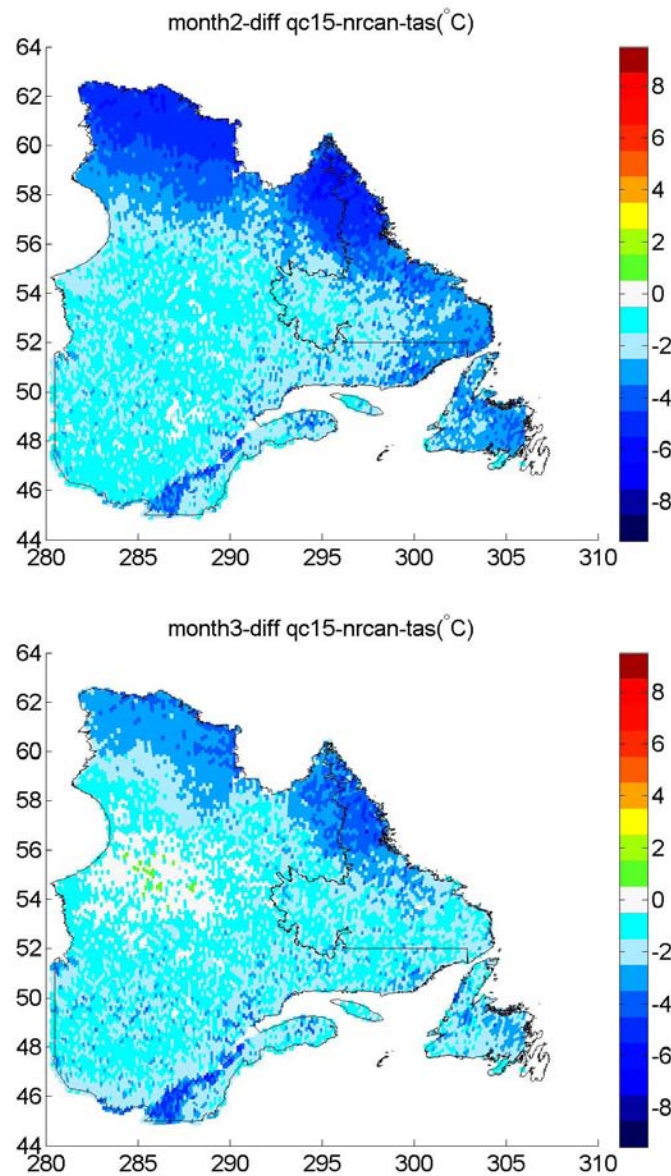


FIGURE 4.36: Différence de la température moyenne simulée par qc15 du MRCC et celle des observations sur grille NRCAN pour les mois de février (en haut) et de mars (en bas) pour la période 1979-1997 .

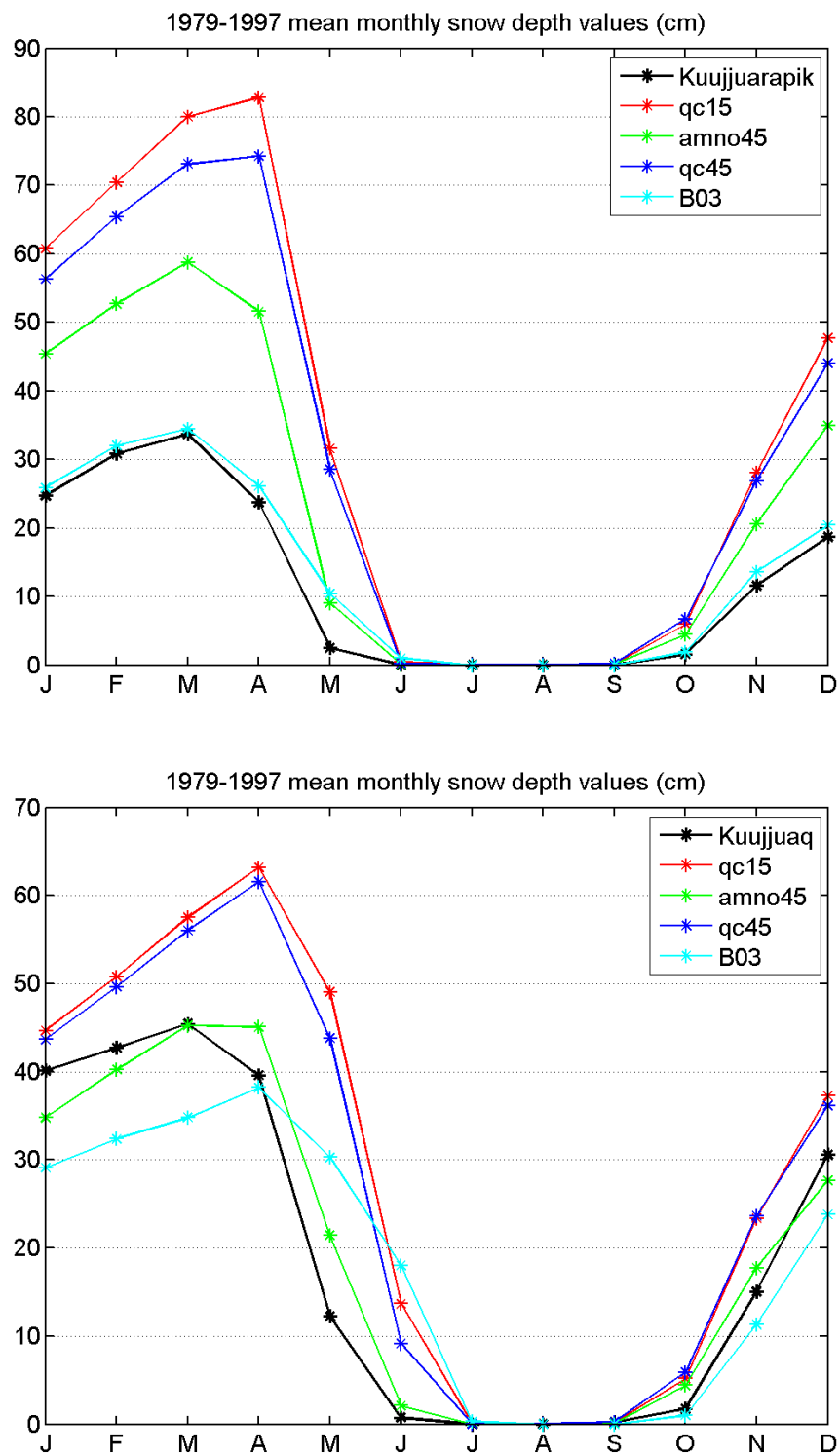


FIGURE 4.37: Hauteur de neige simulée par le modèle MRCC (qc15, qc45 et amno45) comparée aux réanalyses de Brown et al. (2003) et aux stations météorologiques indiquées dans la légende pour la période 1979-1997.

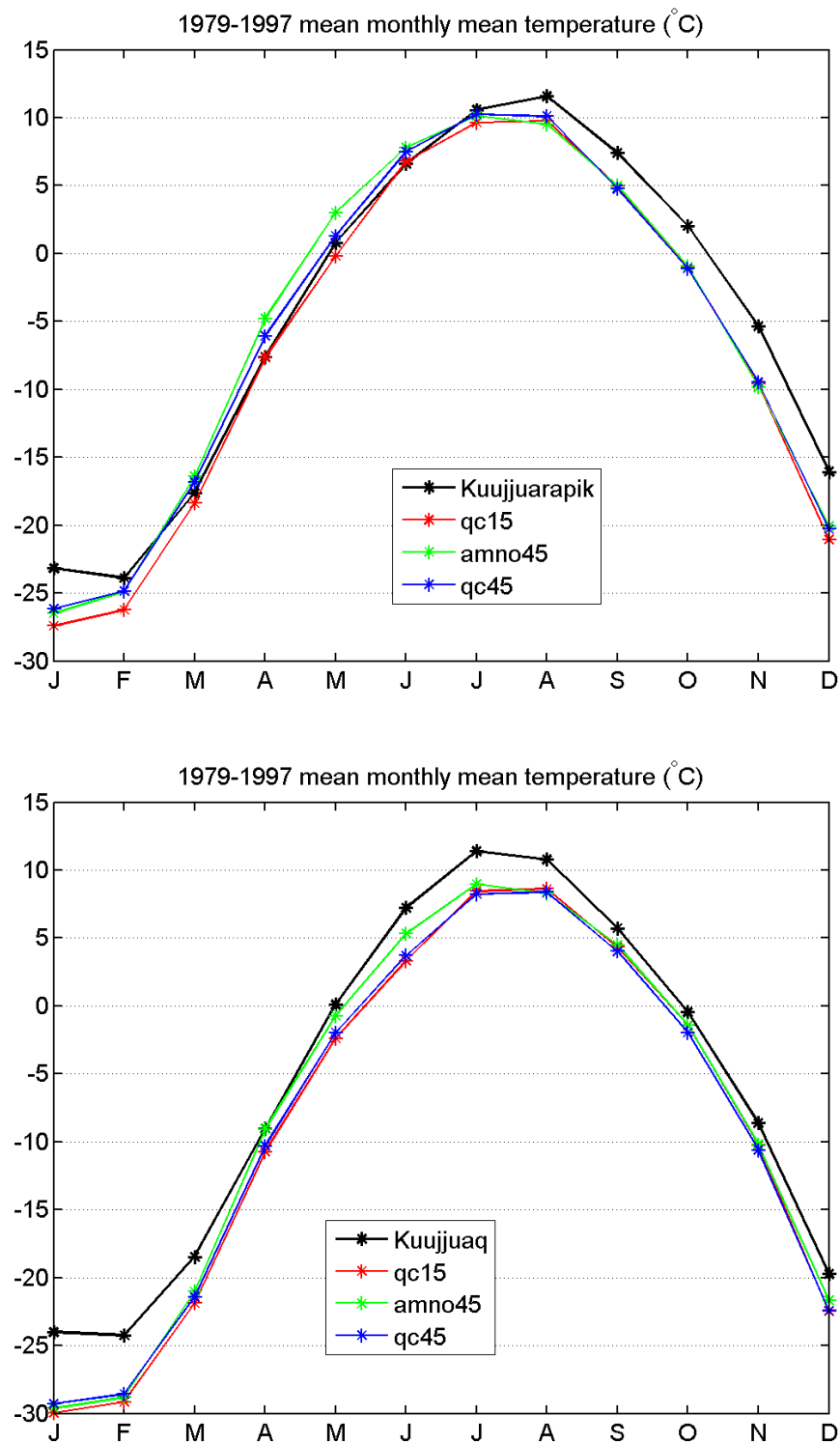


FIGURE 4.38: Température moyenne simulée par le modèle MRCC (qc15, qc45 et amno45) comparée aux stations météorologiques pour la période 1979-1997.

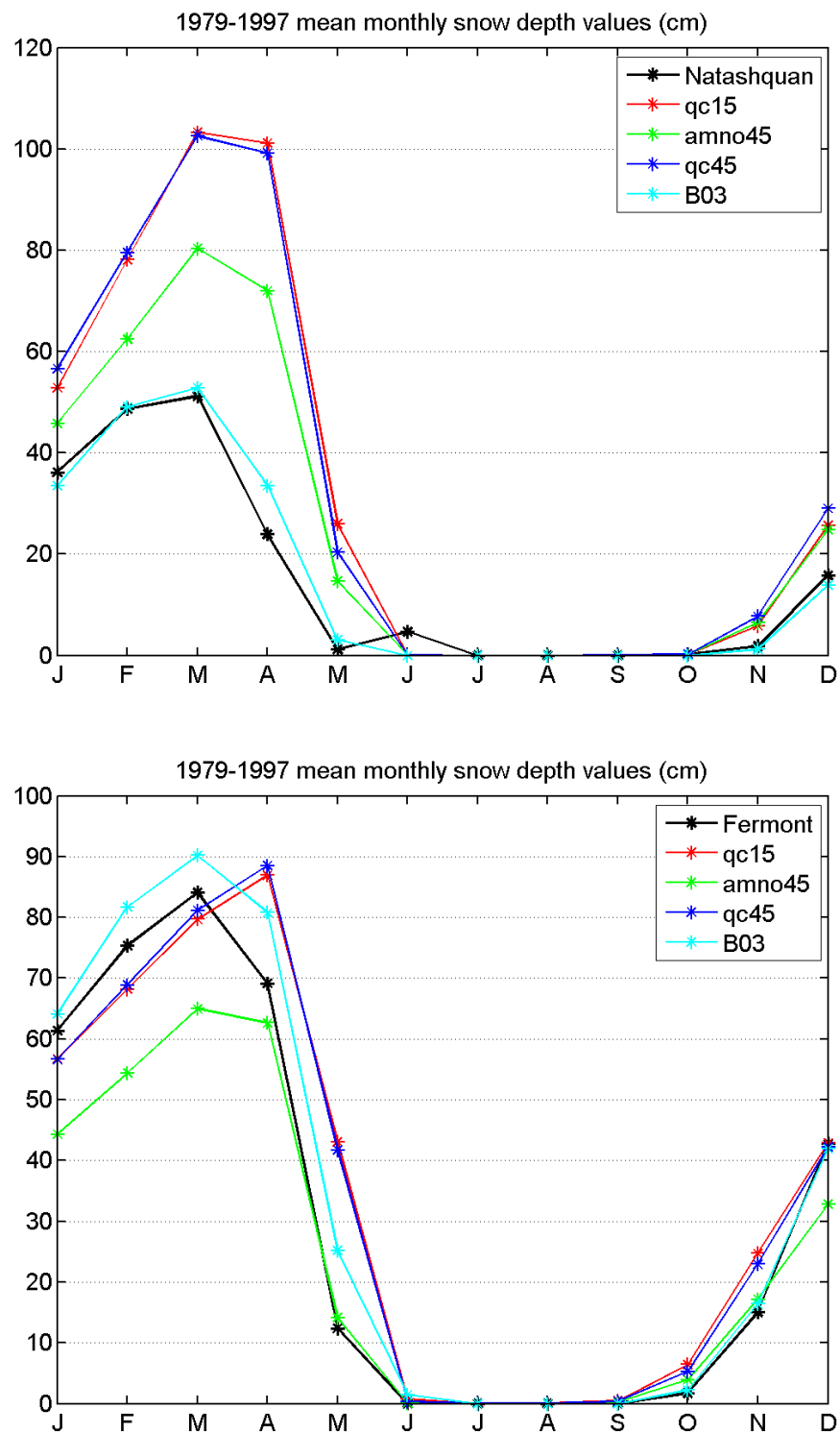


FIGURE 4.39: Hauteur de neige simulée par le modèle MRCC (qc15, qc45 et amno45) comparée aux réanalyses de Brown et al. (2003) et aux stations météorologiques pour la période 1979-1997.

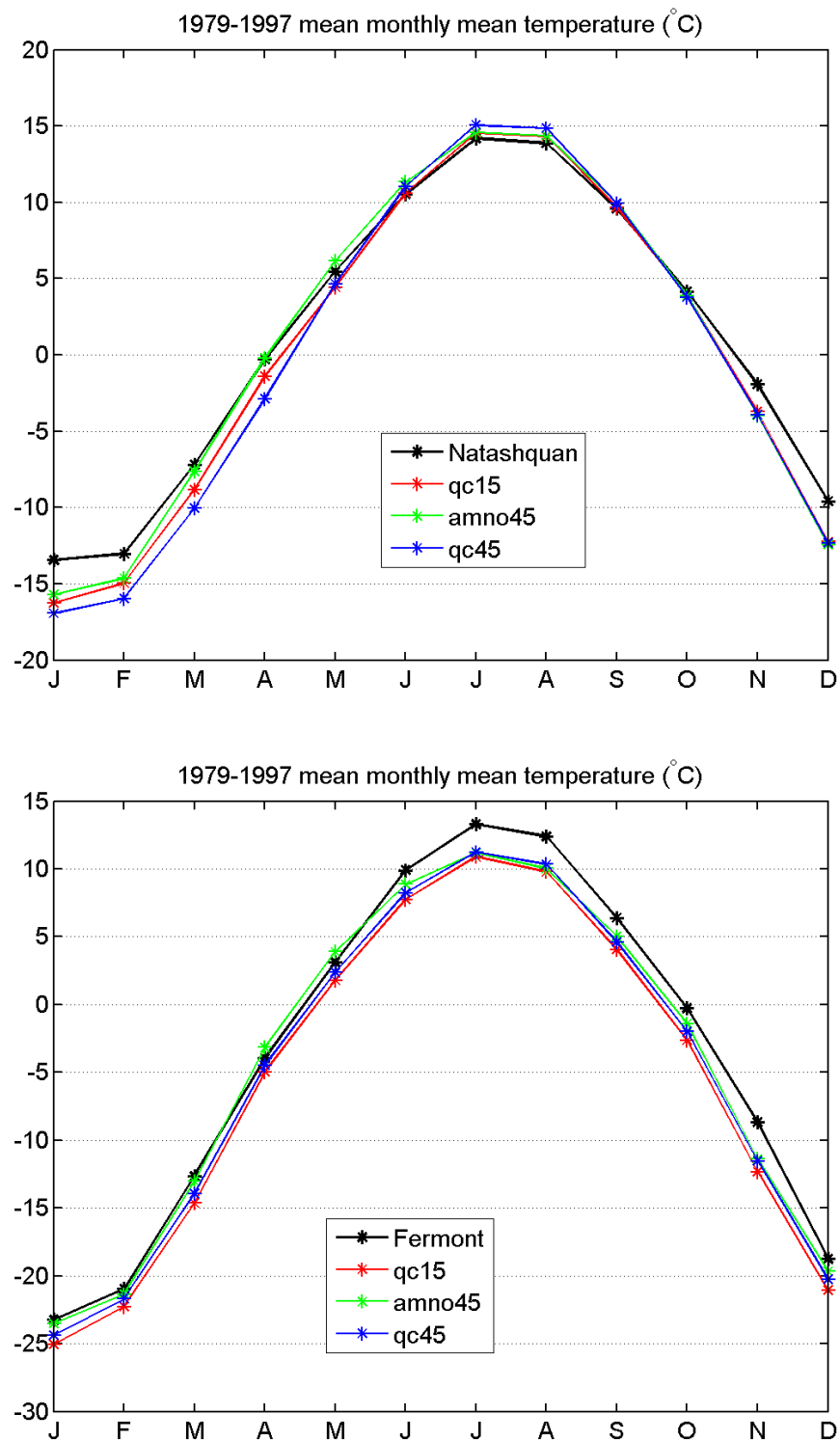


FIGURE 4.40: Température moyenne simulée par le modèle MRCC (qc15, qc45 et amno45) comparée aux stations météorologiques pour la période 1979-1997.

Indices bioclimatiques : climat présent

Les scientifiques prévoient que les changements climatiques seront une des menaces principales pour la biodiversité au cours de 21^{ème} siècle (Dawson et al. (2011)). À cause des changements climatiques, l'aire de distribution de plusieurs espèces ayant une niche climatique étroite devrait diminuer et plusieurs espèces devront migrer vers le nord ou en altitude (Chen et al. (2011)). Certaines espèces vont même disparaître à cause de la réduction des habitats et/ou l'invasion d'espèces exotiques plus compétitives, prédatrices, ou bien vectrices de maladies (Maclean and Wilson (2011)). Aussi, les changements climatiques impliqueront un changement dans le cycle des feux de forêt, où l'on prévoit une augmentation de la fréquence et de la taille des feux de forêt (Flannigan et al. (2009), Flannigan et al. (2001)), ce qui devrait affecter fortement la diversité biologique en écosystèmes forestiers. Une autre conséquence des changements climatiques dans les écosystèmes forestiers est un changement graduel dans la composition et dans la structure des forêts (Schenk (1996)). Ces changements se feront entre autres via une mortalité ciblée de certaines espèces intolérantes aux températures élevées et à la sécheresse (Allen et al. (2010)), à la migration des espèces (Iverson and Prasad (2001), McKenney et al. (2007)), ainsi qu'à l'augmentation de la productivité primaire (Sturm et al. (2001)). Les changements anticipés dans les peuplements forestiers ou arbustifs auront aussi des impacts directs sur plusieurs espèces animales qui utilisent la végétation comme habitat d'alimentation, de reproduction ou bien comme abris contre les prédateurs. Afin de faire face aux changements climatiques, il est nécessaire d'améliorer nos connaissances de leurs impacts sur les écosystèmes et sur la biodiversité. D'abord, il faut mieux connaître la relation entre le climat présent et les écosystèmes, en distinguant les relations essentiellement à l'équilibre des états transitoires succédant aux grandes perturbations (p.ex. feux de forêt, épidémie d'insectes ravageurs). Une bonne connaissance des relations écosystème-climat est donc primordiale pour prédire comment les écosystèmes vont réagir aux changements climatiques anticipés.

Les indices bioclimatiques permettent de déterminer les conditions climatiques qui influencent les phénomènes biologiques. Ces indices sont calculés à partir des variables climatiques principales, soient la température et la précipitation. Ils décrivent certains mécanismes reliant les conditions climatiques aux différentes étapes du développement phénologique de végétaux. Certains de ces

indices correspondent aux conditions stressants pour la faune et la flore ; par exemple à la sécheresse et aux températures extrêmes.

Nous avons calculé plusieurs indices bioclimatiques considérés pertinents pour les écosystèmes nordiques :

- Longueur de la saison de croissance
- Degrés-jours de la saison de croissance
- Longueur de la saison de dormance
- Degrés-jours de la saison de dormance
- Événements de gel-dégel
- Extrêmes de la température
- Degrés-jours de températures extrêmes
- Période d'endurcissement
- Période de désendurcissement
- Saisonnalité de la température
- Saisonnalité de la précipitation
- Évapotranspiration potentielle
- Budget hydrique
- Longueur de la période nivale
- Jours consécutifs sans précipitation ¹

Dans ce chapitre, nous discutons brièvement de la pertinence écologique de chaque indice puis nous décrivons les normales climatiques de ces indices calculées pour la période de référence de 1961-2000 à partir du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) à 15 km de résolution horizontale. Notez que ces résultats sont fournis à titre exploratoire aux partenaires de l'Atlas de la biodiversité nordique.

5.1 Saison de croissance

La croissance des plantes est essentiellement limitée à des températures supérieures à 0°C. Néanmoins, il y a une grande variation interspécifique dans l'influence de la température sur la croissance des plantes. Par exemple, les saules (*Salix* spp.) réagissent beaucoup plus rapidement que les mélèzes (*Larix* spp.) aux températures positives (Knorre et al. (2006)). Donc, la définition du seuil qui représenterait la température à la quelle les plantes commence à croître est fortement dépendante de l'espèce d'intérêt. Dans notre étude, nous avons employé deux seuils différents de température :

- un de 5°C qui est représentatif pour les écosystèmes forestiers (Logan et al. (2011)),
- et l'autre de 0°C qui est plus pertinent pour la toundra arbustives.

1. Cet indices a été ajouté vers la fin du projet, donc, une analyse détaillée de ses normales climatiques n'a pas été faite.

Le début de la saison de croissance est définie comme le premier jour quand la température moyenne atteint la température du seuil pendant 5 jours consécutifs. La fin de la saison de croissance est définie comme le dernier parmi 5 jours consécutifs ayant la température moyenne supérieure à la température du seuil. La période entre le début et la fin de la saison de croissance représente la longueur de la saison de croissance. Dans l'analyse qui suit, les deux saisons de croissance définies pour les seuils de 5 et 0°C seront appelées : SC_5 et SC_0 respectivement.

Ces deux saisons de croissance sont montrées sur la figure 5.1. On remarque que la longueur de la saison de croissance est négativement corrélée avec la latitude et l'élévation (e.g. au-dessus du Massif de Charlevoix ou au-dessus des Montagnes Torngat). Si on regarde la figure 5.2, qui montre les valeurs de la température (moyenne (t_{mean}), maximale (t_{max}) et minimale (t_{min})) durant la saison de croissance SC_5 , on remarque que la température moyenne est plus basse que 5°C au-dessus de la Péninsule d'Ungava et de Montagnes Torngats, même que la SC_5 a la longueur minimale d'environ 30 jours pour cette région. C'est-à-dire, qu'il devrait exister au moins 30 jours avec la température moyenne plus élevée que 5°C. Le problème est que la température moyenne pendant cette période de l'année est proche de 5°C et donc, la moyenne durant la saison de croissance est plus petite que la température du seuil. Pour cette raison, la définition de la longueur de la saison de croissance employée ici n'est pas appropriée pour les régions les plus au nord. Par conséquent, le seuil de 0°C est utilisé pour les régions le plus au nord du Québec. On peut voir (figure 5.3) que la température moyenne durant SC_0 est toujours supérieure que 0°C au-dessus du domaine au complet.

La précipitation totale moyenne pour la période 1961-2000 durant la saison de croissance est montrée sur la figure 5.4.

5.1.1 Degrés-jours de croissance

Le nombre de degrés-jours de croissance a été calculé pour les deux saisons de croissances définies auparavant. Ce nombre représente la somme des valeurs journalières définies de la façon suivante :

$$DJ(j) = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \quad (5.1)$$

et

$$DJ(j) = 0$$

si

$$\frac{T_{max} + T_{min}}{2} < T_{base}$$

T_{max} et T_{min} sont la température journalière maximale et minimale respectivement. T_{base} représente la température de la base : les degrés-jours (DJ) sont accumulés pour une température supérieure à T_{base} . Pendant les deux saisons de croissance, SC_5 et SC_0 , nous avons calculé le nombre de degrés-jours pour les températures de base égale à 0°C, 5°C et 10°C (figures 5.5 et 5.6). Nous avons calculé les DJ selon trois valeurs de base afin de bien représenter la grande variation interspécifique dans l'influence de la température sur la croissance des plantes. L'agriculture utilise beaucoup les DJ pour prévoir les récoltes et le seuil le plus fréquemment utilisé pour les céréales et plantes

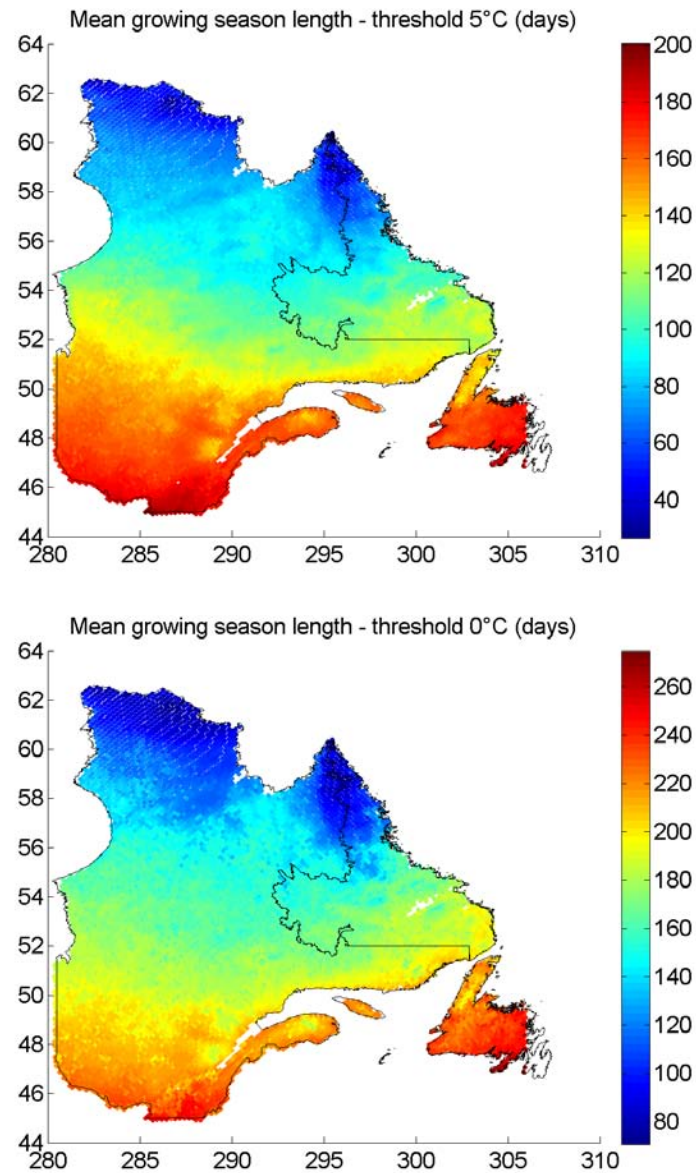


FIGURE 5.1: Normales climatiques de la longueur de la saisons de croissance calculée pour un seuil de 5°C et 0°C pour la période de référence (1961-2000) (en jours).

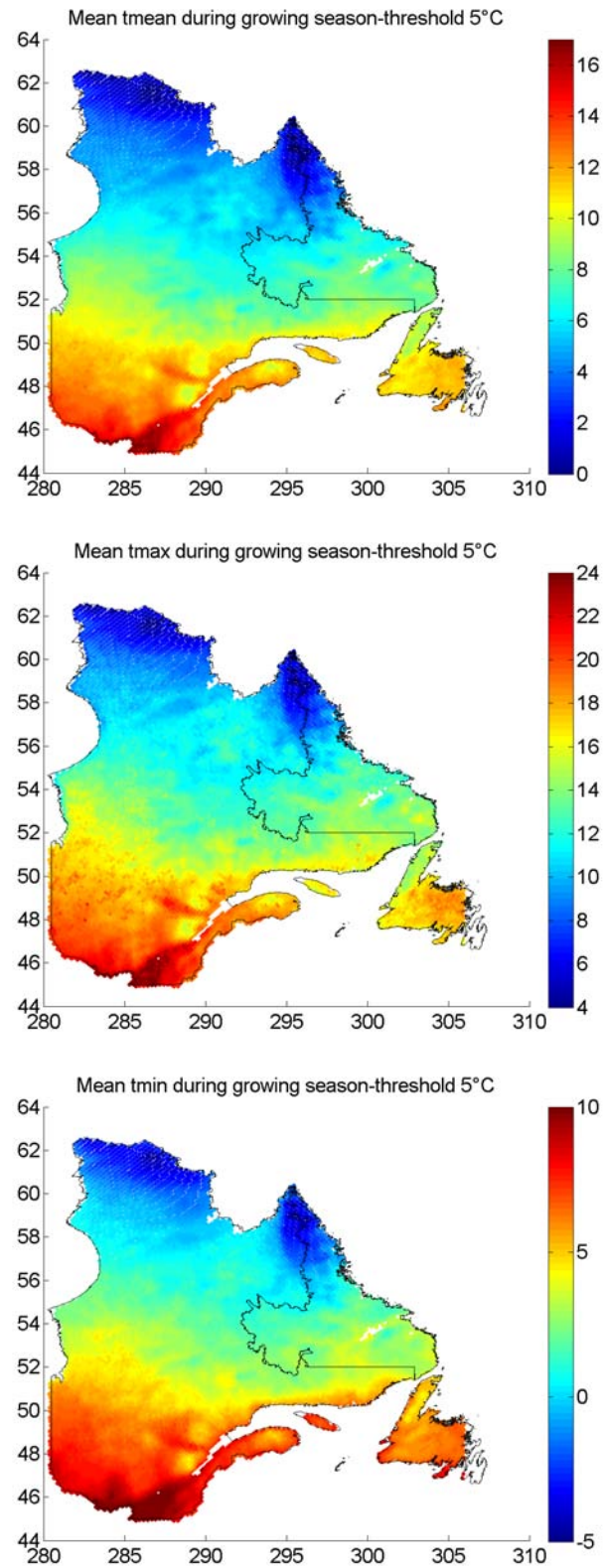


FIGURE 5.2: Normales climatiques de la température moyenne, maximale et minimale pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C pour la période de référence (1961-2000) (en °C).

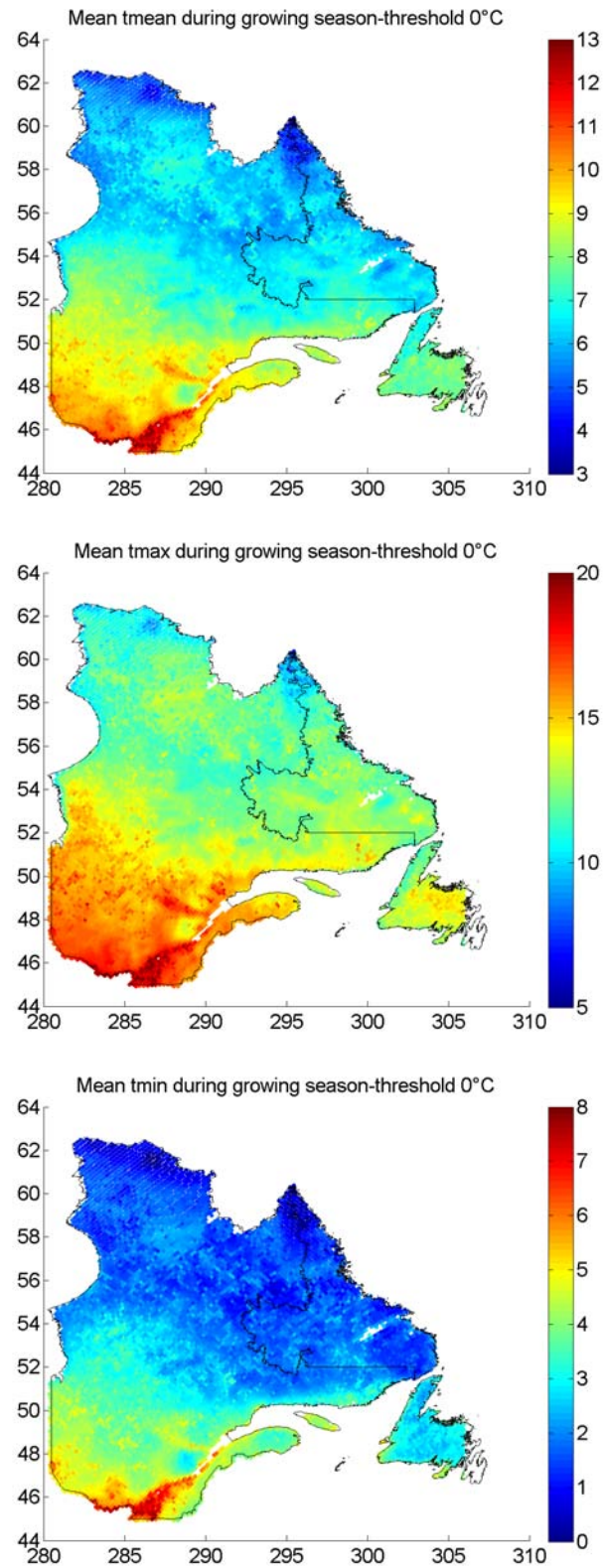


FIGURE 5.3: Normales climatiques de la température moyenne, maximale et minimale pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C pour la période de référence (1961-2000) (en °C).

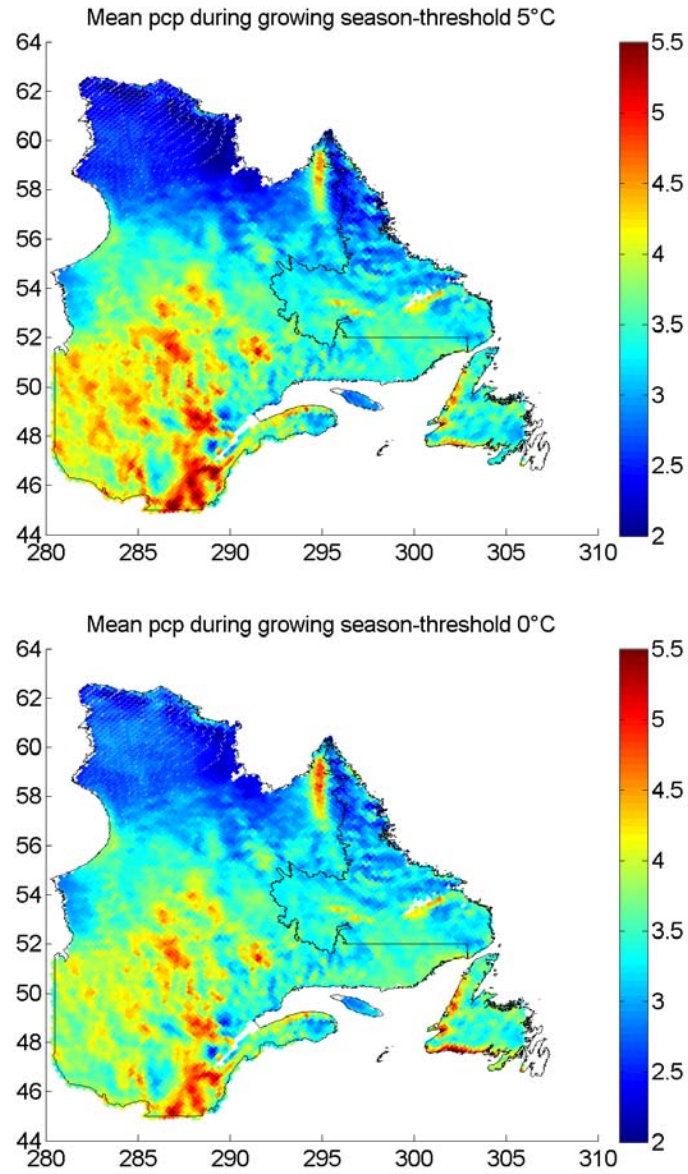


FIGURE 5.4: Normales climatiques de la précipitation pendant la saison de croissance définie pour un seuil de 5°C et 0°C pour la période de référence (1961-2000) (en mm/jour).

fourragères est de 5°C (Bootsma (1994)) quoique le seuil pour le blé soit à 0°C et celui pour le maïs à 10°C. Bien qu'il soit possible de déterminer empiriquement une valeur de seuil pour une espèce donnée, la grande diversité biologique sur le territoire d'étude requiert une approche plus générale à trois seuils. Pour la végétation nordique, les degrés-jours de croissance définis pour la température de base égale à 0°C sont probablement plus pertinents car les types de végétaux qui vivent au nord sont bien adaptés aux températures basses qui dominent ces régions. On voit bien sur les figures 5.6 et 5.5 que le nombre de degrés-jours diminue rapidement avec l'augmentation de seuil. Par exemple, pour la saison de croissance SC_5 , à la proximité de Natashquan, sur la Basse-Côte-Nord, pour la température de base de 0°C, nous avons environ 1700 degrés-jours, pour la base de 5°C, ce nombre diminue à environ 1000 et pour la base de 10°C, il est moins que 500. Ce signifie qu'une plante exigeant une température de 10°C pour un développement optimale, il y aura trois fois moins d'énergie disponible dans cette région que pour une autre plante qui peut croître efficacement à la température de 0°C.

5.1.2 Saison de dormance

La saison de dormance (SD) représente la période pendant laquelle les plantes se trouvent dans un état de repos. Elle est déclenché quand la température baisse et quand la photopériode (durée d'exposition à la lumière du jour) diminue. La dormance se manifeste par un quasi-arrêt ou ralentissement des phénomènes vitaux (Parent et al. (2000)). Pendant cette période les végétaux ont une plus grande résistance aux conditions ambiantes (par exemple, au froid). L'interruption ou "levée" de la dormance se fait sous l'effet d'augmentation de la température et de prolongement de l'exposition à la lumière.

La saison de dormance a été calculée comme suit :

$$SD = 365 - SC \quad (5.2)$$

où SC représente la saison de croissance et 365 est le nombre de jours dans une année. Étant donné que nous avons définie deux saisons de croissance, SC_5 et SC_0 , nous avons aussi calculé deux saisons de dormance correspondantes, SD_5 et SD_0 (figure 5.7).

Bien attendu, la saison de dormance montre une image "inverse" de la saison de croissance : elle est la plus longue au-dessus des régions les plus au nord et elle est la plus courte au sud du Québec. Il est important de fournir des variables climatiques sur les deux saisons puisque la faune et la flore nordique ont des stratégies particulières à chaque saison pour survivre. Par exemple, la température minimale peut être critique pour une plante lors de la saison de croissance (p.ex. par une destruction cellulaire due au gel) alors que la température maximale peut créer de la mortalité durant la dormance en réduisant la couverture nivale servant d'isolant thermique et de protection physique. Ainsi, des moyennes sur toute l'année peuvent cacher des événements climatiques limitant la présence et/ou l'abondance de certaines populations.

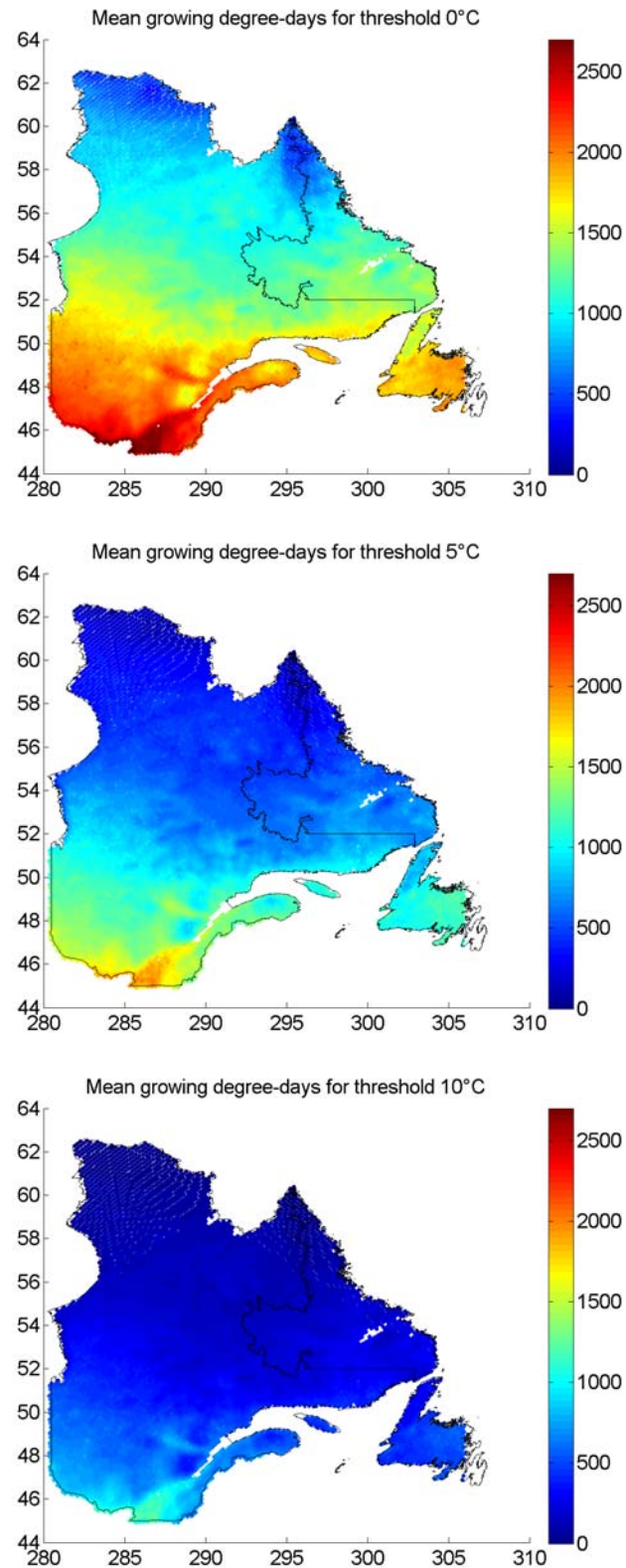


FIGURE 5.5: Normales climatiques du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 0°C, 5°C et 10°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C (période de référence (1961-2000) (en degrés-jours).

Final Version: 30 août 2012

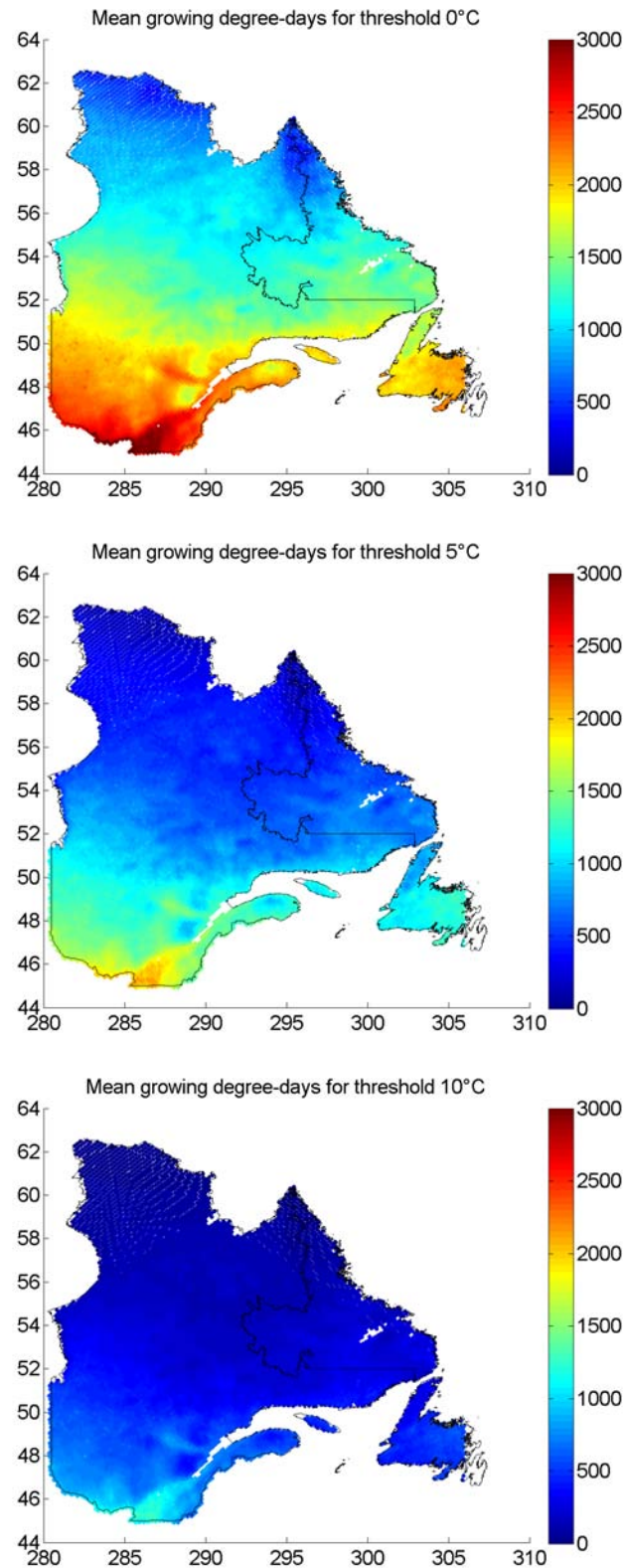


FIGURE 5.6: Normales climatiques du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 0°C, 5°C et 10°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C (période de référence (1961-2000) (en degrés-jours).

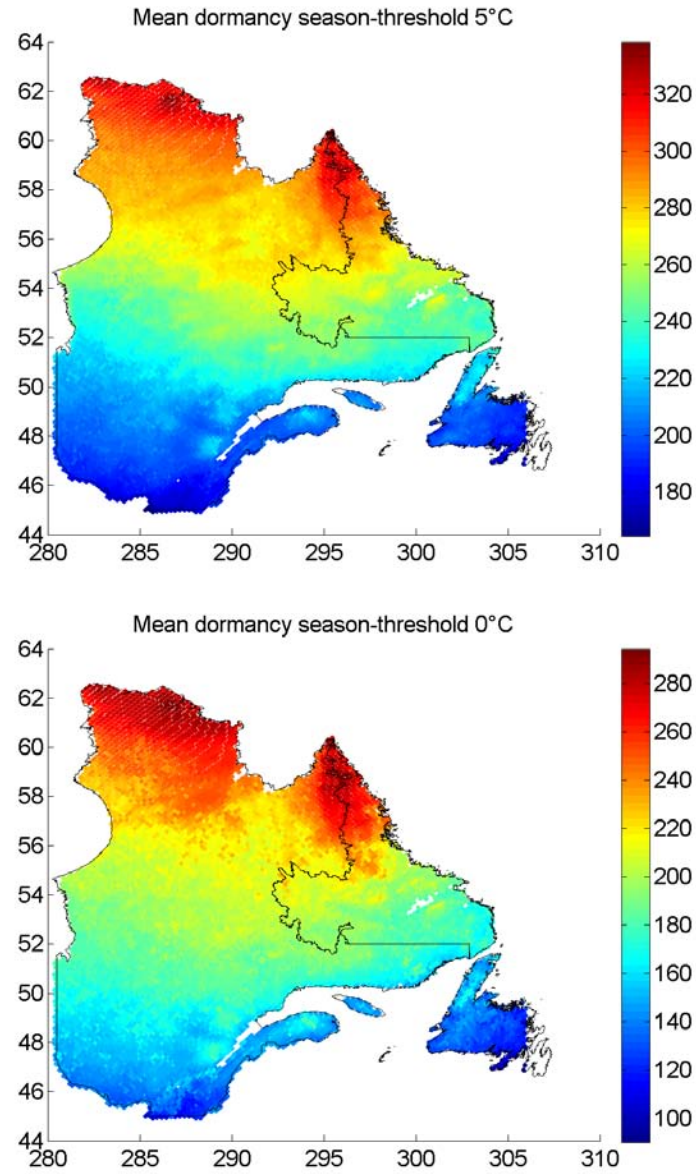


FIGURE 5.7: Normales climatiques de la longueur de la saison de dormance pour la période de référence (1961-2000) calculée pour un seuil de 5°C et 0°C (en jours).

5.2 Événements de gel-dégel

Un événement de gel-dégel se produit quand la température minimale est inférieure à 0°C et la température maximale pendant la même journée est supérieure à 0°C . Ces événements ont principalement des conséquences sur la résistance des végétaux au froid. Il est très importante que les plantes obtiennent et maintiennent une résistance au froid suffisante la fin de l'automne, pendant l'hiver et au printemps (Logan et al. (2011)). Une perte de la résistance au froid, surtout pendant la saison de dormance, peut engendrer une mortalité accrue chez certaines plantes. Un changement dans la fréquence d'événements de gel-dégel causé par les changements climatiques pourrait avoir des répercussions importantes sur les écosystèmes nordiques. En effet, la résistance au froid est très variables entre les taxa et les événements de gel-dégel pourraient changer les patrons d'abondance relative en augmentant la mortalité de certaines espèces peu tolérantes. Il faut aussi noter que les événements de gel-dégel sont très néfastes pour le caribou toundrique. Chaque événement de gel-dégel cause une couche de glace à la surface de la neige et l'accumulation de ces couches de glaces rend le déplacement et l'alimentation du caribou plus exigeant sur le plan énergétique.

Nous avons calculé les événements de gel-dégel pendant la saison d'hiver (DJF) et pendant le printemps (MAM) (figure 5.8). On peut voir que ces événements peuvent arriver jusqu'à 30-35 fois pendant l'hiver au sud du Québec. Plus au nord, ils deviennent moins fréquents à cause de température plus basse : de 15 à 20 événements par année sur la Côte-Nord, environ 10 à l'est de la Baie James et aucun événement dans la partie la plus nord du domaine. Par contre, au printemps, avec l'augmentation de la température, la fréquence d'occurrence augmente avec latitude et elle est maximale entre environ le 52°N et le 62°N .

5.3 Températures extrêmes

Les températures extrêmes – soit très élevées ou très basses - causent du stress aux plantes et peuvent les endommager et, selon la durée, peuvent même être létales. Il est donc particulièrement important de bien évaluer tant la fréquence que la durée d'un événement extrême. Par exemple, un épisode de température très basse peut être bien toléré par une espèce mais seulement pour une certaine période. Ainsi, la luzerne cultivée (*Medicago sativa* L.) peut subir les températures de -20°C à -26°C pendant quelques heures. Par contre, si la période d'exposition est de quelques jours, des températures de -8°C à -10°C peuvent créer des dommages tissulaires (Bélanger et al. (2002) ; Paquin (1984)).

Afin de couvrir la plage de températures extrêmes au-dessus de la région Québec-Labrador, nous avons définie trois extrêmes froids :

- $T_{min} < -30^{\circ}\text{C}$
- $T_{min} < -35^{\circ}\text{C}$
- $T_{min} < -40^{\circ}\text{C}$

et trois extrêmes chauds :

- $T_{max} > 20^{\circ}\text{C}$

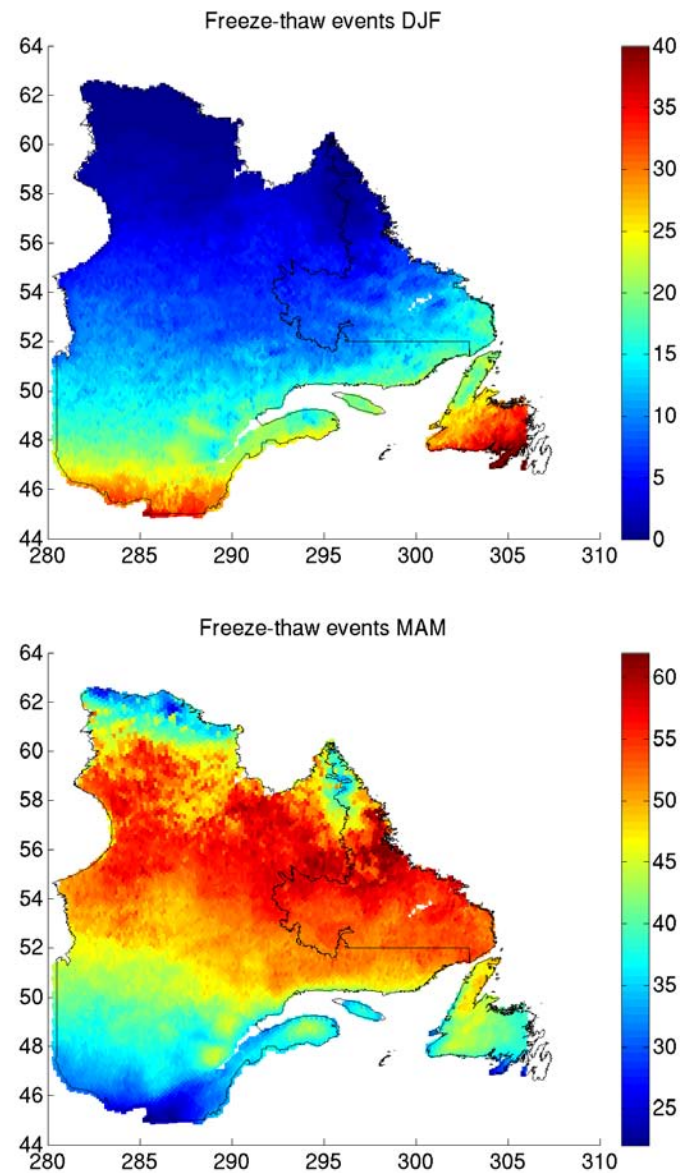


FIGURE 5.8: Normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel pour la période de référence (1961-2000) pendant la saison du printemps (MAM) et de l'hiver (DJF).

- $T_{max} > 25^{\circ}C$
- $T_{max} > 30^{\circ}C$

où, T_{max} et T_{min} sont les températures journalières maximale et minimale. Une température de $20^{\circ}C$, par exemple, est commune au sud du Québec pendant l'été, mais elle est considérée extrême au-dessus de la Péninsule d'Ungava. D'autre côté, une température égale à $-30^{\circ}C$ n'est pas rare en hiver au-dessus de Montagnes Torngats, mais, au sud du Québec, cet événement est un extrême.

Les figures 5.9 et 5.10 montrent la durée maximale d'un extrême chaud et d'un extrême froid, respectivement, moyennée pour la période 1961-2000. On voit bien que les extrêmes chauds durent le plus long temps au sud du Québec - au-dessus de la région de Montérégie - et que leur durée diminue rapidement vers le nord. L'augmentation du seuil de la température (de 20 à $30^{\circ}C$) a bien sûr pour conséquence de diminuer la durée des extrêmes chauds. Similairement pour les extrêmes froids ; l'augmentation du seuil (de -40 à $-30^{\circ}C$) diminue leur durée qui augmente avec latitude et atteint la valeur maximale au-dessus des sommets le plus élevés des montagnes au nord du Québec.

Les figures 5.11 et 5.12 montrent la fréquence moyenne annuelle pour la période 1961-2000 des extrêmes chauds et froids. Bien entendu, la fréquence des extrêmes chauds diminue de sud vers le nord et avec l'altitude plus élevée. Pour les extrêmes froids, la fréquence est la plus grande au-dessus des Montagnes Torngats et au-dessus de la Péninsule d'Ungava et elle diminue vers le sud. Pour la durée des extrêmes, leur intensité diminue avec les valeurs absolues du seuil de température plus grand.

5.4 Période d'endurcissement

L'endurcissement des plantes est un processus d'acclimatation de végétaux au froid déclenché par la baisse de la température à la fin de la saison de croissance. La diminution de la température provoque des changements physiologiques et métaboliques qui permettent de survivre durant la période froide. La transition entre la croissance de la plante et la période d'endurcissement prend place quand la température moyenne journalière tombe au-dessous de $5^{\circ}C$ (Bélanger et al. (2002), Paquin and Pelletier (1980)). L'acclimatation est un processus réversible qui disparaît une fois que les températures remontent au-dessus de $0^{\circ}C$ au printemps. À partir de ces connaissances empiriques, les degrés-jours au-dessus de $5^{\circ}C$ (DD5 "degree-days above $5^{\circ}C$ ") et le degrés-jours au-dessous de $5^{\circ}C$ (CDD5 "cold degree-days below $5^{\circ}C$ ") sont utilisés pour exprimer l'impact de la température sur l'endurcissement des plantes. Au Québec, il faut environ 100 CCD5 afin d'obtenir des conditions d'endurcissement optimales (Paquin (1977)). Par contre, selon Bélanger et al. (2002), les périodes chaudes durant l'automne ont un effet équivalent mais de sens contraire de sorte qu'il est nécessaire d'ajouter un nombre de CDD5 équivalent au nombre de DD5 pour obtenir un endurcissement optimal. L'accumulation nette de CDD5 a été calculée à partir de 1^{ier} août jusqu'à la fin de la période d'endurcissement qui est définie comme le premier jour quand la température minimale devient inférieur à $-10^{\circ}C$. Le début de la période d'endurcissement est le dernier jour quand l'accumulation nette de CDD5 est égale à zéro. Donc, c'est l'accumulation nette de CDD5 durant la période d'endurcissement qu'on appelle "l'endurcissement" et on le calcule de la manière suivante :

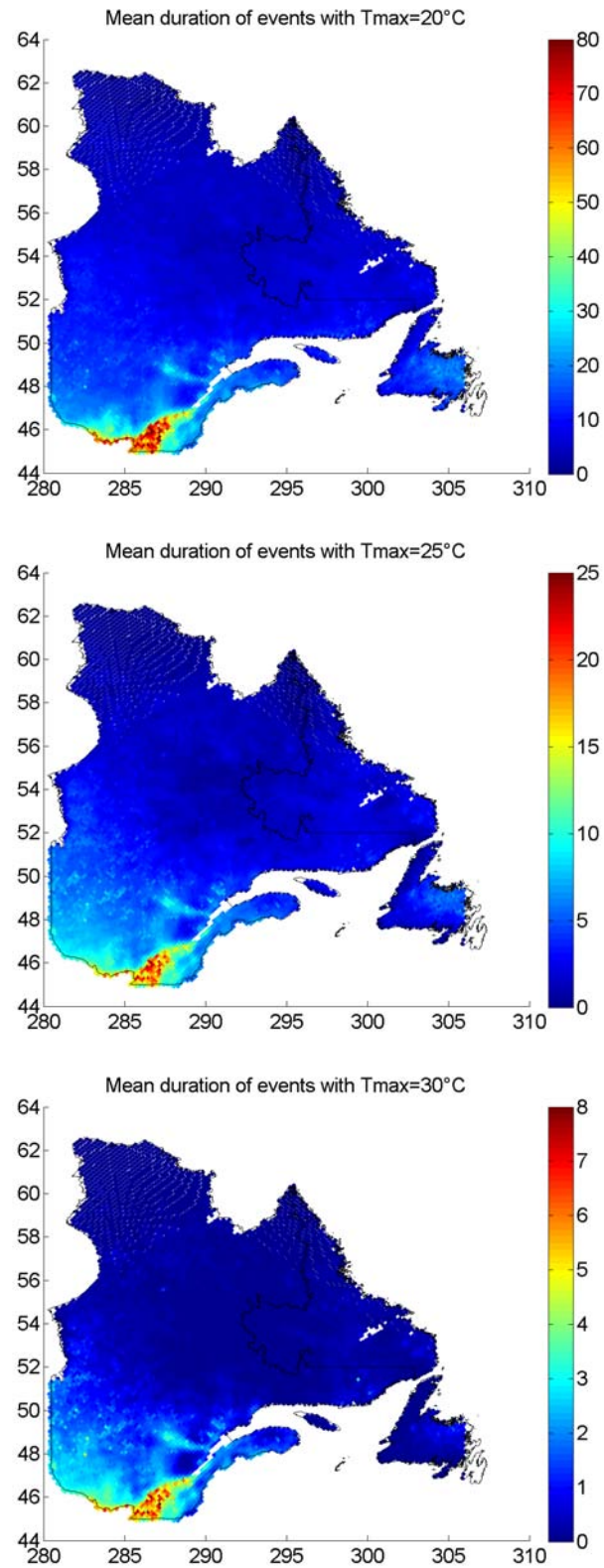


FIGURE 5.9: Normales climatiques de la durée maximale d'un extrême chaud pour la période de référence (1961-2000) (en jours).

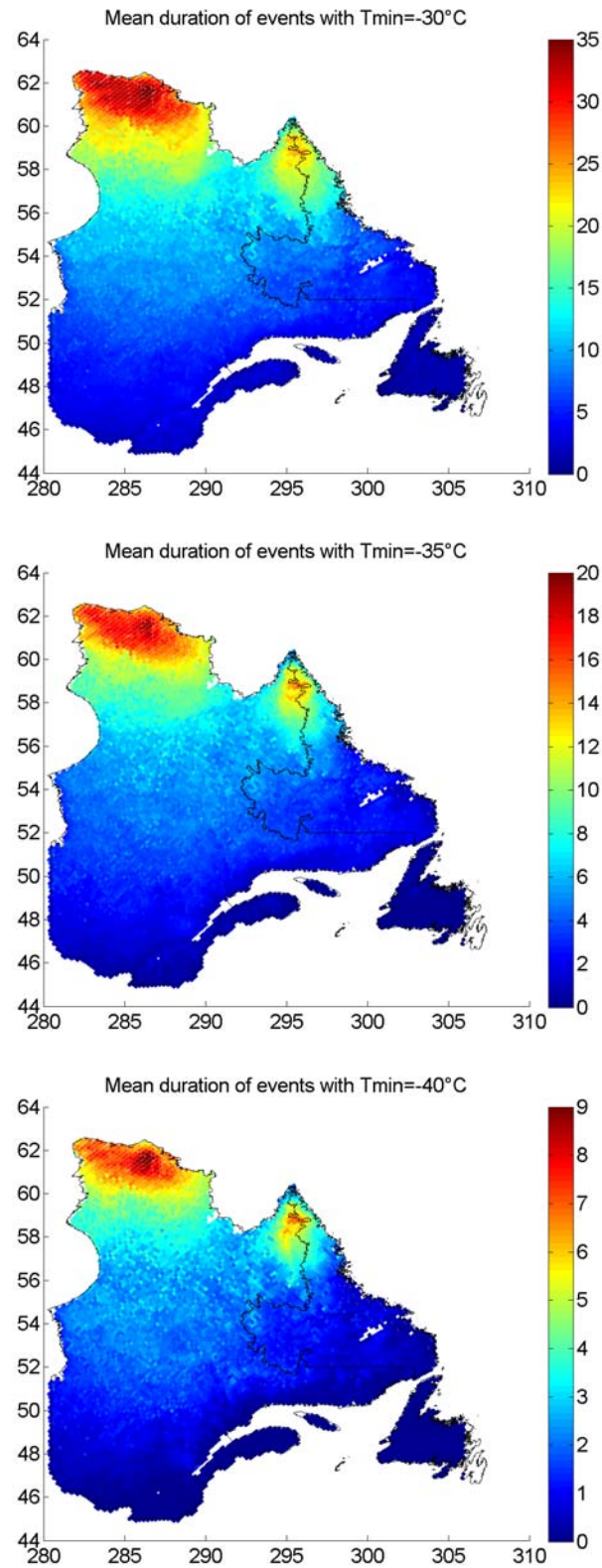


FIGURE 5.10: Normales climatiques de la durée maximale d'un extrême froid pour la période de référence (1961-2000) (en jours).

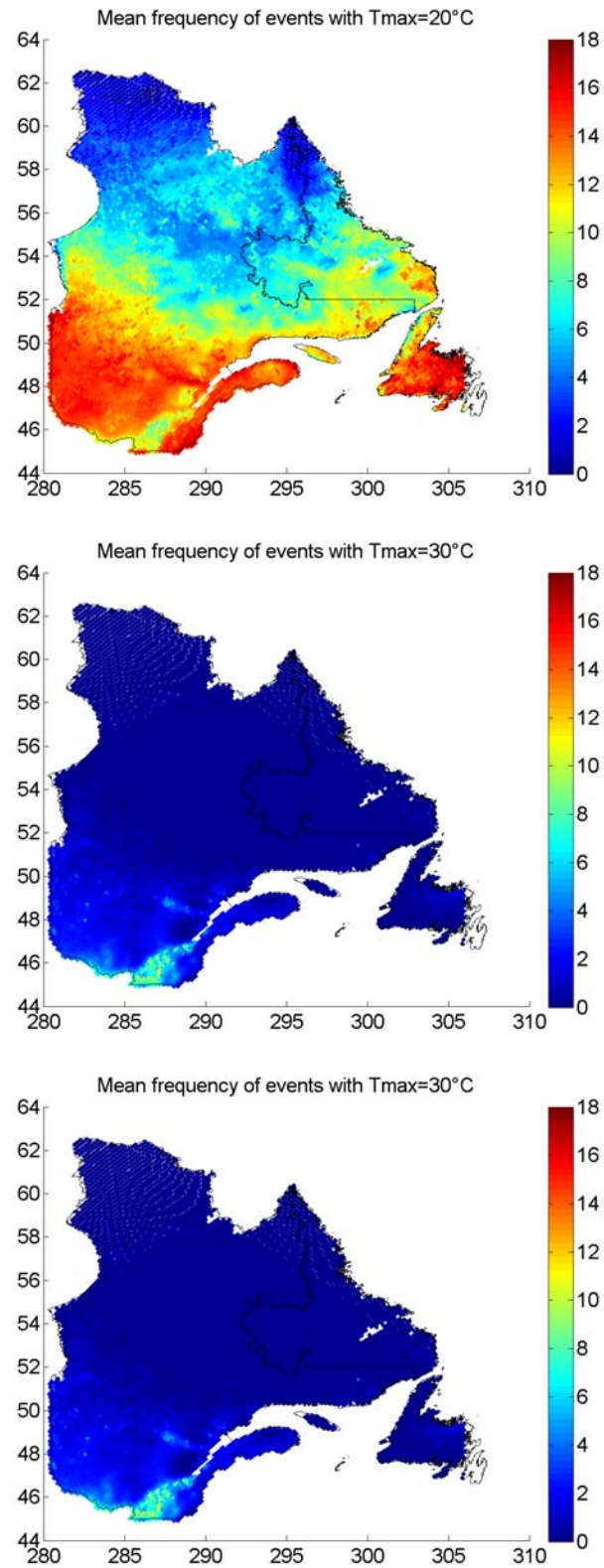


FIGURE 5.11: Normales climatiques de la fréquence annuelle d'un extrême chaud pour la période de référence (1961-2000)(1/année).

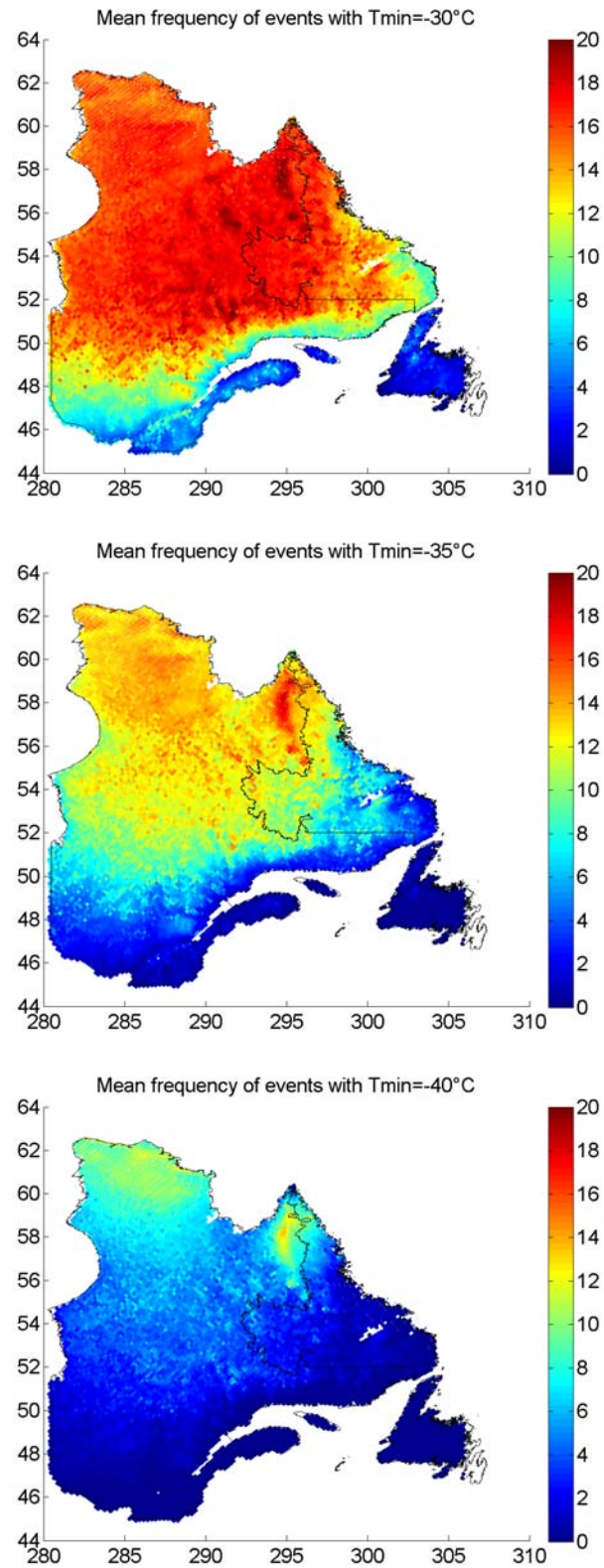


FIGURE 5.12: Normales climatiques de la fréquence annuelle d'un extrême froid pour la période de référence (1961-2000) (1/année).

$$FH = \sum_{j=V_3}^{V_1-1} CDD5_j - \sum_{j=V_3}^{V_1-1} DD5_j \quad (5.3)$$

où

- V_1 est la première date où la température minimale devient inférieure à -10°C
- V_3 est le jour suivant celui quand V_2 devient égal à zéro
- V_2 est la somme de la différence journalière entre CDD5 et DD5 pour la période entre le 1^{er} août et la date V_1-1
- L'endurcissement est traduit par "Fall Hardening" en anglais (d'où l'utilisation de FH).

Grâce aux températures plus élevées au sud du Québec, l'endurcissement commence plus tard et il se termine plus tard dans cette région qu'au nord (figure 6.93). Par exemple, proche de Montréal, l'endurcissement débutera le 5 octobre (le jour-julien 310) et finira le 1^{ier} novembre (le jour-julien 335). Donc, la durée de la période d'endurcissement est environ 25 jours. L'accumulation nette de degrés-jours de froid au-dessous de 5°C pendant cette période est d'environ 5. Au nord du Québec, la période d'endurcissement est environ 20 jours et l'accumulation nette de CDD5 est proche de 40 degrés-jours. Ceci on explique par le fait que au nord, une fois que l'accumulation nette de CDD5 devient égale à 0, la température moyenne reste inférieure à 5°C , lorsque au sud du domaine, elle peut augmenter au-dessus de cette limite. Donc, l'accumulation de degrés-jours de chaud (DD5) pendant la période d'endurcissement est plus grande que zéro au sud du Québec, lorsqu'elle reste très proche de, ou, égale à zéro au nord.

5.5 Période de désendurcissement

Les végétaux acclimatés au froid peuvent subir les températures bien inférieures à 0°C pendant l'hiver (Bélanger et al. (2002); McKenzie and McLean (1980)). Une exposition des plantes aux températures supérieures à 0°C provoquera une perte graduelle de leur résistance au froid (Bélanger et al. (2002); Sakai and Larcher (1987)) et ainsi mènera à une sensibilité plus élevée aux basses températures durant le reste de l'hiver. L'accumulation de degrés-jours au-dessus de 0°C (DD0 "degree-days above 0°C ") pendant la période froide a été utilisée comme indice de la perte de résistance des plantes au froid, c'est-à-dire, du taux de désendurcissement des plantes (Bélanger et al. (2002)). Pour exprimer ce taux, nous avons utilisé la formule suivante :

$$WT = \frac{V_{12}}{V_{10}} \quad (5.4)$$

où

- V_{12} représente la somme de DD0 à partir de jour V_8 jusqu'à jour $V_9 - 1$
- V_8 est le début de la période froide
- V_9 est la fin de la période froide
- la période froide est la période entre la première et la dernière occurrence de la température minimale inférieure à -15°C
- V_{10} est la longueur de la période froide ($V_9 - V_8$)
- Le désendurcissement se traduit en anglais par "Winter Thaw" (d'où l'utilisation de WT).

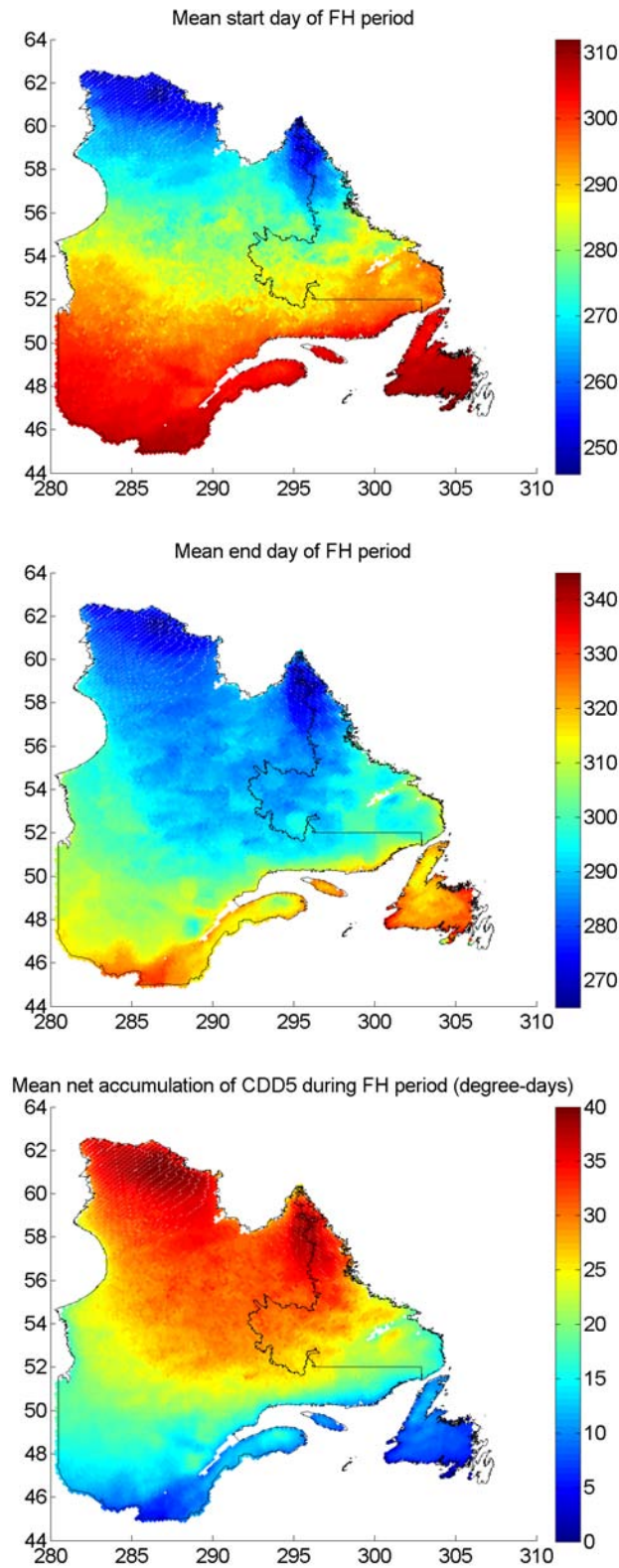


FIGURE 5.13: Normales climatiques des dates de début et de fin de la période d'endurcissement et de l'accumulation nette des degrés-jours de froid au-dessous de 5°C pendant la période d'endurcissement pour la période de référence (1961-2000) (en degrés-jours).

La figure 6.95 montre le jour-julien de début et de fin de la période froide, ainsi que le taux de désendurcissement pendant cette période. Il faut remarquer que la période froide commence en automne de l'année précédente et elle se termine au printemps de l'année courante. C'est pour cette raison que le jour-julien de la fin de la période est inférieur au jour-julien de début de la période. On voit que le taux de désendurcissement est le plus grand au sud du Québec et diminue rapidement vers le nord. Cela n'est pas surprenant car les températures sont bien inférieures à 0°C au nord du Québec-Labrador et c'est rare qu'elles deviennent positives durant l'hiver. Il y a un problème avec certains points de grille à Terre-Neuve où le début de la période froide n'arrive pas en automne de l'année précédente mais, plutôt en hiver de l'année courante. Subséquemment, la définition de désendurcissement appliquée ici n'est pas la plus adéquate pour cette région. Nos résultats ne contiennent par contre aucune erreur pour la région du Québec et Labrador à cause de ce problème.

5.6 Saisonnalité

La saisonnalité est définie comme un coefficient de variation des températures/précipitations, c'est-à-dire l'écart-type de température/précipitation mensuelle moyenne divisé par la moyenne annuelle de la température/précipitation (Ressources Naturelles Canada, RNCAN).

$$S = \frac{\sigma_m}{X_a} * 100 \quad (5.5)$$

Où, X_a représente la température/précipitation moyenne annuelle et σ_m représente l'écart-type intra-annuel de la température/précipitation moyenne mensuelle par rapport à X_a . Les moyennes de température sont exprimées en degrés Kelvin, afin d'éviter la division par zéro. Calculée de cette façon, les valeurs de σ_m/X_a sont généralement très petites. La multiplication de σ_m/X_a par 100 rend son interprétation plus facile.

Cet indice bioclimatique permet de visualiser les variations intra-annuelles de la température/précipitation. Ainsi, une grande valeur de la saisonnalité signifie que les saisons sont bien définies. De même, une faible saisonnalité signifie que les variations de la température/précipitation au cours d'une année ne sont pas importantes. Par exemple, la saisonnalité de la température est faible dans les tropiques car la température ne change pas beaucoup durant l'année. Au contraire, aux latitudes moyennes, la température varie entre l'hiver et l'été résultant en une saisonnalité de la température forte pour ces régions. Les normales climatiques de la saisonnalité de la température et de la précipitation au-dessus de notre domaine d'étude sont montrées sur la figure 5.15. On peut remarquer un fort gradient du sud-est vers le nord-ouest pour les deux variables. La saisonnalité est la plus importante au-dessus de la Péninsule d'Ungava et la moins grande au sud-est du domaine. Ceci s'explique par des températures très basses en hiver au-dessus de la Péninsule d'Ungava (jusqu'à -40°C) et par des températures relativement élevées en été (jusqu'à 20°C), donnant une variabilité intra-annuelle d'environ 60°C au-dessus de cette région représentant une très forte saisonnalité de la température. Similairement, les étés humides et les hivers secs de la Péninsule d'Ungava amènent une forte saisonnalité de la précipitation. Sur la Côte-Nord, la quantité de précipitation est significative tout au

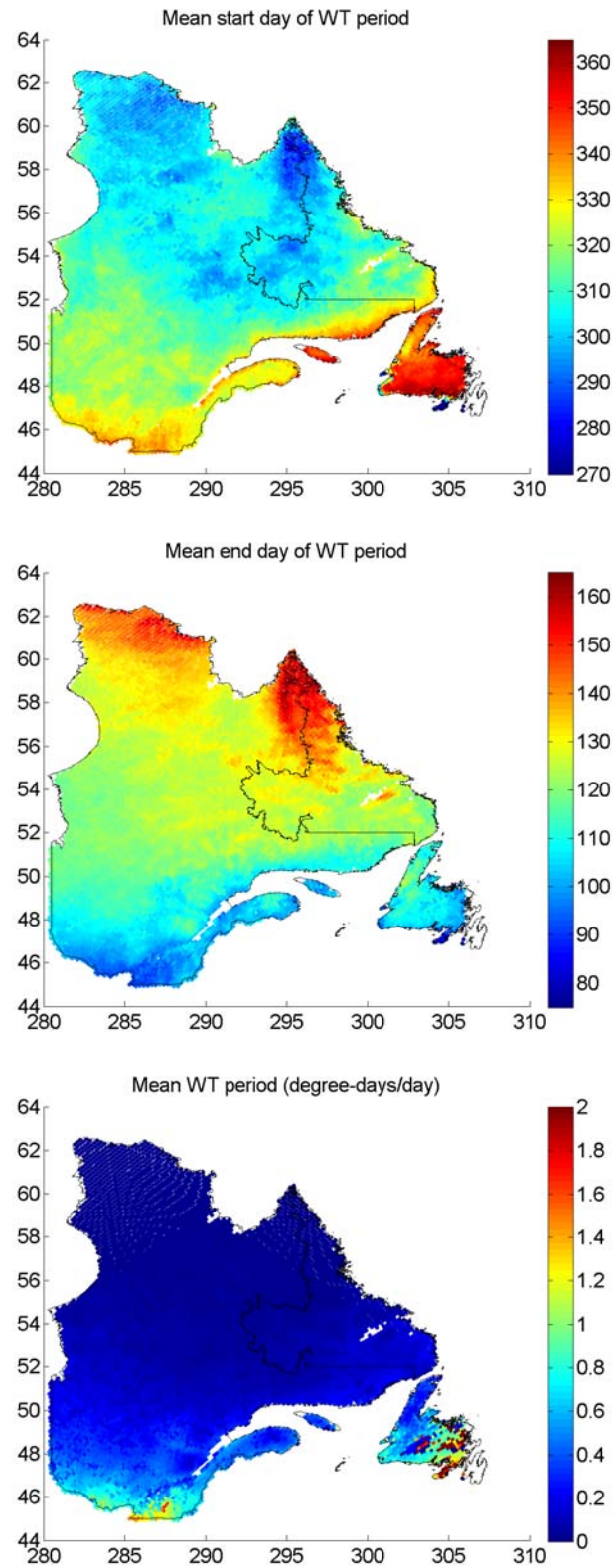


FIGURE 5.14: Normales climatiques des dates de début et de fin de la période de froide (en jours) et du taux de désendurcissement (en degrés-jours/jour) pour la période de référence (1961-2000).

long de l'année et les variations de la température sont moins importantes au cause de la proximité du Fleuve Saint-Laurent ce qui amène de faible saisonnalité tant pour les précipitations que pour la température.

5.7 Évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration (ET) correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. L'évapotranspiration réelle (ETR) d'une région représente l'eau réellement perdue par celle-ci sous forme de vapeur, tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP) représente l'eau susceptible d'être perdue sous forme de vapeur dans les mêmes conditions quand elle n'est plus facteur limitant. Ainsi, l'ETP dans le Sahara est très élevé car il fait chaud et sec, mais l'ETR dans le Sahara est très faible puisqu'il n'y a que très peu d'eau emmagasinée dans les plantes et les sols. La notion d'évapotranspiration potentielle est très importante au point de vue écologique puisqu'elle correspond à la capacité énergétique qui est utile pour les cycles de vie. Il n'est donc pas surprenant de savoir que l'ETP est une des variables qui sont le mieux corrélées avec la richesse des espèces dans plusieurs régions du globe hormis les déserts (Fisher et al. (2011)). Il existe plusieurs méthodes de calcul d'ETP, souvent divisés en trois groupes selon les variables à partir desquelles l'ETP est obtenue (e.g. Fisher et al. (2011)). Ces 3 groupes de modèles sont les suivants :

- les modèles basés sur la température (en anglais, "temperature based models")
- les modèles basés sur la radiation (en anglais, "radiation based models")
- les modèles combinatoires (en anglais, "combined models")

Le premier groupe de modèles est basé sur l'hypothèse que l'ETP est fonction seulement de la température de l'air (soit minimale et maximale soit moyenne, dépendant de la méthode). Dans les modèles basés sur la radiation, l'ETP est fonction de la radiation net à la surface et de la température de l'air. Les modèles combinatoires prennent compte d'autres variables météorologique telles que le vent et l'humidité d'air à part de la température et de la radiation (par exemple, le modèle de Penman (1948)).

Dans notre étude, nous avons choisi deux modèles :

- le modèle de Thornthwaite (1948) basé sur la température
- le modèle de Priestley and Taylor (1972) basé sur la radiation

Le modèle de Thornthwaite (1948) utilise la formule suivante :

$$ETP = c * \left(\frac{10T}{I} \right)^a * \frac{d}{12} * \frac{N}{30} \quad (5.6)$$

Où, $c = 1.6$, d représente le nombre moyen des heures d'ensoleillement pour chaque mois, N est le nombre de jours dans un mois et T est la température moyenne mensuelle. La valeur d' I est calculé à partir de la température moyenne mensuelle selon la formule :

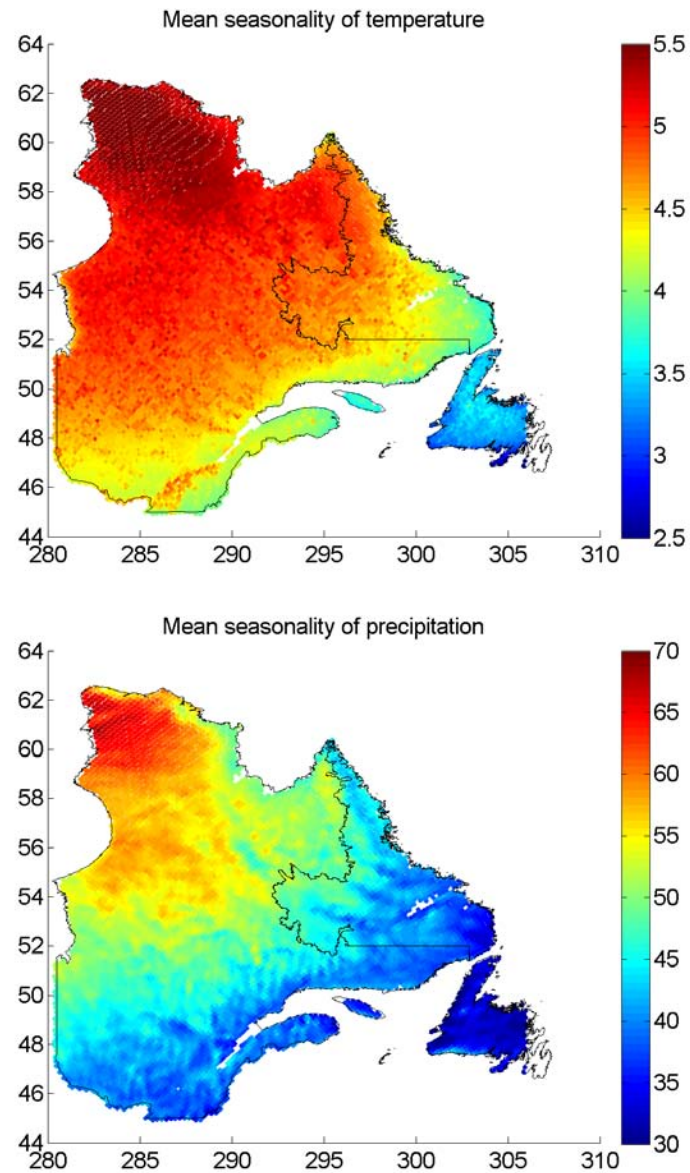


FIGURE 5.15: Normales climatiques de la saisonnalité de la température et de la précipitation pour la période de référence (1961-2000) (en pourcentage).

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (5.7)$$

La formule pour l'ETP selon la méthode de Priestley and Taylor (1972) est la suivante :

$$ETP = \alpha * R_n * \frac{\delta}{\delta + \gamma} \quad (5.8)$$

Où, $\alpha = 1.26$, $\gamma = 0.066 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$; δ a été calculé à partir de la température moyenne de l'air (T) et de la pression de la saturation de vapeur d'eau (e_s) en utilisant l'équation suivante :

$$\delta = \frac{17.502 * 240.97 * e_s(T)}{(T + 240.97)^2} \quad (5.9)$$

Où, e_s a été calculé à partir de l'équation :

$$e_s = 0.61121 * \exp \left[\frac{17.502 * T}{T + 240.97} \right] \quad (5.10)$$

L'avantage du modèle de Thornthwaite (1948) est qu'il n'utilise qu'une seule variable, soit la température moyenne de l'air. Donc, son utilisation est possible avec des données climatiques minimales. Mais, selon Fisher et al. (2011), ce modèle est trop simple pour bien évaluer l'évapotranspiration potentielle d'une région boréal ou arctique. L'auteur propose plutôt de choisir un modèle combiné ou basé sur la radiation lorsqu'il est possible d'obtenir des mesure de radiation. Étant donné que notre domaine d'étude est situé dans la région nordique, nous avons choisi de comparer le modèle de Thornthwaite (1948) avec celui de Priestley and Taylor (1972) afin d'évaluer les différences entre eux. Malheureusement, nous n'avons pas d'observations d'ETP dans notre région d'intérêt et donc, nous ne pouvons pas comparer notre modèle dynamique du climat aux valeurs mesurées. Quand même, sur les figures 5.16-5.18 nous remarquerons des différences importantes entre les deux méthodes. En général, pendant le printemps et l'été, la méthode de Thornthwaite (1948) donne des valeurs d'ETP plus petites que celles calculées par la méthode de Priestley and Taylor (1972). En automne, les valeurs d'ETP selon le Thornthwaite (1948) sont plus élevées que celles de Priestley and Taylor (1972). Aussi, le gradient nord-sud est moins important selon la méthode de Thornthwaite (1948) ce qui semble paradoxale compte tenu de l'important gradient thermique nord-sud de la température moyenne (i.e. la seule variable utilisée dans le modèle de Thornthwaite (1948). Cela, combiner avec les comparaisons de (Fisher et al. (2011)) sur les Amériques, nous suggère qu'il est préférable d'utiliser la méthode de Priestley and Taylor (1972).

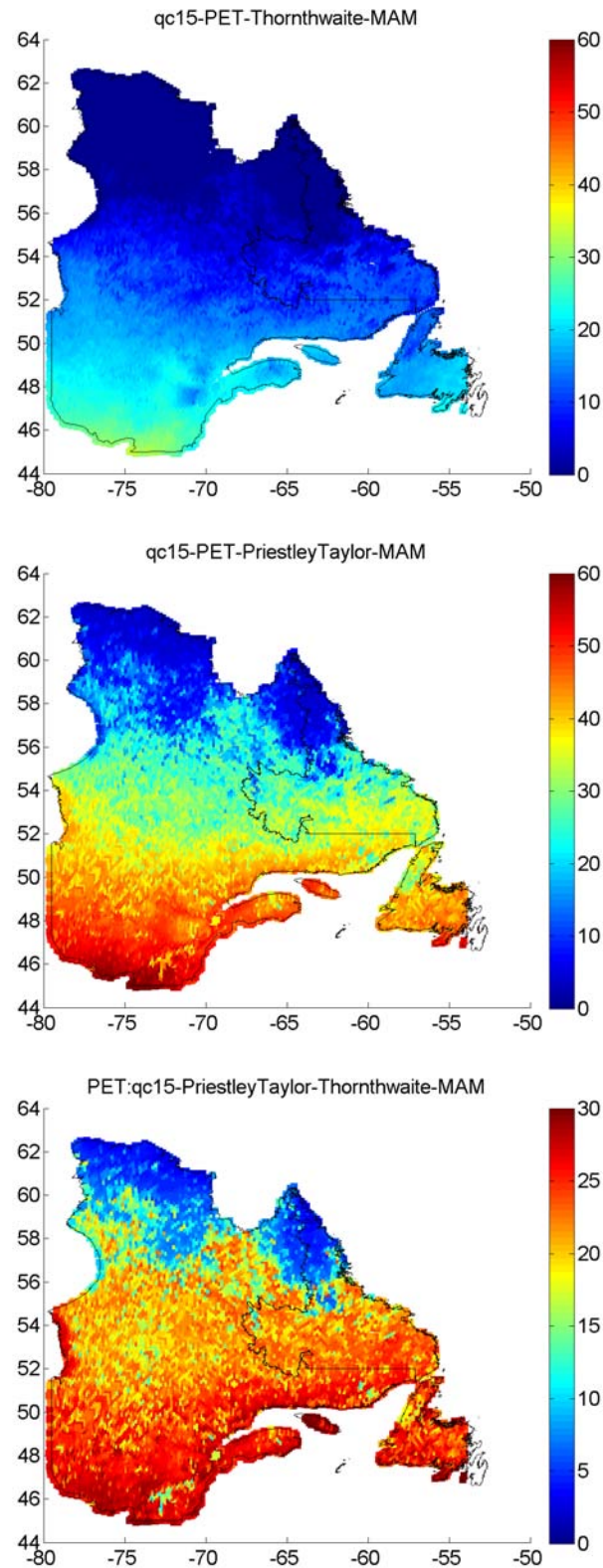


FIGURE 5.16: Normales climatiques de l'évapotranspiration potentielle calculée par les méthodes de (Thornthwaite, 1948) et de (Priestley and Taylor, 1972) pendant le printemps (MAM) pour la période de référence (1961-2000) (en millimètres).

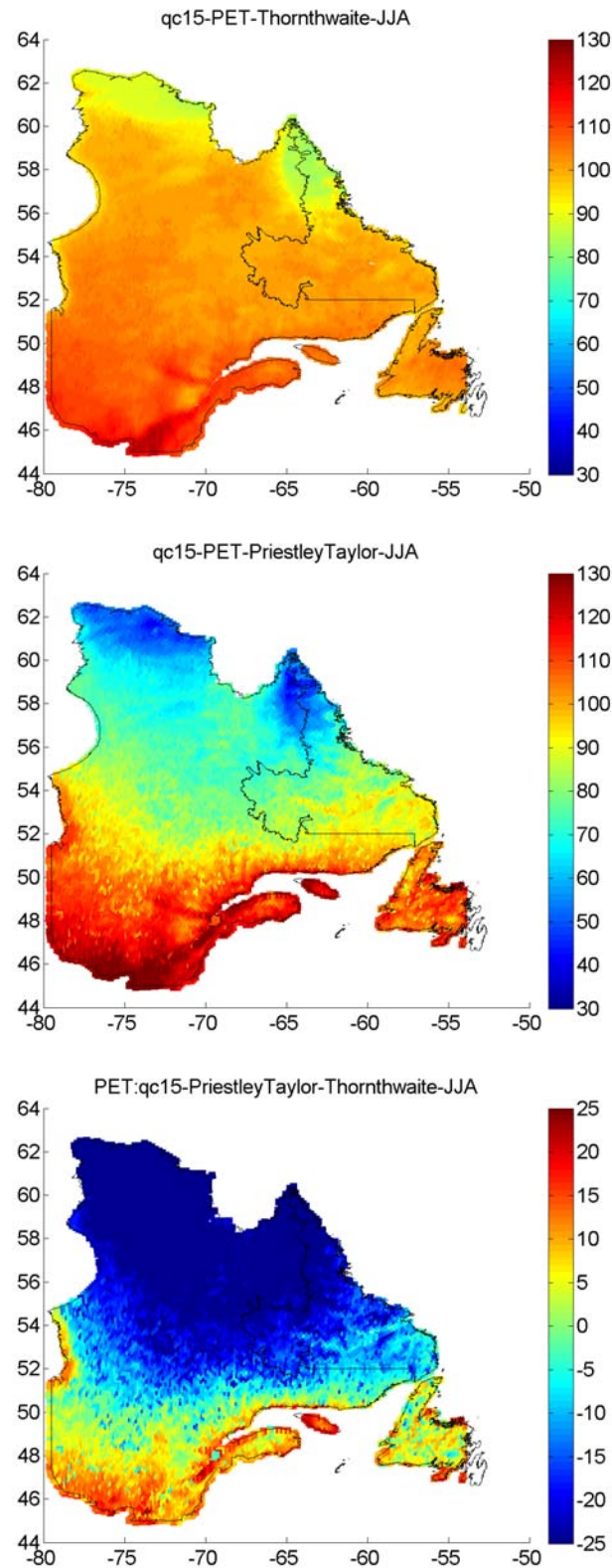


FIGURE 5.17: Normales climatiques de l'évapotranspiration potentielle calculée par les méthodes de (Thornthwaite, 1948) et de (Priestley and Taylor, 1972) pendant l'été (JJA) pour la période de référence (1961-2000) (en millimètres).

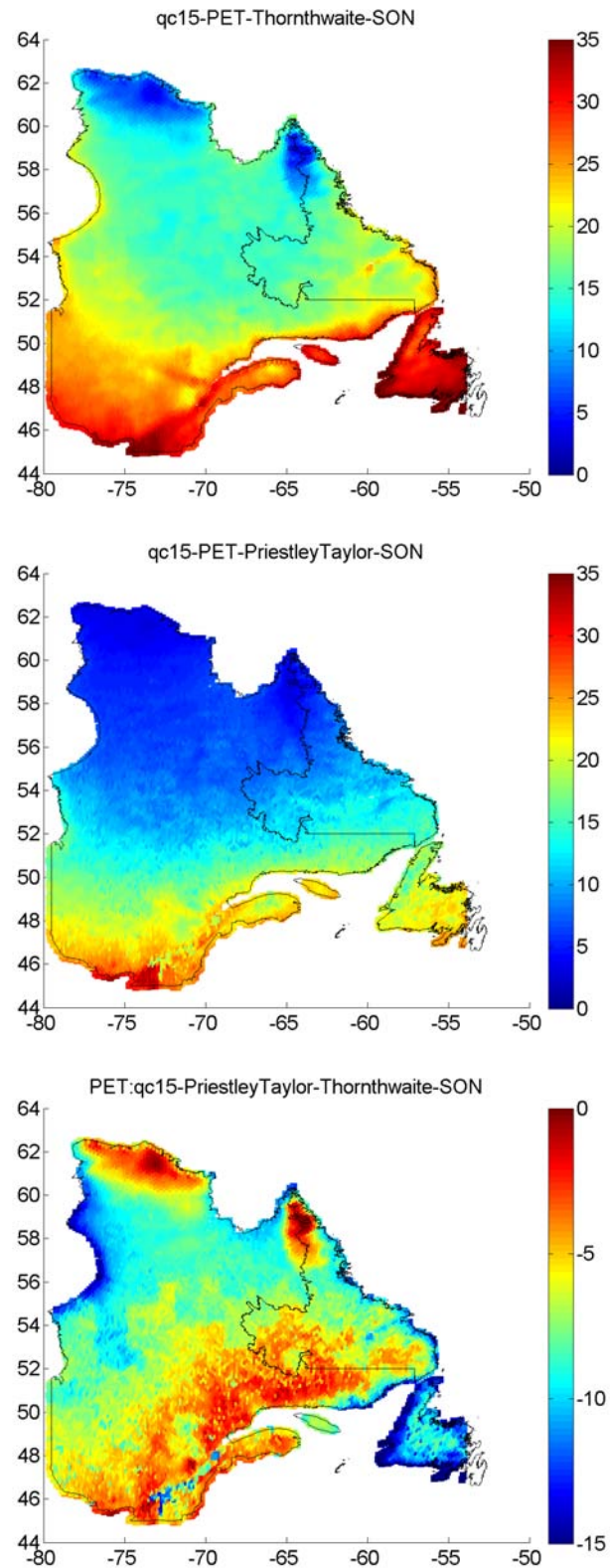


FIGURE 5.18: Normales climatiques de l'évapotranspiration potentielle calculée par les méthodes de (Thornthwaite, 1948) et de (Priestley and Taylor, 1972) pendant l'automne (SON) pour la période de référence (1961-2000) (en millimètres).

5.8 Budget hydrique

La différence entre la précipitation et l'évapotranspiration sur une région représente l'apport net en eau qui peut être entreposée dans les sols, lacs et nappes phréatiques ou bien être drainée dans les rivières et océans. Cette différence fait la partie du budget hydrique de la branche terrestre qu'on peut écrire de la manière suivante :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = P - E - R \quad (5.11)$$

Le terme $\frac{\partial w}{\partial t}$ représente le changement (évolution dans le temps) de l'eau totale en surface (liquide et solide, incluant la neige). P , E et R sont la précipitation totale, l'évaporation et le ruissellement, respectivement. Donc, la différence entre P et E , après le ruissellement, représente la quantité d'eau qui est disponible pour des plantes.

La figure 5.19 montre la différence $P - E$ pour trois saisons pour lesquelles l'ETP a été calculée (selon la méthode de (Priestley and Taylor, 1972)). On peut voir que les valeurs positives de $P - E$ sont dominantes pendant le printemps (MAM) et l'automne (SON) sur la région au complet, surtout au-dessus de montagnes, de la Côte-Nord et au sud-est du Québec. Pendant l'été (JJA) la précipitation est plus importante que l'ETP sur la plus grande partie du domaine sauf des régions côtières : sur la Basse Côte-Nord, au long de la Fleuve Saint-Laurent, sur la côte est et sud-est gaspésienne, sur l'île d'Anticosti et sur la côte de Baie-James. L'ETP est dominante aussi aux Laurentides et dans la région d'Outaouais durant l'été.

5.9 Période avec la neige

Une couverture de neige est considérée continue lorsque, pendant au moins 14 jours consécutifs, la hauteur de la neige est égale ou supérieure à 10 cm. L'hauteur de 10 cm est utilisé dans le modèle (MRCC) comme la hauteur de neige nécessaire pour pouvoir couvrir une tuile (de 15 km par 15 km) complètement. Lorsque la hauteur de neige est plus petite que 10 cm, la tuile est couverte partiellement. Le seuil de 14 jours a été pris afin d'éviter le bruit au début et à la fin de la saison nivale causée par l'existence d'une couverture de neige temporaire. La période entre la première et la dernière occurrence de 14 jours ayant une couverture de neige continue représente la période nivale. Les dates de début et de fin de la période nivale sont montrées sur la figure 5.20, ainsi que la longueur de cette période. La date du début de la période nivale varie entre le 1^{er} octobre au nord et le 1^{er} décembre au sud du Québec. La saison nivale se termine entre le 1^{er} avril au sud et le 10 juin au nord. Donc, la période avec la couverture de neige continue dure environ 120 jours (ou 4 mois) au sud du Québec et elle devient plus longue vers le nord montant à une valeur de 260 jours (ou presque 9 mois) aux points au-dessus des montagnes le plus au nord.

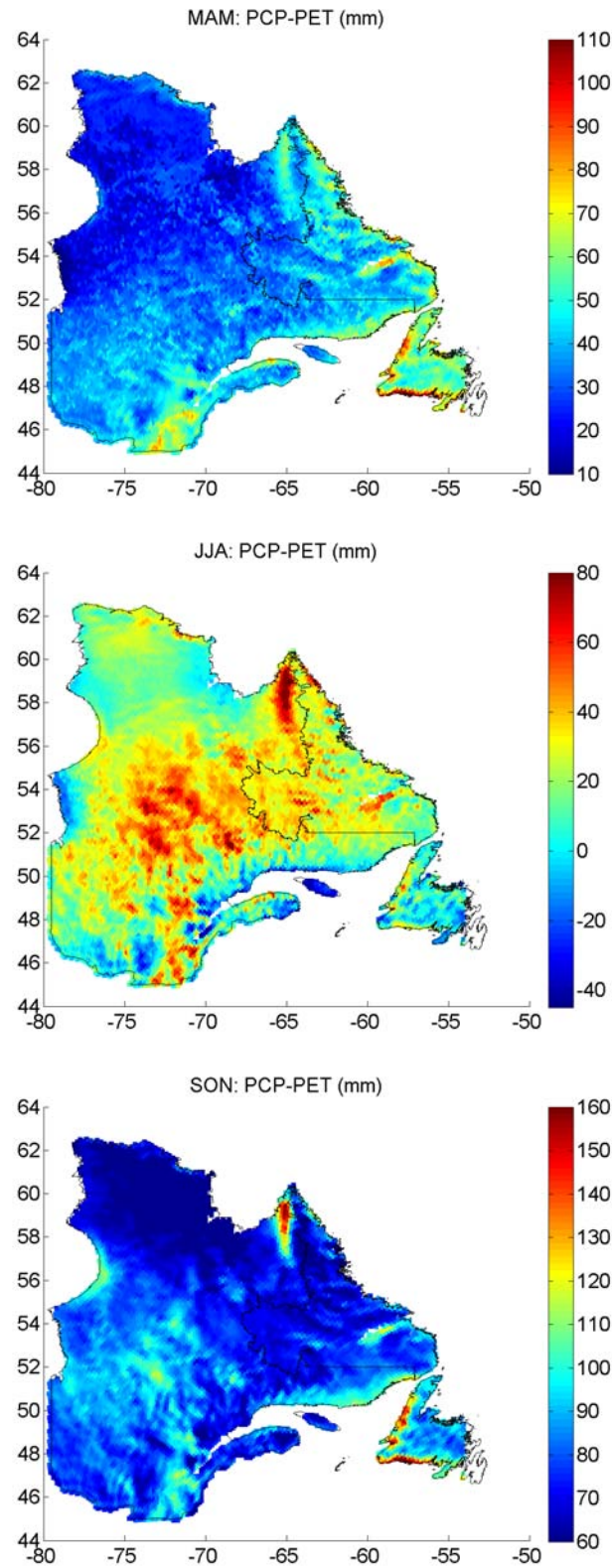


FIGURE 5.19: Normales climatiques de la différence entre la précipitation et l'évapotranspiration potentielle calculée par les méthodes de (Priestley and Taylor, 1972) pour 3 saisons différentes pour la période de référence (1961-2000).

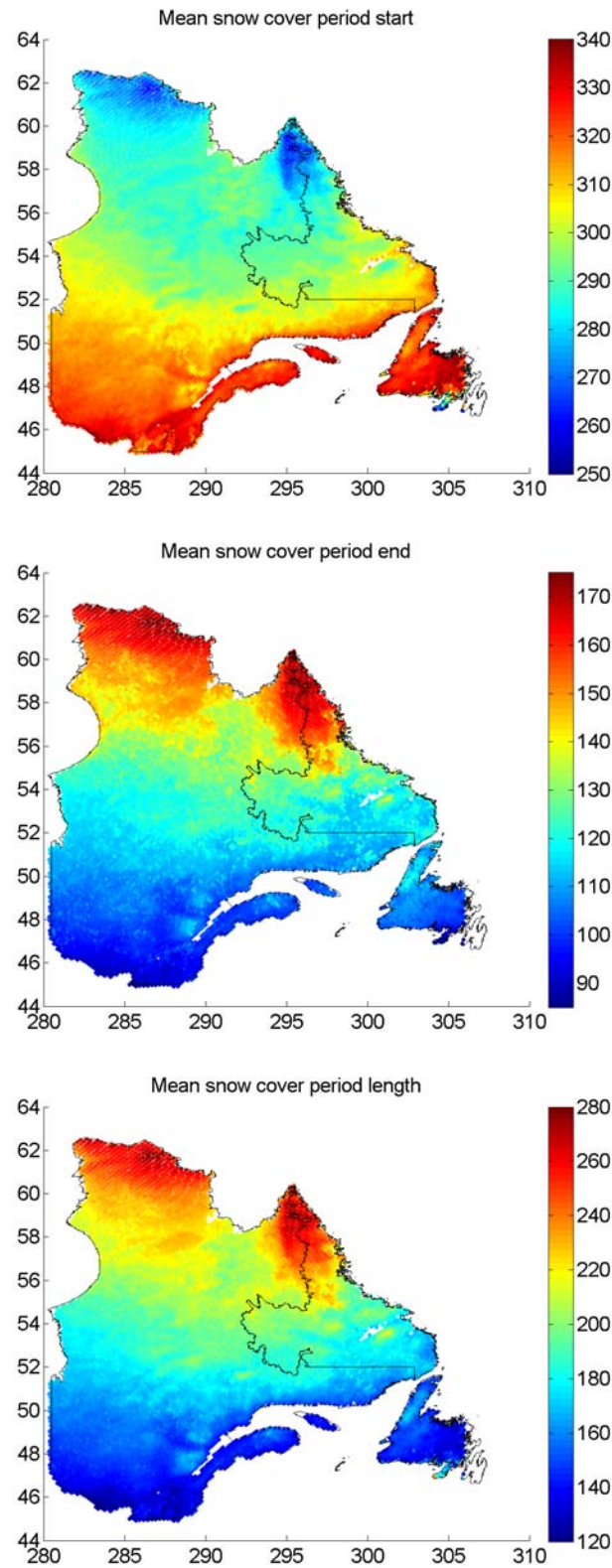


FIGURE 5.20: Normales climatiques des dates de début et de fin de la période nivale et de sa longueur pour la période de référence (1961-2000) (en jours).

5.10 Discussion

Les sorties du MRCC à 15 km de résolution sont encore peu utilisées dans les projets Impacts et Adaptation d'Ouranos, elles ont été fournies à titre exploratoire aux partenaires de l'Atlas de la biodiversité nordique. Bien que les modèles de climat comportent des biais qui varient sur le territoire et selon la simulation climatique, les sorties du modèle régional à fine résolution (15 km) peuvent être utiles pour l'analyse du patron géographique. Par exemple, l'analyse des données de la simulation qc15 a produit un patron géographique qui représente assez bien les domaines bioclimatiques du Québec (figure 16 dans la partie du rapport Samson (2012)).

Les biais de la simulation qc15 ont été présentés dans la section 3 : températures généralement trop froides, surtout pendant l'hiver et l'automne ; précipitation généralement bien simulée : maximums et minimums annuels simulés aux bons moments de l'année, mais précipitation trop importante à proximité de la plupart des stations d'observations pour la période mai-juin-juillet. Compte tenu de ces biais et du besoin d'effectuer d'autres analyses sur les sorties du MRCC à cette résolution, nous recommandons d'utiliser les données NLWIS/SNITE à 10 km comme climat de référence pour les scénarios climatiques.

Scénarios climatiques pour l'horizon 2050

La troisième partie du projet de l'Atlas de la biodiversité du nord du Québec concerne les scénarios du climat futur. Afin d'estimer les impacts potentiels des changements climatiques projetés sur la biodiversité nordique, les changements attendus des indices et des variables considérés pertinents ont été évalués. Les indices utilisés sont ceux définis et analysés précédemment dans le chapitre 5.

6.1 Méthode des deltas

La façon la plus courante et le plus simple scénario du climat futur consiste à utiliser la méthode des "deltas" ou la méthode des anomalies du climat futur par rapport au présent. Pour la température les deltas ont été calculés comme différence entre le climat futur et le climat de référence :

$$\delta = variable_{fut} - variable_{ref} \quad (6.1)$$

Pour la précipitation, afin d'obtenir le changement en pourcentage, au lieu de différence on utilise le rapport :

$$\delta = \frac{(variable_{fut} - variable_{ref})}{(variable_{ref})} * 100 \quad (6.2)$$

La $variable_{ref}$ représente la moyenne de la variable analysée sur la période de référence de 30 ans pour une simulation donnée et la $variable_{fut}$ est la moyenne sur la période future de 30 ans pour la même simulation.

Une des limites de la méthode des deltas est qu'elle ne présume aucun changement dans la variabilité du climat dans le futur. Par ailleurs, cette méthode suppose que tous les biais dans la simulation du climat présent resteront les mêmes dans la simulation du climat futur, c'est-à-dire, que cette méthode s'appuie sur l'hypothèse que les erreurs du modèle climatique utilisé s'annuleront.

6.2 Climat de référence

Les "deltas" ajoutés au climat de référence nous donnent le climat futur projeté. Le climat de référence représente la moyenne sur 30 ans pour la période de référence (1961-1990) qui a été calculé à partir des données NLWIS/SNITE (National Land and Water Information Service/Service national d'information sur les terres et les eaux, Hutchinson et al. (2009)). Ces données sur grille de 10 km couvrent le Canada au sud de 60°N. Les variables disponibles sont la température minimale et maximale et la précipitation totale. Les données NLWIS/SNITE ont été produites à partir des mesures aux stations en utilisant la méthode ANUSPLIN (Hutchinson (1991)) décrite dans le chapitre 2.

6.3 Simulations du climat futur

Les données quotidiennes des Modèles de circulation générale (MCGs) utilisées dans l'étude proviennent de la banque de simulations du PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, Meehl et al. (2007)). Les données à la résolution plus fine ont été fournies par Ouranos et proviennent du Modèle régional canadien du climat (MRCC) (Caya and Laprise (1999), Musić and Caya (2007)). Les projections climatiques ont été calculées pour l'horizon 2050.

6.3.1 Modèles du climat globaux (MCGs)

Dans le cadre du projet PCDMI, pour notre horizon d'intérêt, soit 2050, les données quotidiennes sont disponibles seulement pour la période 2046-2065. Par conséquent, les moyennes climatiques futures ont été calculées sur les 20 ans disponibles. Les simulations quotidiennes historiques couvrent la période 1961-1990 au complet, donc, les moyennes climatiques ont été calculées sur 30 ans pour la période de référence. Enfin, les deltas des MCGs ont été obtenus comme la différence entre ces deux moyennes selon l'équation 6.1 ou 6.2.

Les simulations futures des MCGs ont été produites pour trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) issus du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) soit : A1B, A2 et B1 (Nakićenović et al. (2000)). La figure 6.1 montre l'évolution de la température moyenne globale selon un ensemble de simulations suivant plusieurs scénarios d'émissions de GES. Ces scénarios d'émissions forment la base du dernier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié en 2007. La liste des 77 simulations utilisées dans l'étude est dans le tableau 6.1.

6.3.2 Modèles régionaux du climat (MRC)

Afin d'avoir une résolution plus fine que celle d'un MCG c'est-à-dire, d'avoir plus de détails sur le domaine du Québec, nous avons utilisé le Modèle régional canadien du climat (MRCC ; Caya and Laprise (1999), Musić and Caya (2007)) pour faire des scénarios futurs. Les simulations du MRCC

TABLE 6.1: Simulations des MCGs disponibles pour les scénarios du climat futur

Modèle	Membre	SRES	Modèle	Membre	SRES
bccr-bcm2-0	run1	A2	bccr-bcm2-0	run1	B1
cccma-cgcm3-1	run1	A1B	cccma-cgcm3-1	run1	A2
cccma-cgcm3-1	run1	B1	cccma-cgcm3-1	run2	A1B
cccma-cgcm3-1	run2	A2	cccma-cgcm3-1	run2	B1
cccma-cgcm3-1	run3	A1B	cccma-cgcm3-1	run3	A2
cccma-cgcm3-1	run2	B1	cccma-cgcm3-1	run4	A1B
cccma-cgcm3-1	run4	A2	cccma-cgcm3-1	run4	B1
cccma-cgcm3-1	run5	A1B	cccma-cgcm3-1	run5	A2
cccma-cgcm3-1	run5	B1	cccma-cgcm3-1-t63	run1	A1B
cccma-cgcm3-1-t63	run1	B1	cnrm-cm3	run1	A1B
cnrm-cm3	run1	A2	cnrm-cm3	run1	B1
csiro-mk3-0	run1	A1B	csiro-mk3-0	run1	A2
csiro-mk3-0	run1	B1	csiro-mk3-5	run1	A1B
csiro-mk3-5	run1	A2	csiro-mk3-5	run1	B1
gfdl-cm2-0	run1	A1B	gfdl-cm2-0	run1	A2
gfdl-cm2-0	run1	B1	giss-aom	run1	A1B
giss-aom	run1	B1	iap-fgoals1-0-g	run1	A1B
iap-fgoals1-0-g	run1	B1	iap-fgoals1-0-g	run2	A1B
iap-fgoals1-0-g	run2	B1	iap-fgoals1-0-g	run3	A1B
iap-fgoals1-0-g	run3	B1	ipsl-cm4	run1	A1B
ipsl-cm4	run1	A2	ipsl-cm4	run1	B1
miroc3-2-hires	run1	A1B	miroc3-2-hires	run1	B1
miroc3-2-medres	run1	A1B	miroc3-2-medres	run1	A2
miroc3-2-medres	run1	B1	miroc3-2-medres	run2	A1B
miroc3-2-medres	run2	A2	miroc3-2-medres	run2	B1
miub-echo-g	run1	A1B	miub-echo-g	run1	A2
miub-echo-g	run1	B1	miub-echo-g	run2	A1B
miub-echo-g	run2	A2	miub-echo-g	run2	B1
miub-echo-g	run3	A1B	miub-echo-g	run3	A2
miub-echo-g	run3	B1	mpi-echam5	run1	A2
mpi-echam5	run1	B1	mpi-echam5	run4	A1B
mri-cgcm2-3-2a	run1	A1B	mri-cgcm2-3-2a	run1	A2
mri-cgcm2-3-2a	run1	B1	mri-cgcm2-3-2a	run2	A1B
mri-cgcm2-3-2a	run2	A2	mri-cgcm2-3-2a	run2	B1
mri-cgcm2-3-2a	run3	A1B	mri-cgcm2-3-2a	run3	A2
mri-cgcm2-3-2a	run3	B1	mri-cgcm2-3-2a	run4	A1B
mri-cgcm2-3-2a	run4	A2	mri-cgcm2-3-2a	run4	B1
mri-cgcm2-3-2a	run5	A1B	mri-cgcm2-3-2a	run5	A2
mri-cgcm2-3-2a	run5	B1			

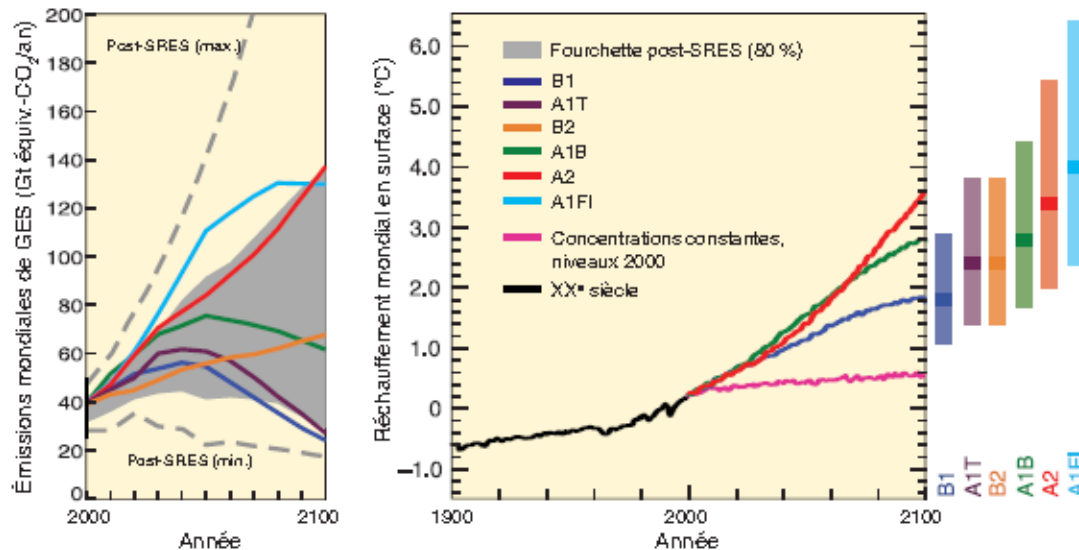


FIGURE 6.1: **À gauche** : Émissions mondiales de GES (soit le CO_2 , le CH_4 , le N_2O et les gaz fluorés) en l'absence de politiques climatiques : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80^e percentile des scénarios publiés depuis le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les lignes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. **À droite** : Les courbes en trait plein correspondent aux moyennes mondiales multimodèles du réchauffement en surface pour les scénarios A2, A1B et B1, en prolongement des simulations relatives au XX^e siècle. Ces projections intègrent les émissions de GES et d'aérosols de courte durée de vie. La courbe en rose ne correspond pas à un scénario mais aux simulations effectuées à l'aide de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) en maintenant les concentrations atmosphériques aux niveaux de 2000. Les barres sur la droite précisent la valeur la plus probable (zone foncée) et la fourchette probable correspondant aux six scénarios de référence du SRES pour la période 2090-2099. Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980-1999. (source GIEC 2007, WG1-AR4)

sont montrées dans le tableau 6.2 . Elles sont produites par Ouranos en utilisant la version 4.2.3 du modèle. La période couverte par le MRCC est 1961-1990 pour le présent et 2041-2070 pour le futur. Donc, les moyennes climatiques ont été calculées sur 30 ans pour le climat de référence et pour le climat futur. Ensuite, les deltas ont été obtenus selon la formule 6.1 ou 6.2 .

Les simulations du MRCC couvrent le domaine de l'Amérique du nord (AMNO) d'environ 9000 km par 8646 km et le domaine du Québec (QC) d'environ 3375 km par 3375 km. Plus d'informations sur le modèle MRCC est disponible dans le chapitre 2 . Les simulations ont été pilotées par trois MCGs différents (colonne 3 du tableau 6.2). Deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC ont servi de forçage aux simulations du MRCC : A2 et A1B (Nakićenović et al. (2000)).

TABLE 6.2: Simulations du MRCC pour les scénarios du climat futur

Simulation (ref-fut)	Domaine	Pilote	Membre	SRES
aev-aev	AMNO	cgcm3	5	A2
aez-afb	AMNO	cgcm3	1	A2
aez-afc	AMNO	cgcm3	2	A2
afa-afd	AMNO	cgcm3	3	A2
aet-aet	AMNO	cgcm3	4	A2
agx-agx	AMNO	echam5	1	A2
afx-afx	QC	cgcm3	4	A2
agr-agr	QC	cgcm3	5	A2
aha-aha	QC	echam5	N/A	A2
agw-ahb	AMNO	CNRM-CM3.3	N/A	A1B
ahi-ahk	AMNO	echam5	2	A2
ahj-ahw	AMNO	echam5	3	A2

6.4 Les changements climatiques projetés pour le Nord du Québec

Dans cette section nous montreront les projections des changements climatiques pour différents indices bioclimatiques définis dans le chapitre 5 obtenus par l'ensemble de simulations.

6.4.1 Température moyenne, minimale et maximale annuelle

Les normales de la moyenne annuelle de la température moyenne, minimale et maximale sont sur la figure 6.2. Les changements de ces variables sont sur les figures 6.3 - 6.5.

L'ensemble de simulations du MRCC et des MCGs projettent une hausse de la température moyenne annuelle d'environ 2°C (25^e percentile) au-dessus du Labrador et proche de 4°C (75^e percentile) sur l'Ungava. La plus grande augmentation selon les deux ensembles est projetée au nord du Québec. L'augmentation de la température minimale est plus élevée comparé aux autres variables. Les changements simulés par le MRCC sont un peu plus élevés comparés aux MCG surtout sur la Baie-James et au sud du Québec. L'augmentation de la température maximale sera plus importante au nord du Québec aussi. Selon les simulations du MRCC le gradient nord-sud du changement de la température maximale sera moins grand comparé à la température moyenne.

6.4.2 Température moyenne, minimale et maximale saisonnière

Les normales de la température moyenne, minimale et maximale pendant l'hiver sont sur la figure 6.6 et leurs changements attendus pour l'horizon 2050 sur les figures 6.7 - 6.9. Les deux ensembles projettent une augmentation des trois températures la plus importante au nord-ouest du

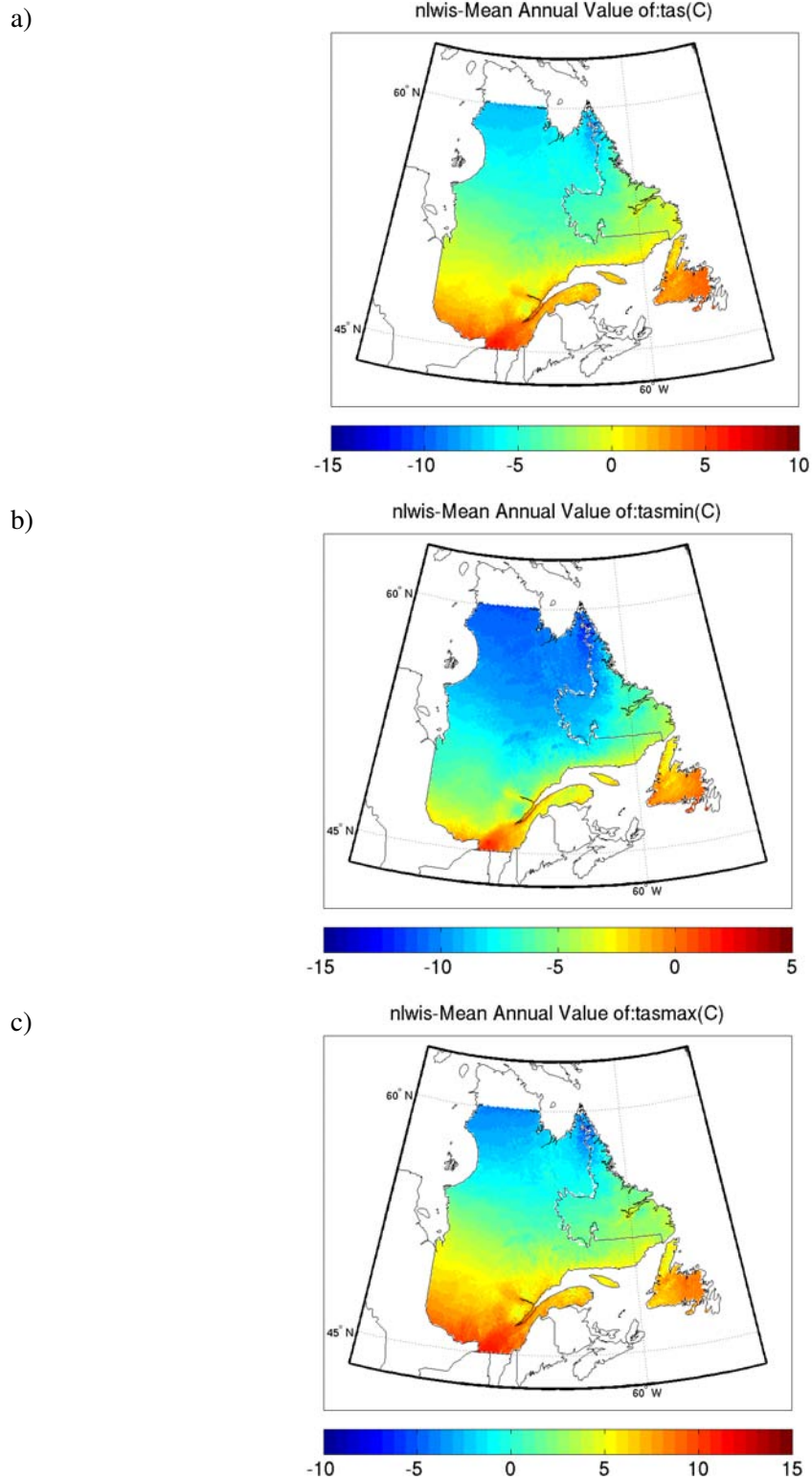


FIGURE 6.2: Normales climatiques de la moyenne annuelle de la température moyenne (a), minimale (b) et maximale (c) (en °C) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

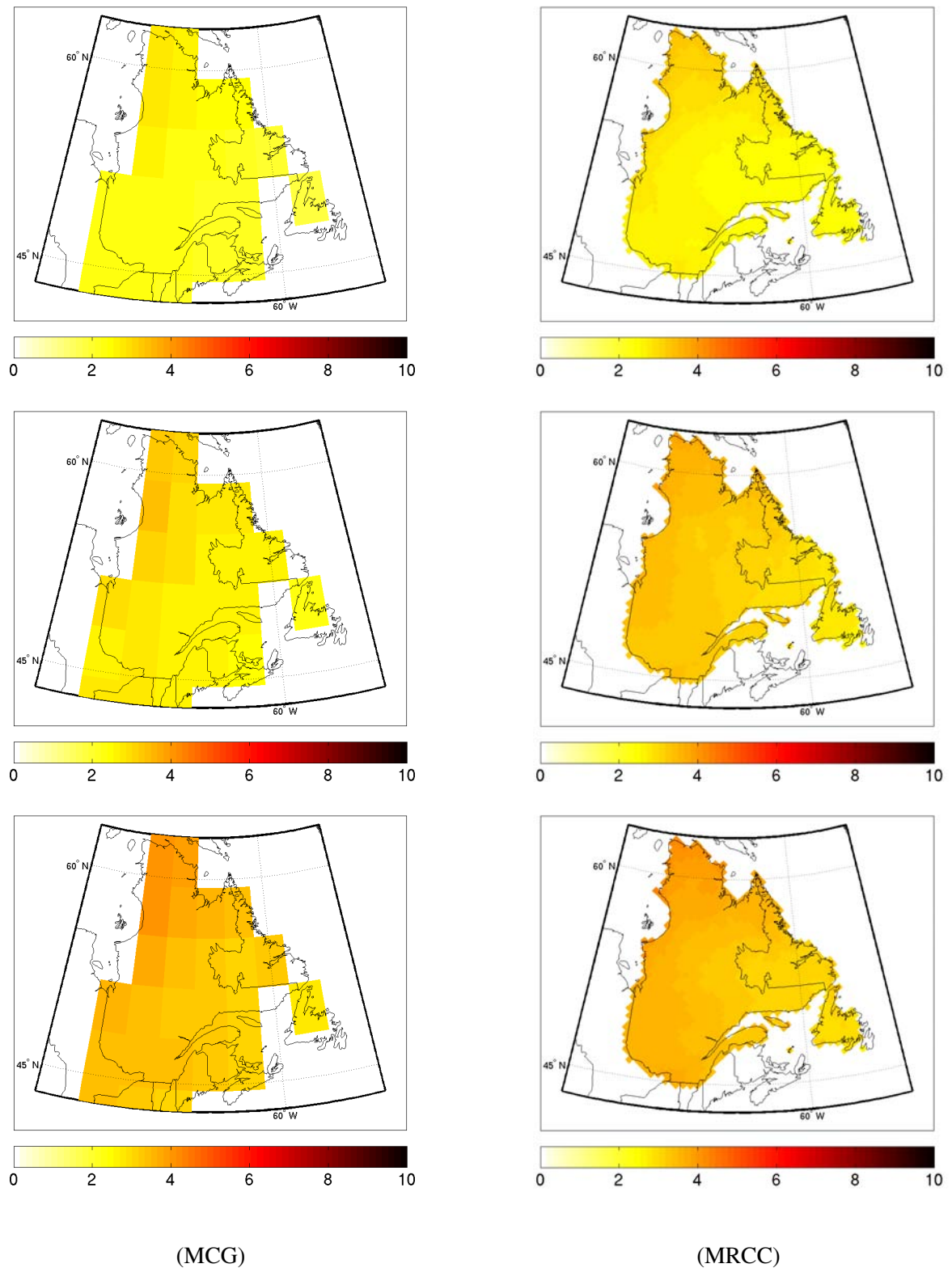


FIGURE 6.3: Deltas de la moyenne annuelle de la température moyenne (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCG et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

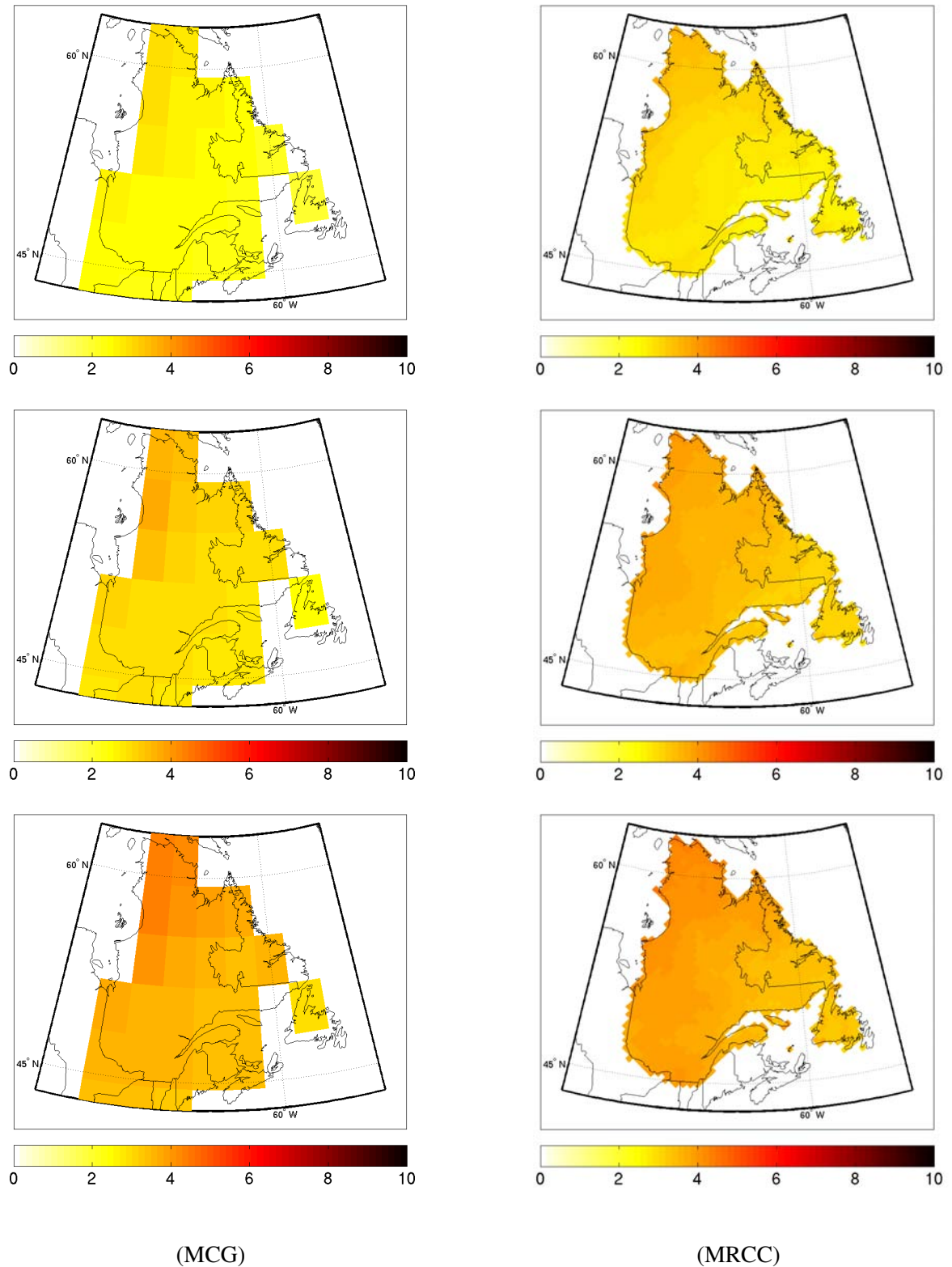


FIGURE 6.4: Deltas de la moyenne annuelle de la température minimale (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

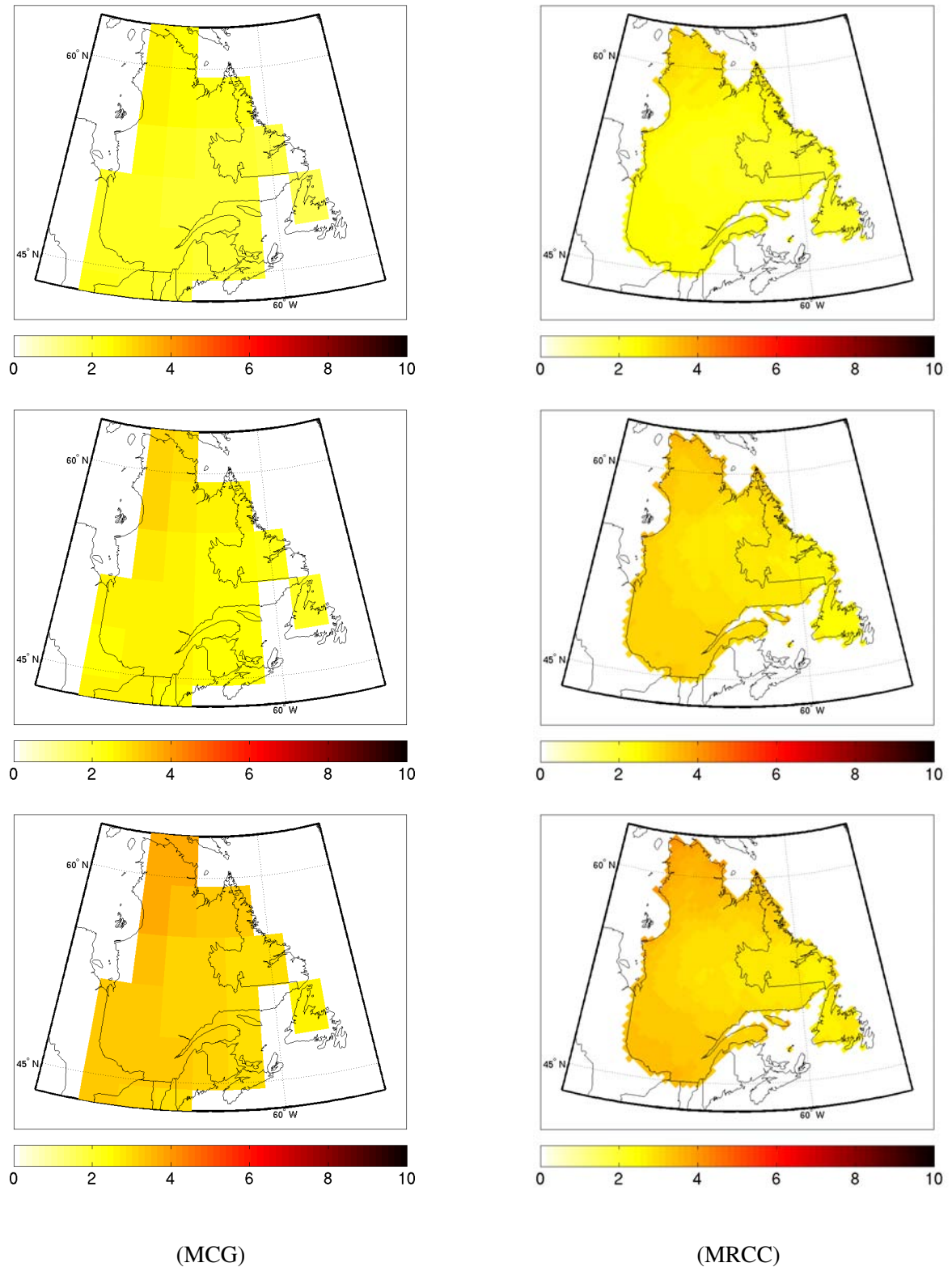


FIGURE 6.5: Deltas de la moyenne annuelle de la température maximale (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

domaine. Selon le MRCC, la médiane de changement de la température moyenne est proche de 6°C sur l'Ungava, la Baie James et la Baie d'Hudson et un peu plus petite que 4°C sur la Péninsule Gaspésienne. L'ensemble des MCGs simule une augmentation beaucoup plus petite que celle du MRCC ; d'environ 2 à 3°C en médiane.

Les changements de la température minimale seront plus importants au sud du Québec que ceux de la température moyenne selon les deux ensembles. Par contre, la température maximale augmentera moins au sud du domaine que la température moyenne. Les régions les plus affectées seront toujours au nord du Québec.

Les normales de la température moyenne, minimale et maximale pour la saison d'été sont montrées sur la figure 6.10. Les figures 6.11 - 6.13 montrent leurs changements projetés pour l'horizon 2050.

Le MRCC simule une augmentation des trois températures qui sera la plus grande au sud du Québec. La médiane des changements de la température moyenne est d'environ 3°C. Au nord, la médiane d'augmentation varie entre 2 et 2.5°C. Au contraire, l'ensemble des MCGs suggère une augmentation plus élevée au nord qu'au sud. La médiane des MCGs projette une hausse de la température moyenne de 2.5°C au sud et de 3°C au nord du Québec. Le 25^e percentile des MCGs donne une augmentation des trois températures égalisée sur tout le domaine ; sans une différence entre le nord et le sud.

6.4.3 Précipitation moyenne annuelle

La normale climatique du taux de précipitation annuelle est montrée sur la figure 6.14. La figure 6.15 montre les deltas des changements projetés pour l'horizon 2050 par l'ensemble de simulations des MCGs et par l'ensemble de simulations du MRCC. Les deux ensembles projettent une augmentation du taux de précipitation dans le futur. Cette augmentation est plus élevée selon le MRCC que les MCG pour tous les percentiles. Ceci peut être expliqué par sa résolution qui est plus fine que celle des modèles globaux. La plus grande hausse du taux de précipitation sera au nord du Québec. La médiane des MCGs envisage 7-8% d'augmentation au sud et 15% au nord. Celle du MRCC est située entre 13% au sud et plus que 25% sur la côte ouest de la Péninsule d'Ungava.

6.4.4 Précipitation moyenne saisonnière

Pour que les changements du taux de précipitation au niveau intra-annuel soient mieux compris, on a fait l'analyse des deltas de la précipitation saisonnière. Les normales du taux de précipitation pendant l'hiver et l'été sont montrées sur les figures 6.16 et 6.18 respectivement. Les changements pour les deux saisons sont montrés sur les figures 6.17 et 6.19. Le taux de précipitation subira une augmentation générale pendant l'hiver surtout importante pour les régions nordiques. La médiane de changements de l'ensemble des MCGs est située autour de 15% au nord et de 10% au sud. Celle du MRCC projette une augmentation plus élevée comparée aux MCGs ; entre 25% au sud et 35% au nord. Sur les côtes de la Baie d'Hudson cette augmentation va jusqu'à 55%. Elle est aussi plus importante au-dessus des montagnes Torngats du à la plus fine résolution du MRCC par

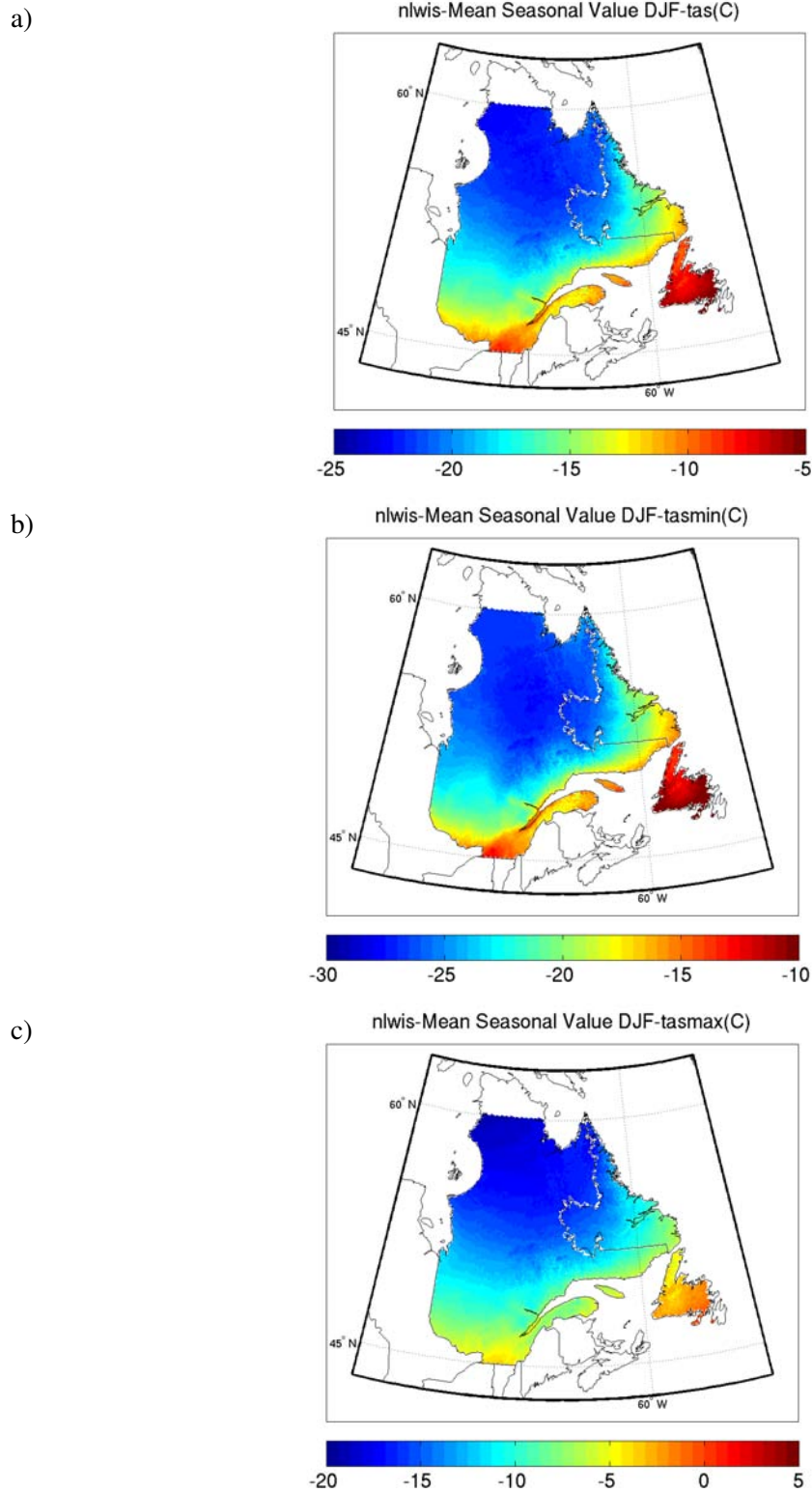


FIGURE 6.6: Normales climatiques de la moyenne saisonnière de la température moyenne (a), minimale (b) et maximale (c) pendant l'hiver (en °C) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

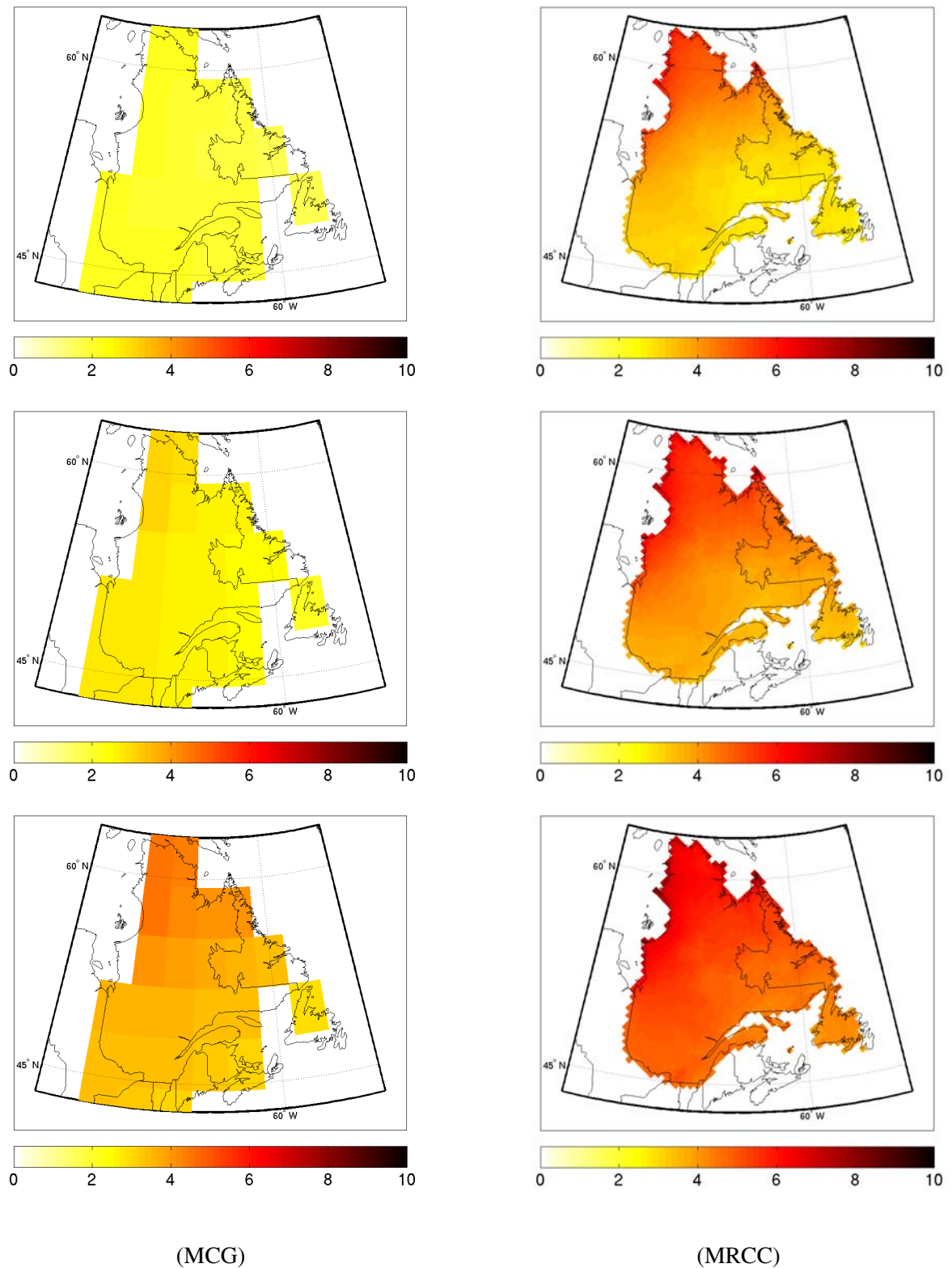


FIGURE 6.7: Deltas de la moyenne saisonnière de la température moyenne pendant l'hiver (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

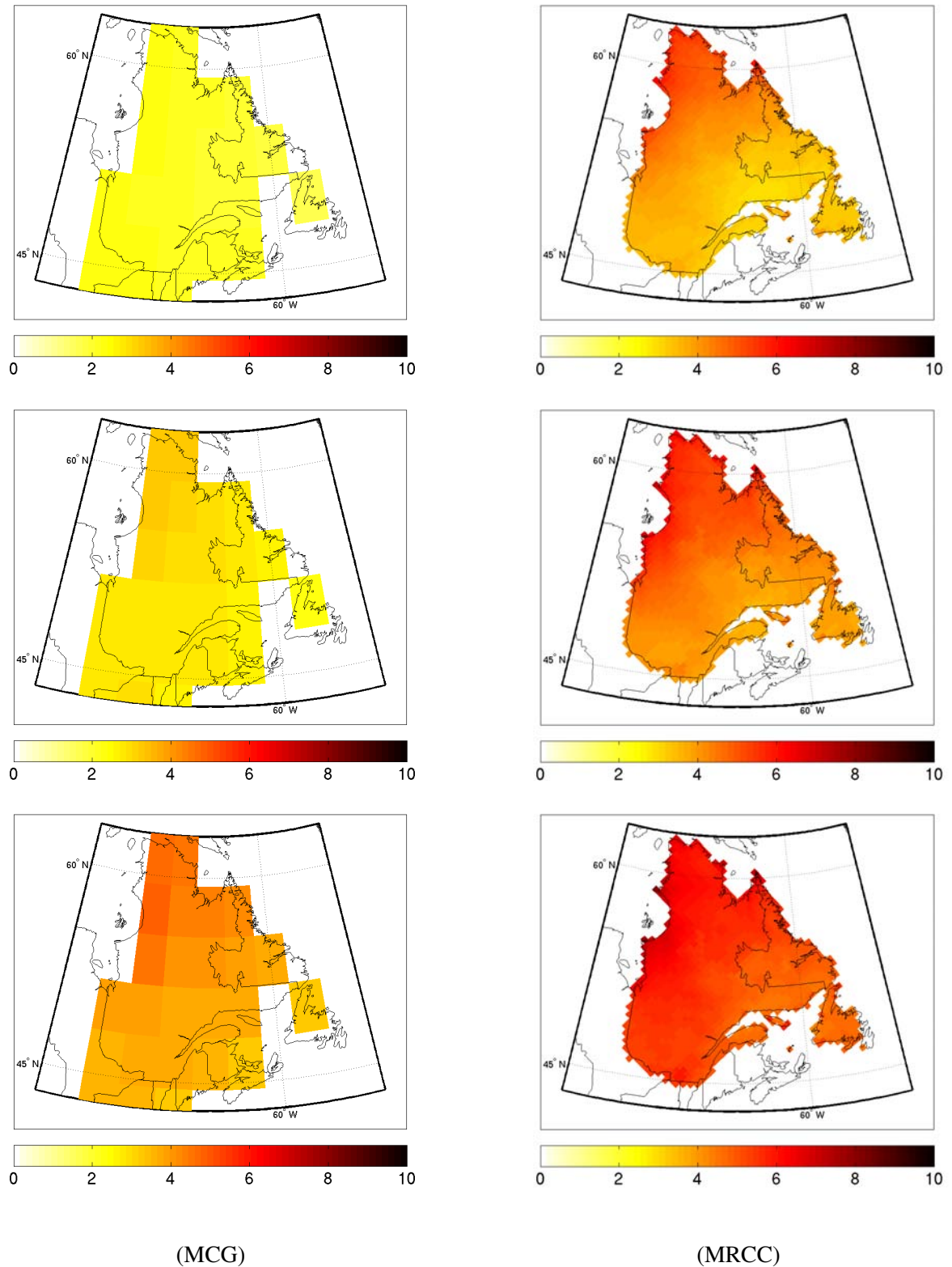


FIGURE 6.8: Deltas de la moyenne saisonnière de la température minimale pendant l'hiver (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

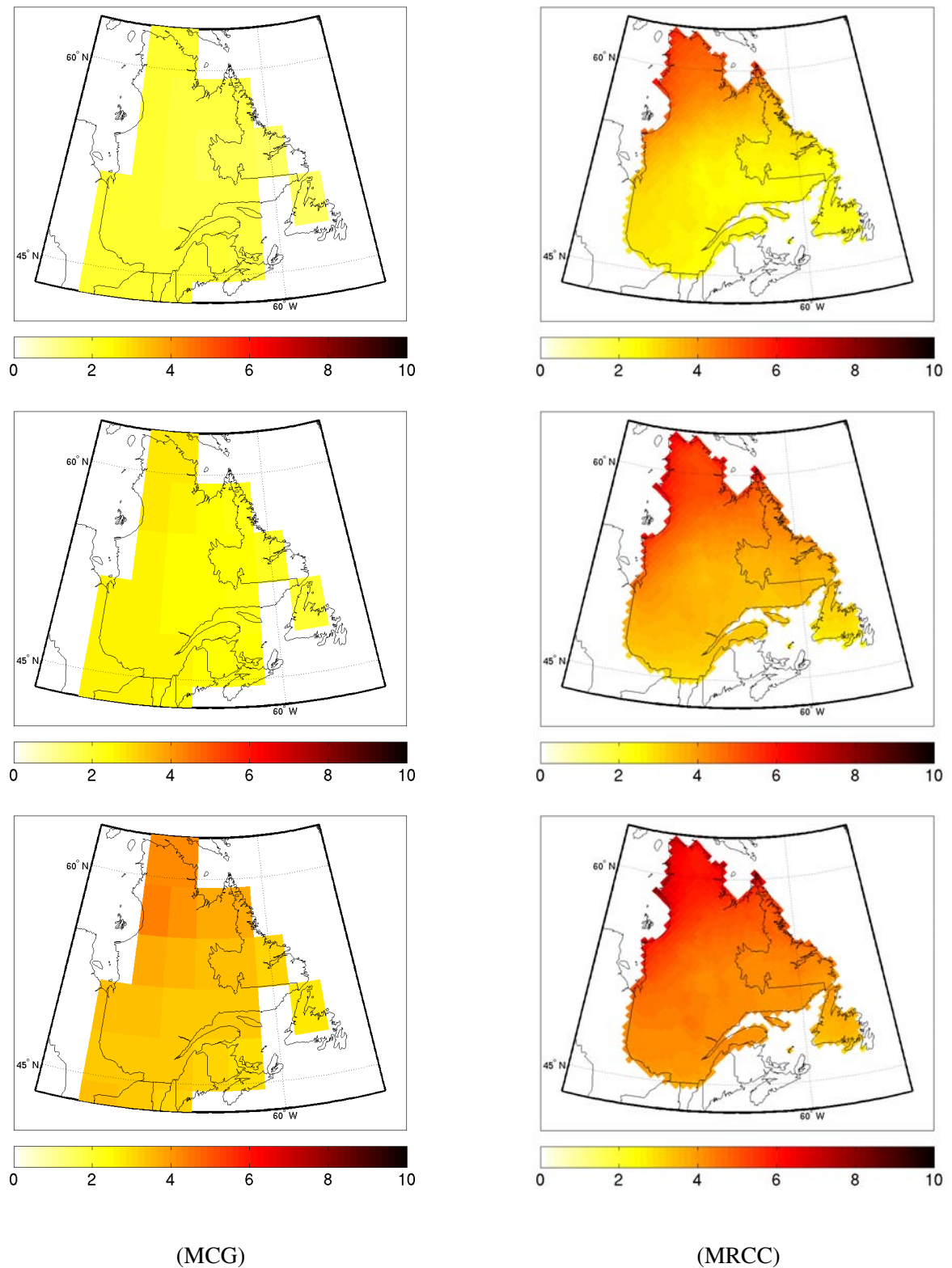


FIGURE 6.9: Deltas de la moyenne saisonnière de la température maximale pendant l'hiver (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

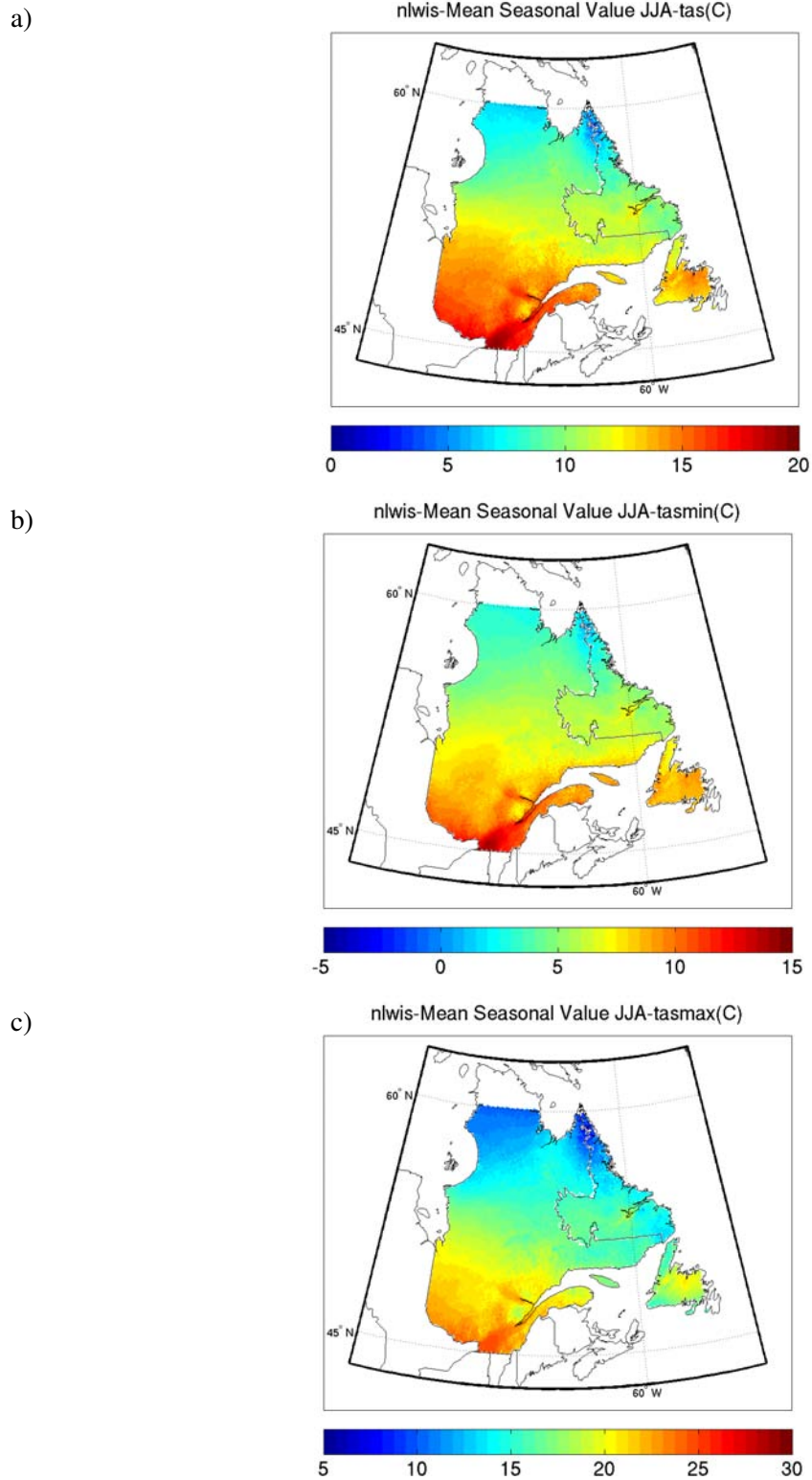


FIGURE 6.10: Normales climatiques de la moyenne saisonnière de la température moyenne (a), minimale (b) et maximale (c) pendant l'été (en °C) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

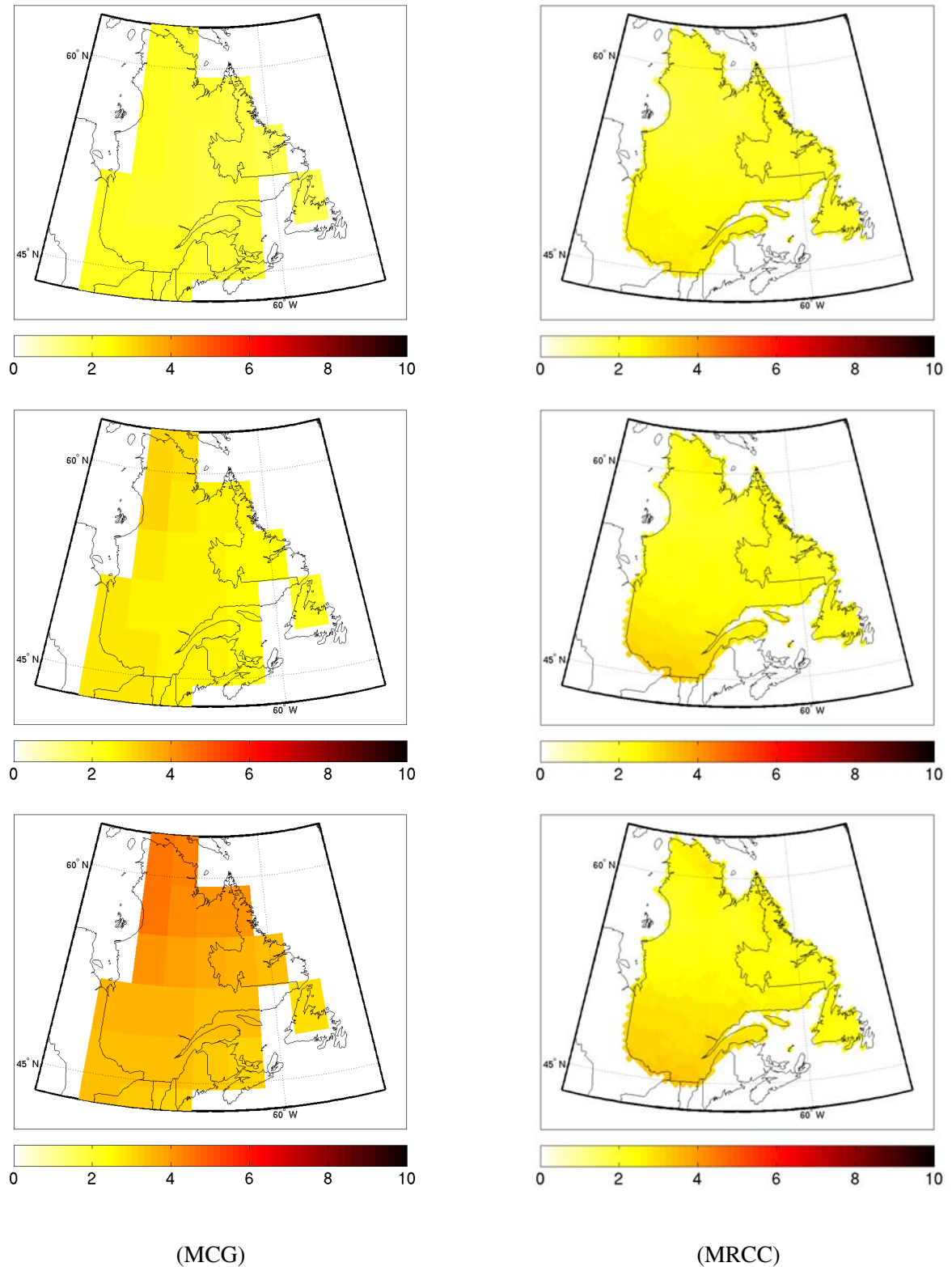


FIGURE 6.11: Deltas de la moyenne saisonnière de la température moyenne pendant l'été (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

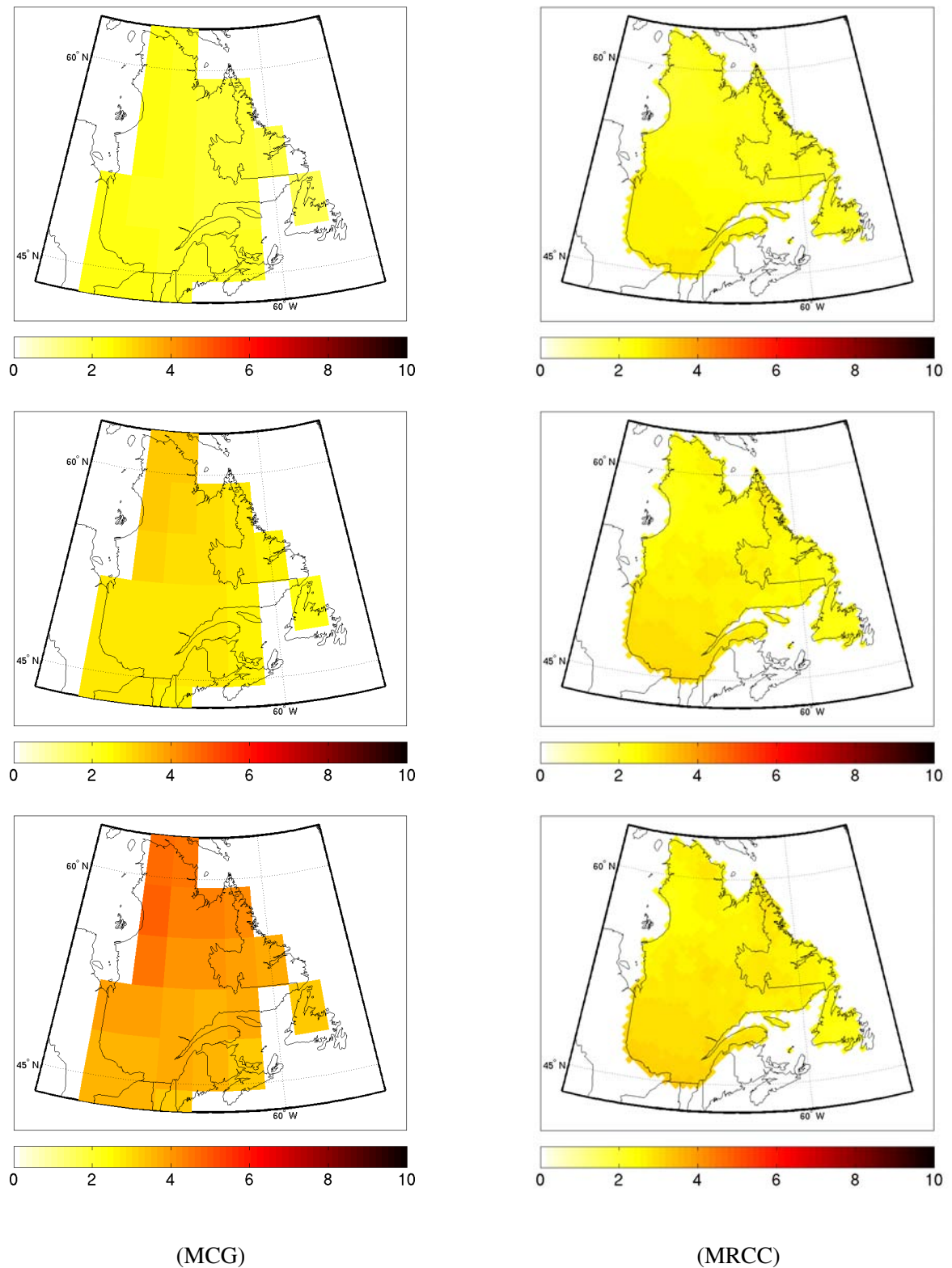


FIGURE 6.12: Deltas de la moyenne saisonnière de la température minimale pendant l'été (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

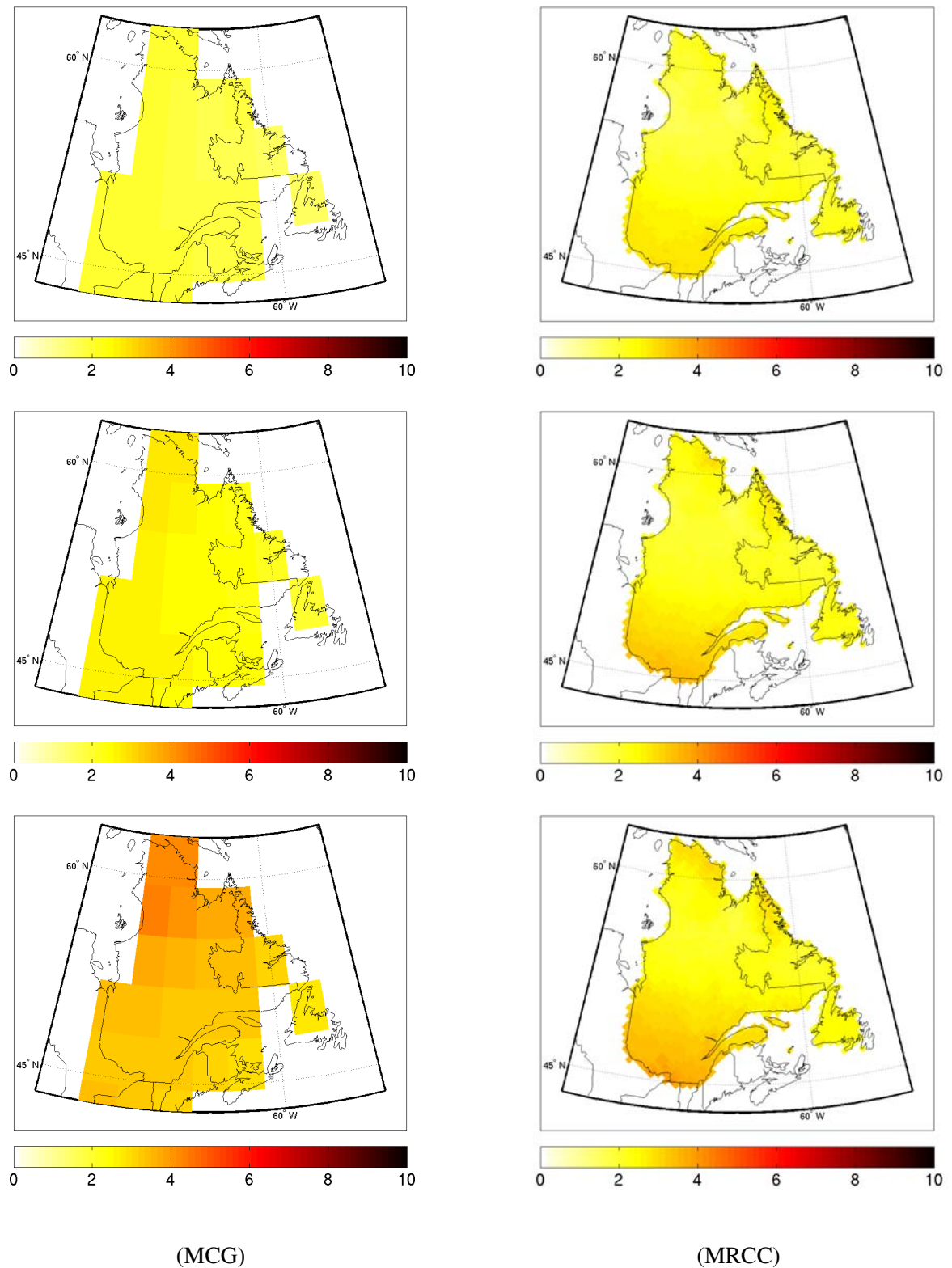


FIGURE 6.13: Deltas de la moyenne saisonnière de la température maximale pendant l'été (en °C) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

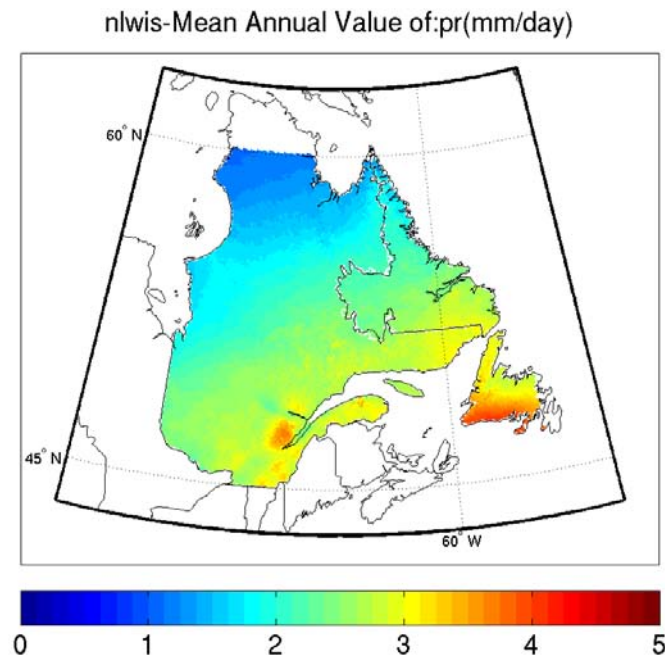


FIGURE 6.14: Normale climatique de la moyenne annuelle du taux de précipitation (en mm/jour) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

rapport aux MCGs qui lui permet de simuler les effets de la topographie, comme c'est déjà expliqué précédemment.

L'ensemble des MCGs projette une augmentation de la précipitation pendant l'été pour le domaine au complet. Seulement le 75^e percentile du MRCC suggère des changements positifs. La médiane des changements simulés par le MRCC montre une diminution de la précipitation de quelques pour cents au sud du Québec et une augmentation entre 10 et 20% au nord. Sur la Côte Nord il y aura très peu de changements. La médiane des MCGs montre une plus petite différence nord-sud par rapport au MRCC allant de 7-8% d'augmentation au sud jusqu'à 15% au nord. Le 25^e percentile des MCGs est positif sur le domaine au complet projetant aucun ou très peu de changements au sud et plus de précipitation au nord, celle du MRCC atteint 10% de diminution le plus au sud du Québec et reste négative au-dessus de la Péninsule de la Gaspésie et sur la Côte Nord. Les 75^e percentiles de deux ensembles sont semblables au nord du Québec ; elles projettent une augmentation du taux de la précipitation autour de 20-25%. Au sud, le MRCC donne plus petits changements que ceux projetés par les MCGs ; moins que 10% comparé à 15% suggéré par les MCGs.

La différence de signe des changements entre différents percentiles du MRCC montre l'existence de l'incertitude dans la projection de la précipitation future ; la précipitation augmentera ou diminuera dépendant de la simulation. Cette incertitude est la plus grande au sud du Québec.

Sur une partie du territoire nordique, le 25^e percentile projette des baisses alors que le 75^e projette des hausses. Alors, devant ces résultats, nous constatons que le signal de changement de

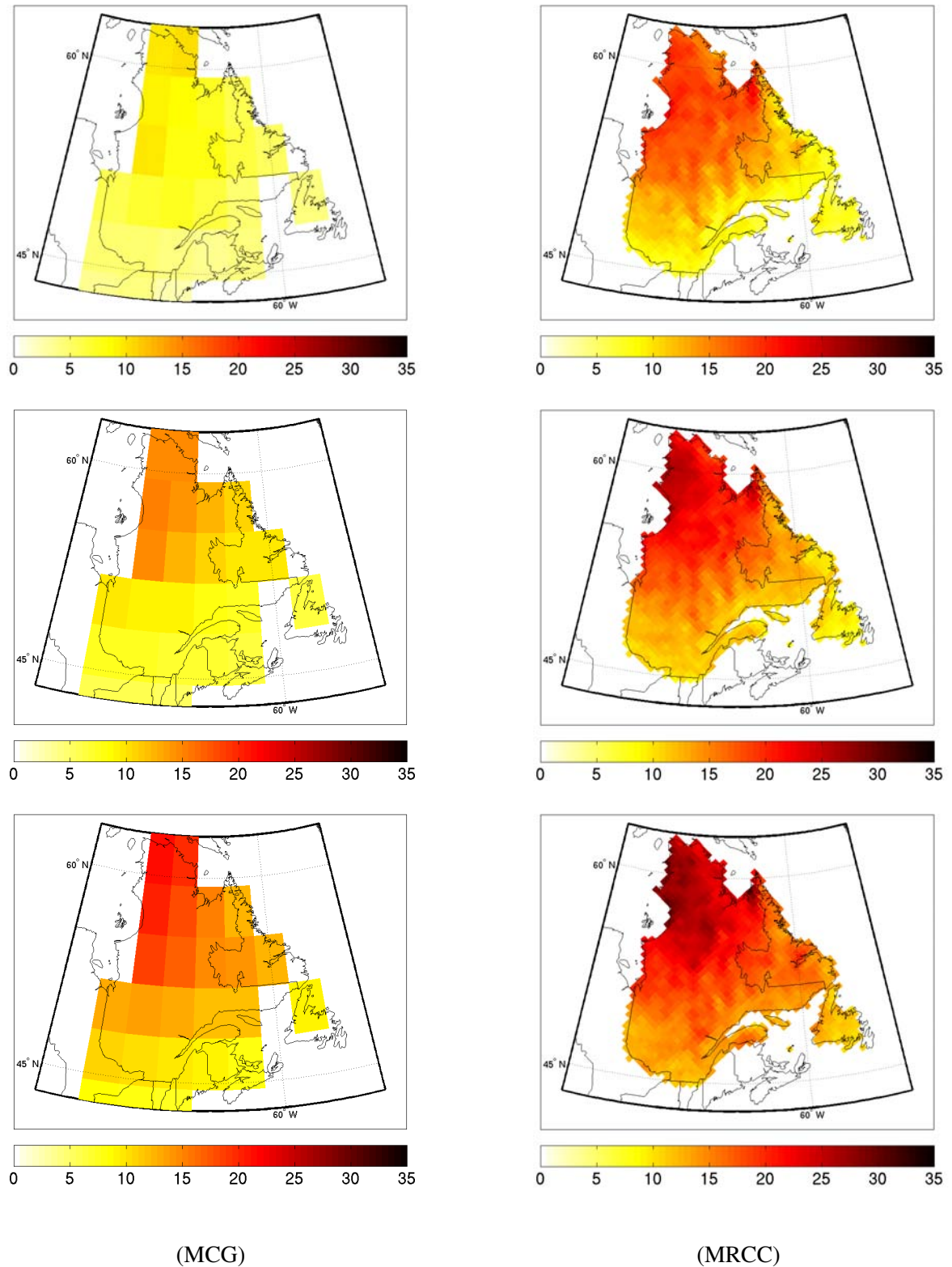


FIGURE 6.15: Deltas de la moyenne annuelle du taux de précipitation (en %) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble des simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

l'ETP au nord est très incertain et qu'il dépend de la simulation. Des analyses plus approfondies permettraient de mieux évaluer les incertitudes sur cette variable.

6.4.5 Longueur de la saison de croissance

Les changements de la longueur de la saison de croissance projetés pour l'horizon 2050 ont été analysés dans cette sous-section. La figure 6.20 montre le climat de référence pour la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C et de 5°C calculé sur la période 1961-1990 à partir des données des observations NLWIS/SNITE. Les figures 6.21 et 6.22 montrent les changements de cette variable pour deux seuils obtenus à partir de l'ensemble des simulations des MCGs et du MRCC. On peut remarquer qu'une augmentation générale de la longueur de la saison de croissance est projetée pour le futur. Ceci concorde bien avec l'augmentation de la température moyenne pendant la période de croissance projetée pour l'horizon 2050 (6.35 et 6.36).

Pour le seuil de 0°C la médiane de changements projetés par les MCG varie entre 20 et 25 jours. L'ensemble des simulations du MRCC grâce à sa résolution plus fine donne un changement un peu plus élevé autour de la Baie d'Hudson, au-dessus des montagnes Torngat et en Gaspésie.

Le changement médian de la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C des MCGs est égale à 20-25 jours. Pour certaines régions celui simulé par le MRCC est un peu plus grand, environ 30 jours. Les 25^e percentiles montrent la plus grande augmentation au sud du Québec. La médiane et les 75^e donnent le plus grand changement au nord. Les régions avec les plus importants changements sont différentes pour deux ensembles de simulations ; les MRCC donnent un grand changement sur la région centrale du domaine et les MCGs projettent un changement relativement petit sur cette région comparée aux autres.

L'important à remarquer la structure du champ produit par le MRCC qui fait sortir la topographie et les zones côtières où les changements sont généralement les plus importants. Ceci est un avantage d'utilisation d'un ensemble des simulations de haute résolution par rapport à un ensemble des MCGs. Cette caractéristique sera remarquée aussi pour d'autres variables analysées dans ce document.

6.4.6 Degrés-jours de la saison de croissance

Les degrés-jours de croissance ont été calculés pour les saisons de croissance définies pour le deux seuils de 0°C et de 5°C. Pour chacune saison de croissance, les degrés-jours sont accumulés à partir des trois seuils de la température : 0°C , 5°C et 10°C. Les normales climatiques sur les deux périodes pour trois seuils sont montrées sur les figures 6.23 et 6.24 . Les deltas des changements de nombre de degrés-jours pour l'horizon 2050 sont montrés sur les figures 6.25 - 6.30 .

On peut remarquer une augmentation du nombre de degrés-jours de croissance pour les trois seuils de la température pendant les deux saisons de croissances. La plus grande augmentation est projetée pour le sud du Québec et elle diminue graduellement vers le nord. Avec l'augmentation du seuil utilisé, de 0 à 10°C, le changement du nombre de degrés-jours de croissance diminue pour les deux saisons de croissance. Par exemple, pour le seuil de 10°C pendant la saison de croissance

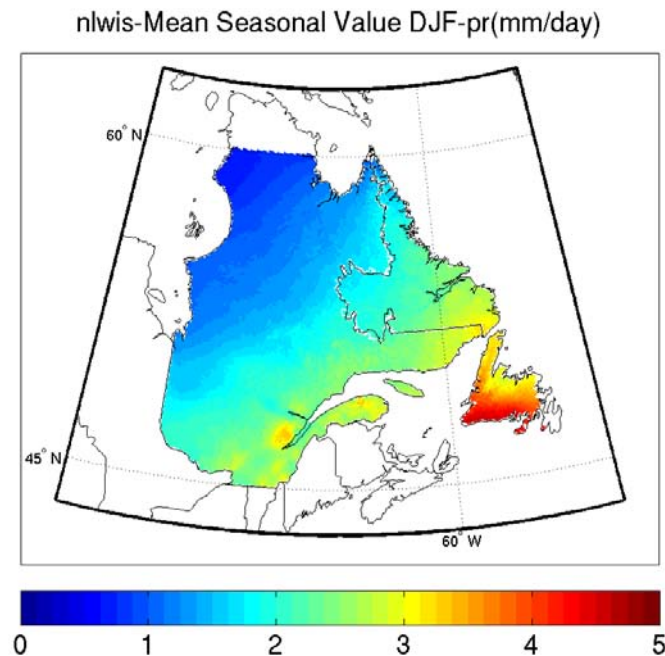


FIGURE 6.16: Normale climatique de la moyenne saisonnière du taux de précipitation pendant l'hiver (en mm/jour) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

définie à partir de 0°C , le nombre de degrés-jours de croissance changera peu au nord du Québec (6.27). La médiane des deltas du nombre de degrés-jours pour le seuil égal à 0°C pendant la saison de croissance de 5°C changera entre 200 et 300 sur la même région (6.28).

6.4.7 Longueur de la saison de dormance

La figure 6.31 montre la normale climatique de la longueur de la saison de dormance obtenue à partir des observations NLWIS/SNITE pour la période 1961-1990. Les changements de la longueur de la saison de dormance sont montrés sur les figures 6.32 et 6.33. On peut remarquer sur ces figures une diminution de la longueur de la saison de dormance pour l'horizon 2050 qui est en accord avec l'augmentation projetée de la longueur de la saison de croissance (6.21 et 6.22). La médiane de changements de la saison de dormance définie pour le seuil de 0°C montre une baisse d'environ 25 jours selon le MRCC et entre 20 et 25 jours selon les MCG. Cette diminution est un peu plus grande que 25 jours pour la saison de dormance définie pour le seuil de 5°C simulée par le MRCC et proche de 25 jours selon l'ensemble des MCGs.

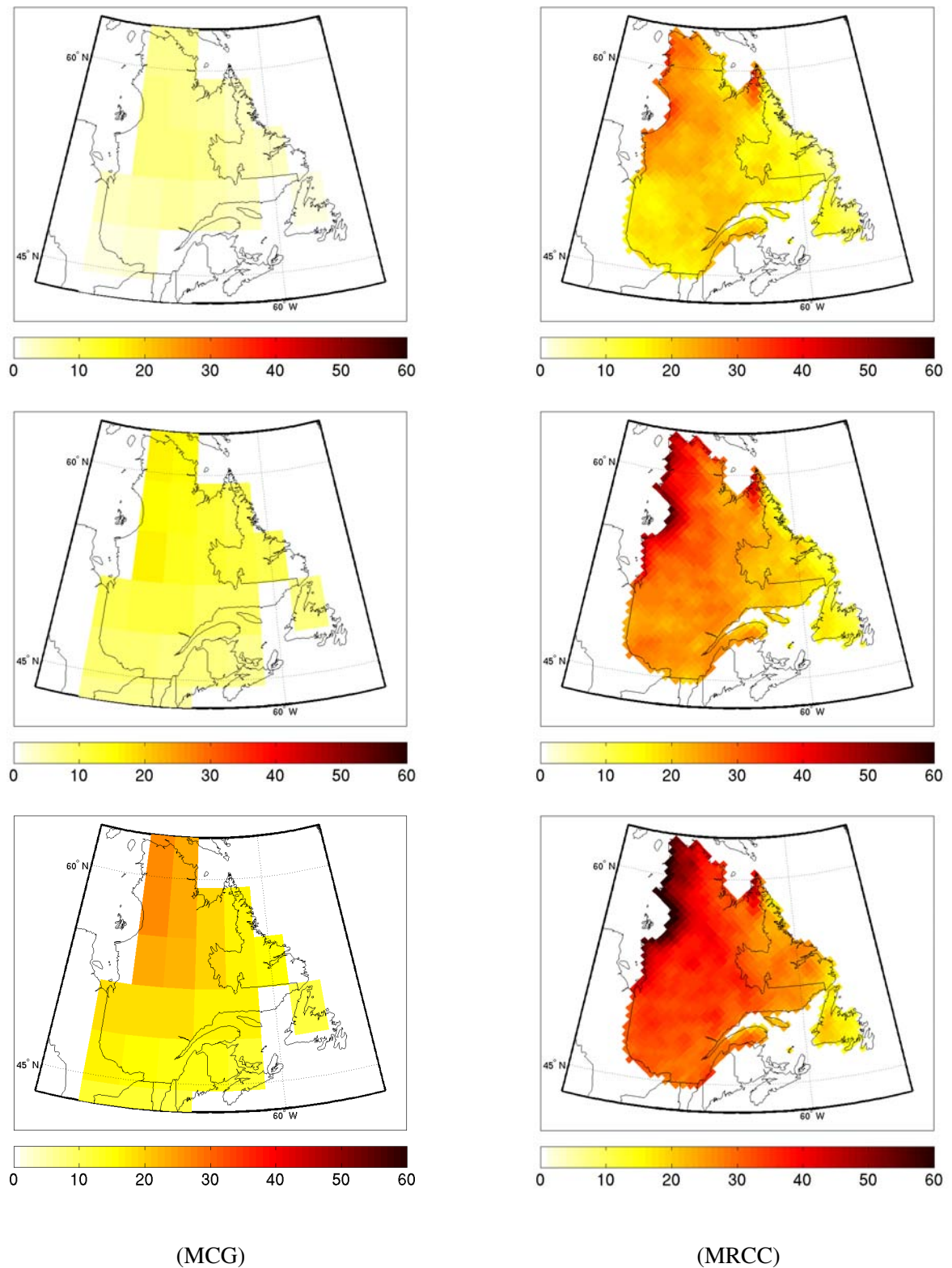


FIGURE 6.17: Deltas de la moyenne saisonnière du taux de précipitation pendant l'hiver (en %) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

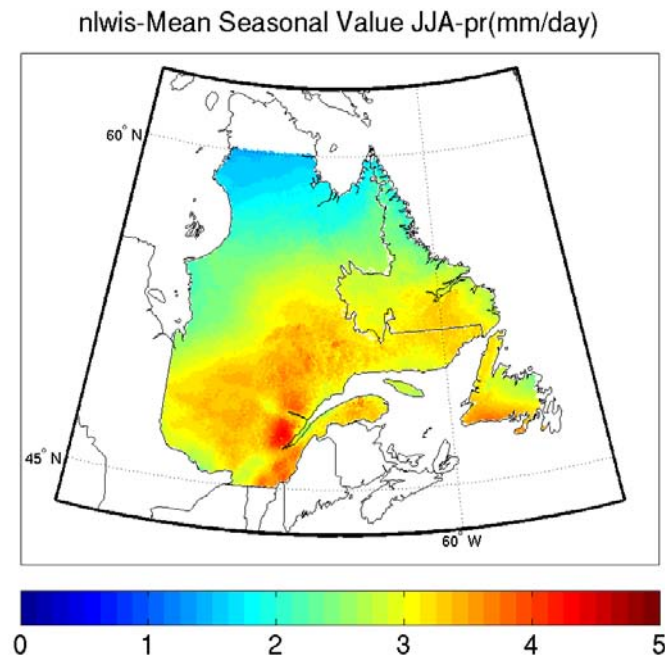


FIGURE 6.18: Normale climatique de la moyenne saisonnière du taux de précipitation pendant l'été (en mm/jour) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

6.4.8 Température moyenne, minimale et maximale pendant la saison de croissance

Les normales climatiques de la température moyenne pendant la saison de croissance définie pour deux seuils sont montrées sur la figure 6.34 et leurs changements sur les figures 6.35 et 6.36. La médiane des changements de la température moyenne pendant la saison de croissance de 0°C simulés par l'ensemble des MCGs varie entre 1 et 1.5°C (6.35). Les changements les moins importants sont attendus au nord-est du domaine ; sur Labrador. Le 75^e percentile des MCGs suggère la plus grande augmentation de la température sur l'Ungava alors que celle du MRCC envisage les plus importants changements au sud du Québec. Les autres deux percentiles des deux ensembles projettent la plus grande hausse de la température au sud du domaine.

Les résultats sont en général similaires pour la saison de croissance de 5°C. Pourtant dans ce cas, tous les percentiles des MCGs suggèrent des changements plus élevés au sud du Québec qu'au nord. L'ensemble du MRCC envisage le même patron des changements.

Les normales de la température minimale et maximale pendant la saison de croissance définie pour les deux seuils, de 0°C et de 5°C, sont montrées sur les figures 6.37 et 6.40.

Les deltas projetés pour l'horizon 2050 par les ensembles des MCGs et du MRCC montrent l'augmentation générale des deux variables (figures 6.38, 6.39, 6.41 et 6.42). Généralement, les changements attendus sont plus grands pour la température minimale que pour la température maximale pendant les deux périodes de croissance analysées. En général, les changements des deux

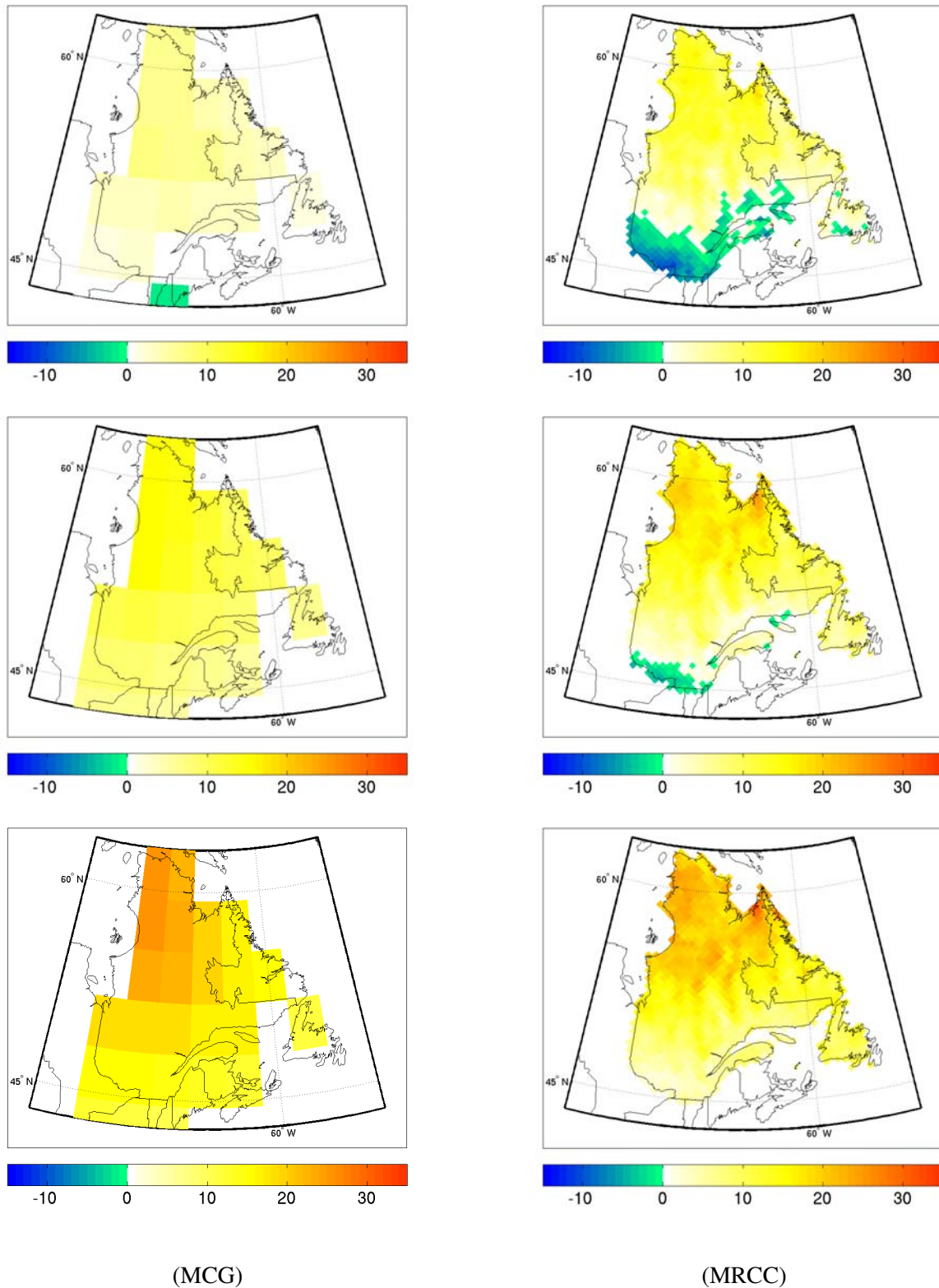
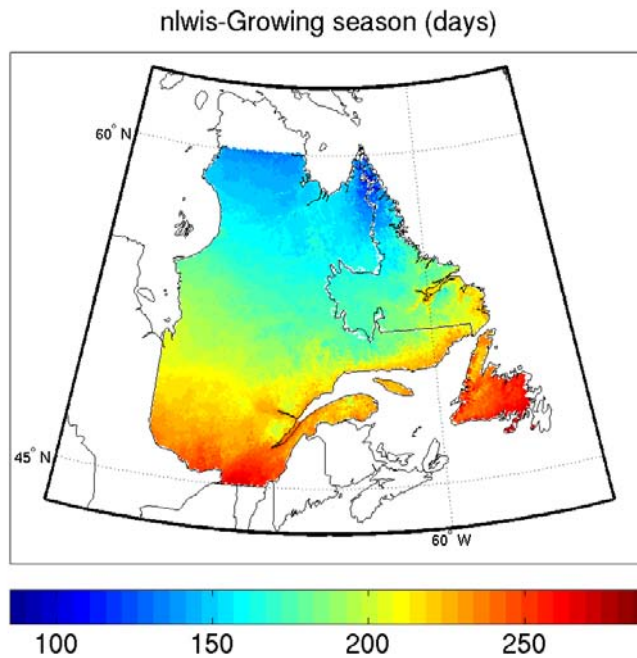


FIGURE 6.19: Deltas de la moyenne saisonnière du taux de précipitation pendant l'été (en %) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

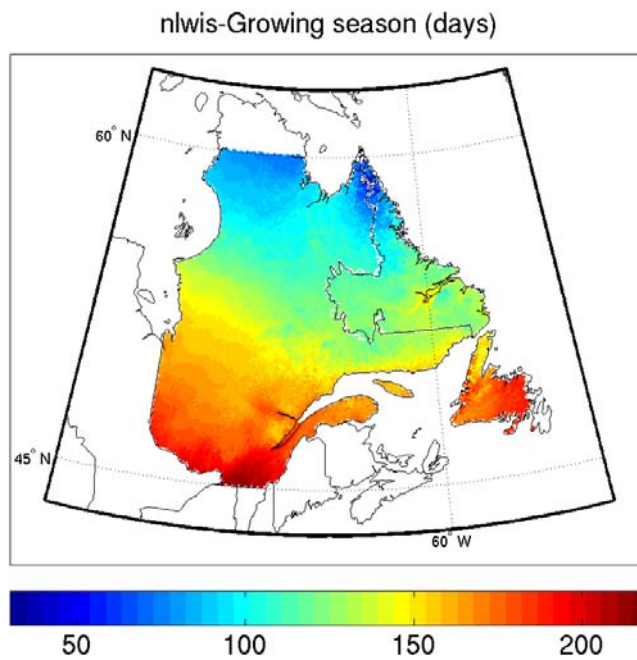


FIGURE 6.20: Normales climatiques de la longueur de la saisons de croissance (en jours) calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

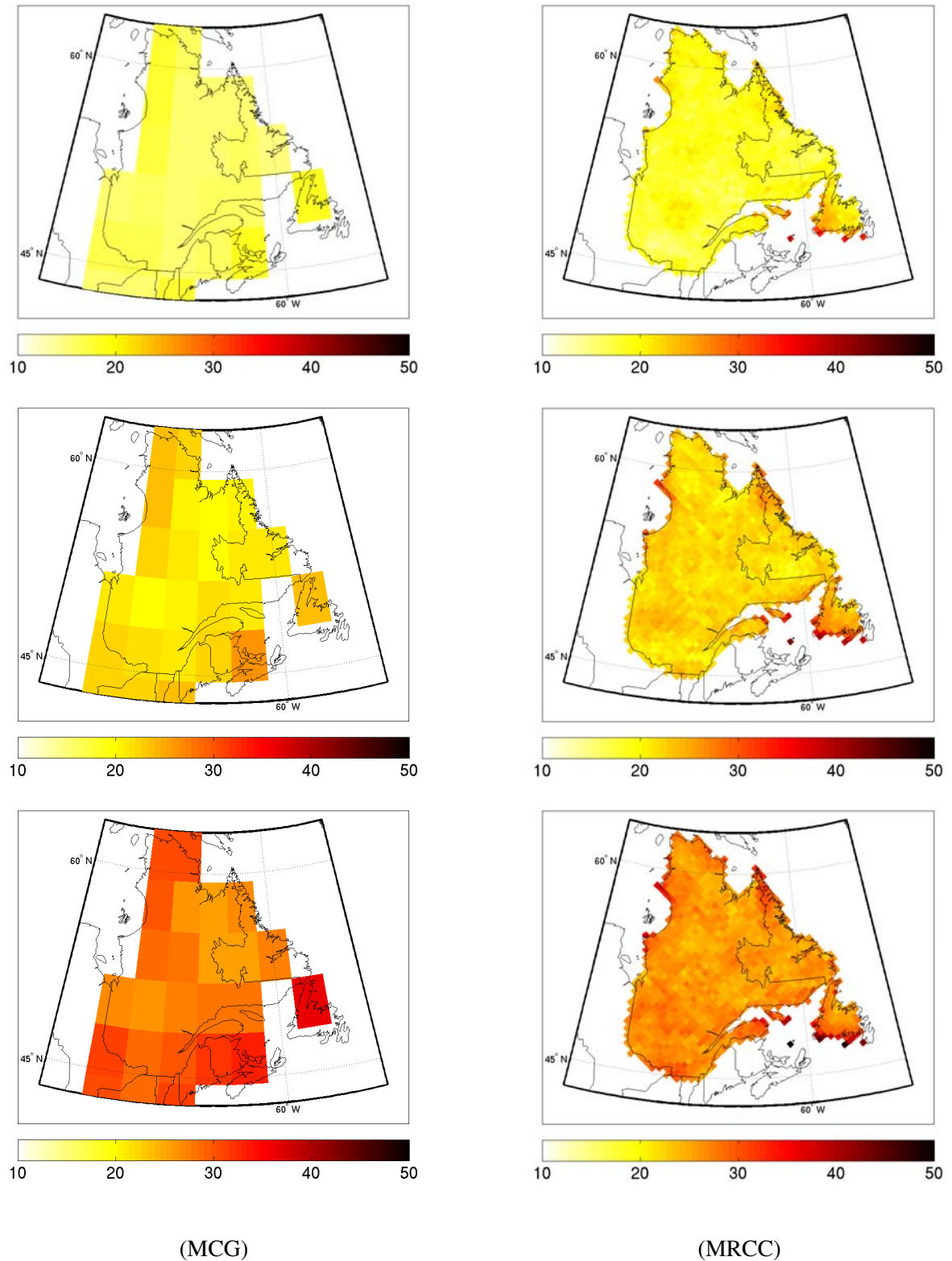


FIGURE 6.21: Deltas de la longueur de la saisons de croissance (en jours) pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

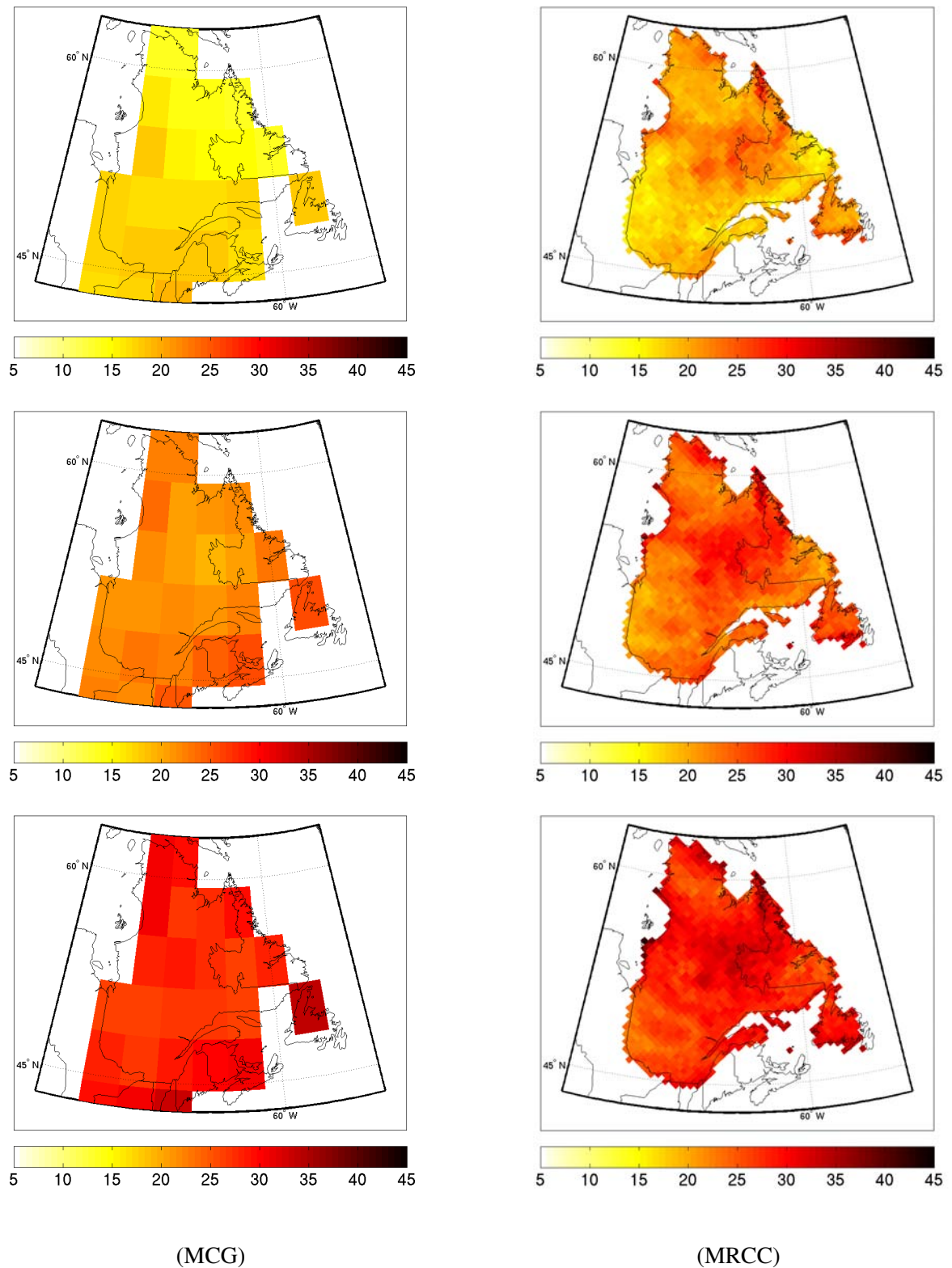


FIGURE 6.22: Deltas de la longueur de la saisons de croissance (en jours) pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

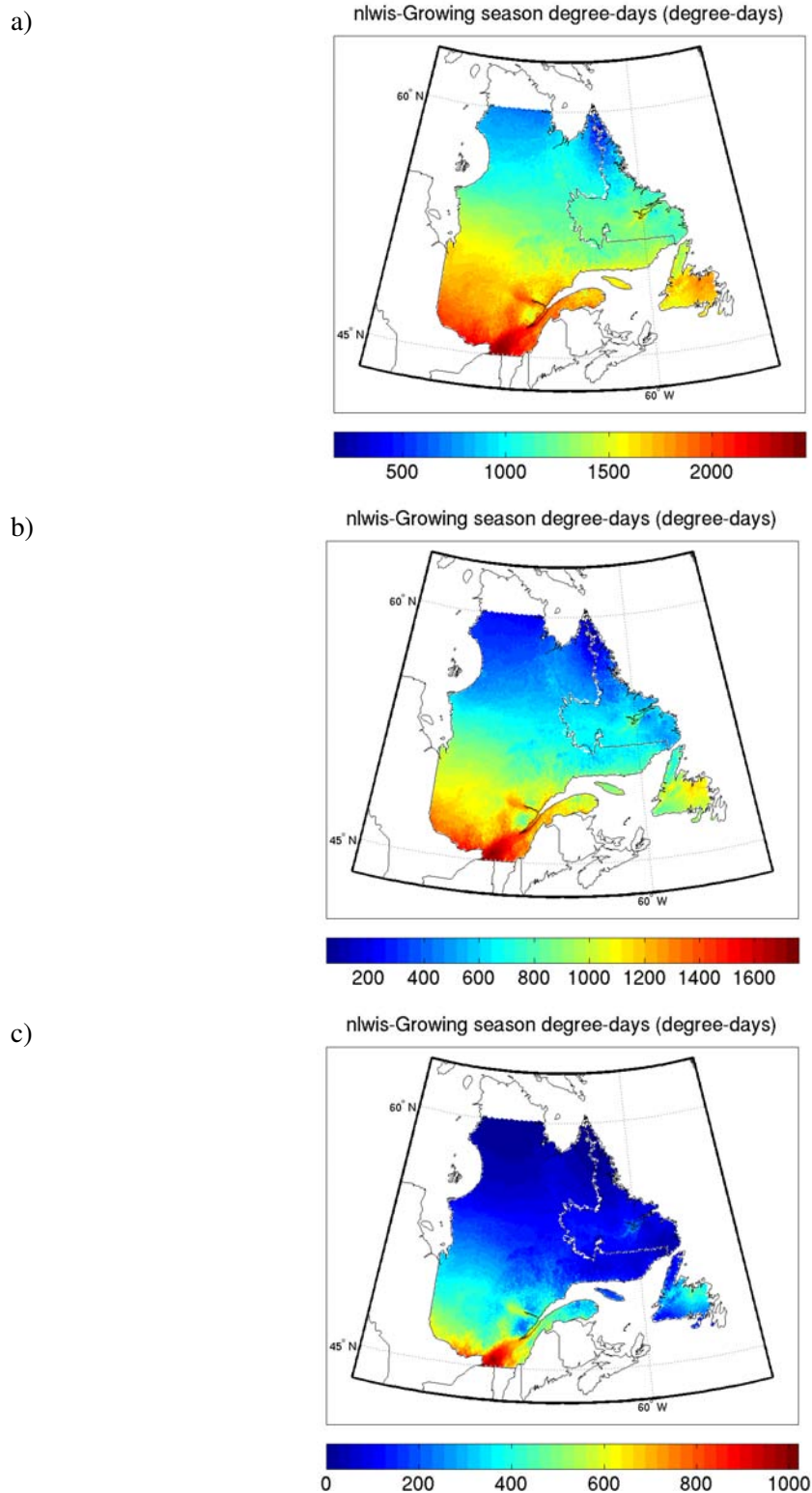


FIGURE 6.23: Normales climatiques du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 0°C (a), 5°C (b) et 10°C (c) pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

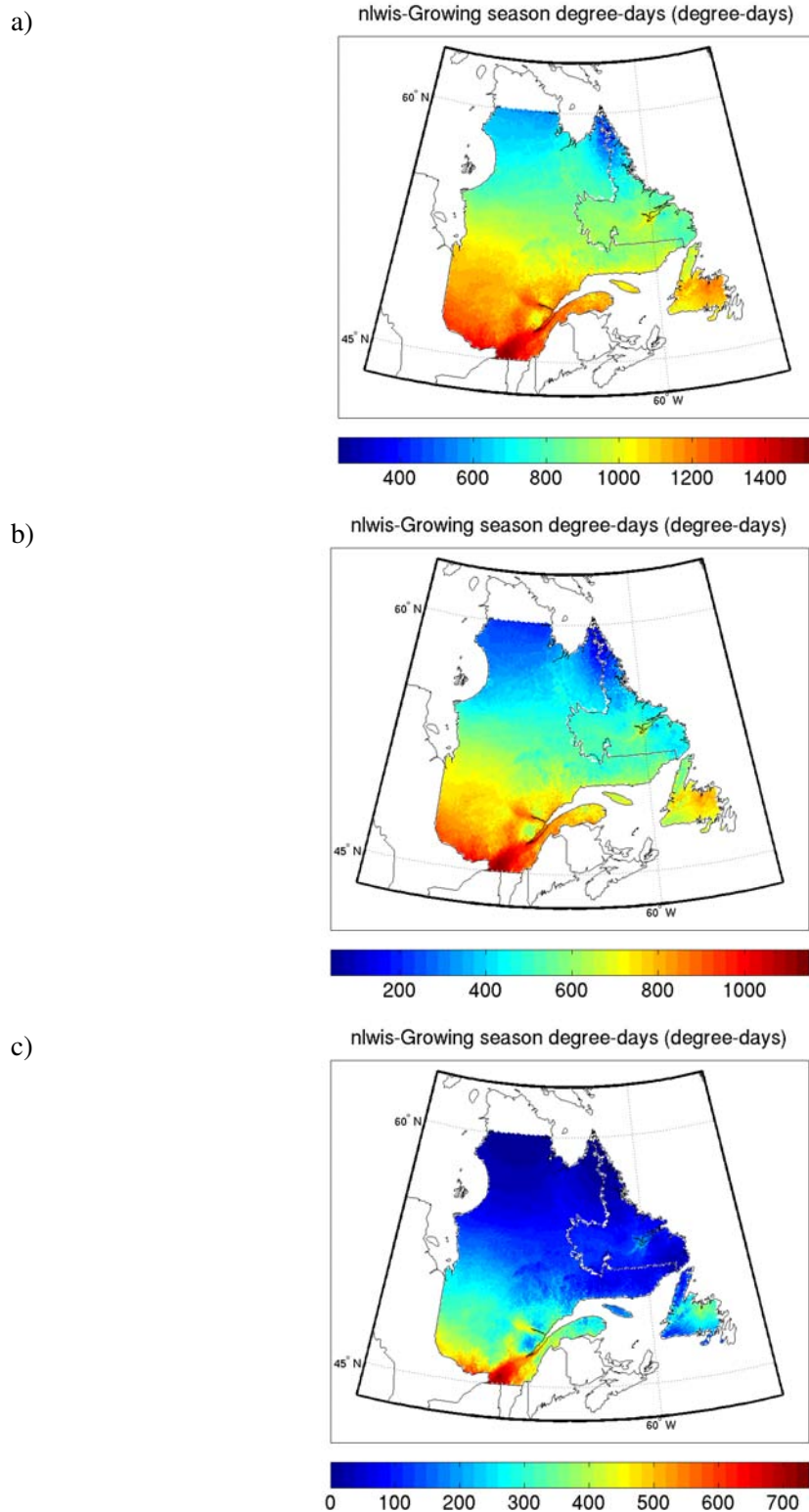


FIGURE 6.24: Normales climatiques du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 0°C (a), 5°C (b) et 10°C (c) pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

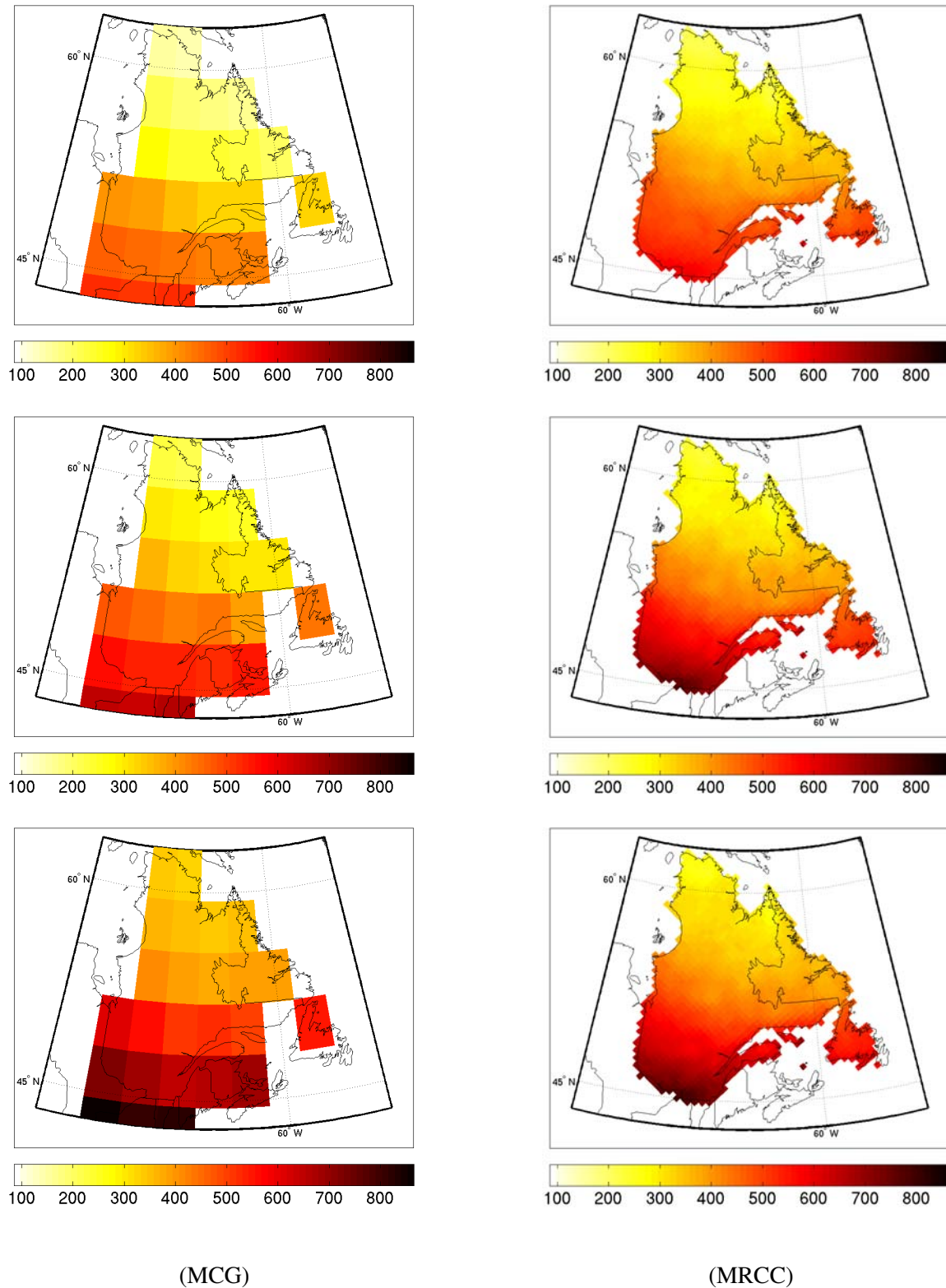


FIGURE 6.25: Deltas du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 0°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

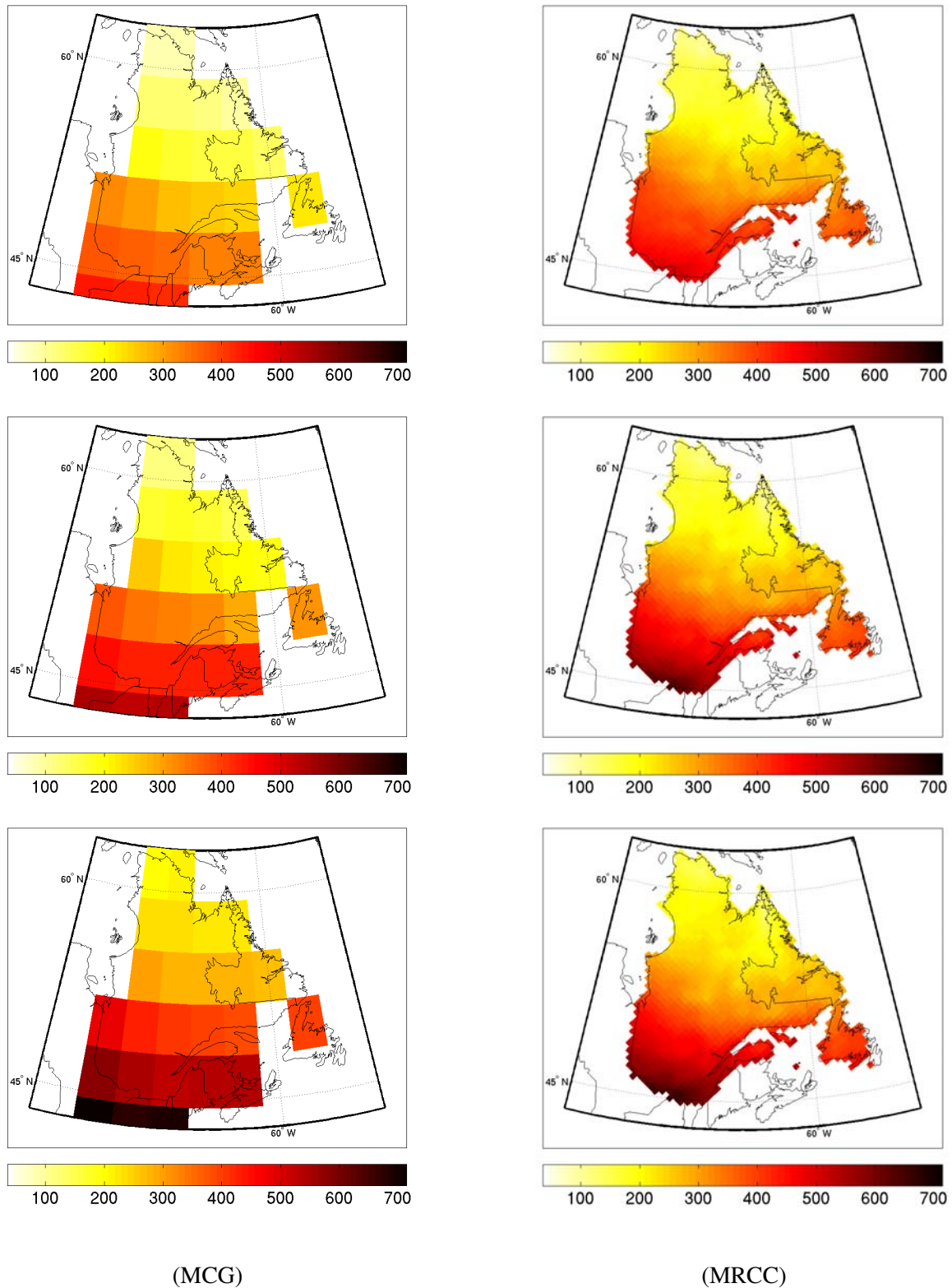


FIGURE 6.26: Deltas du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 5°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

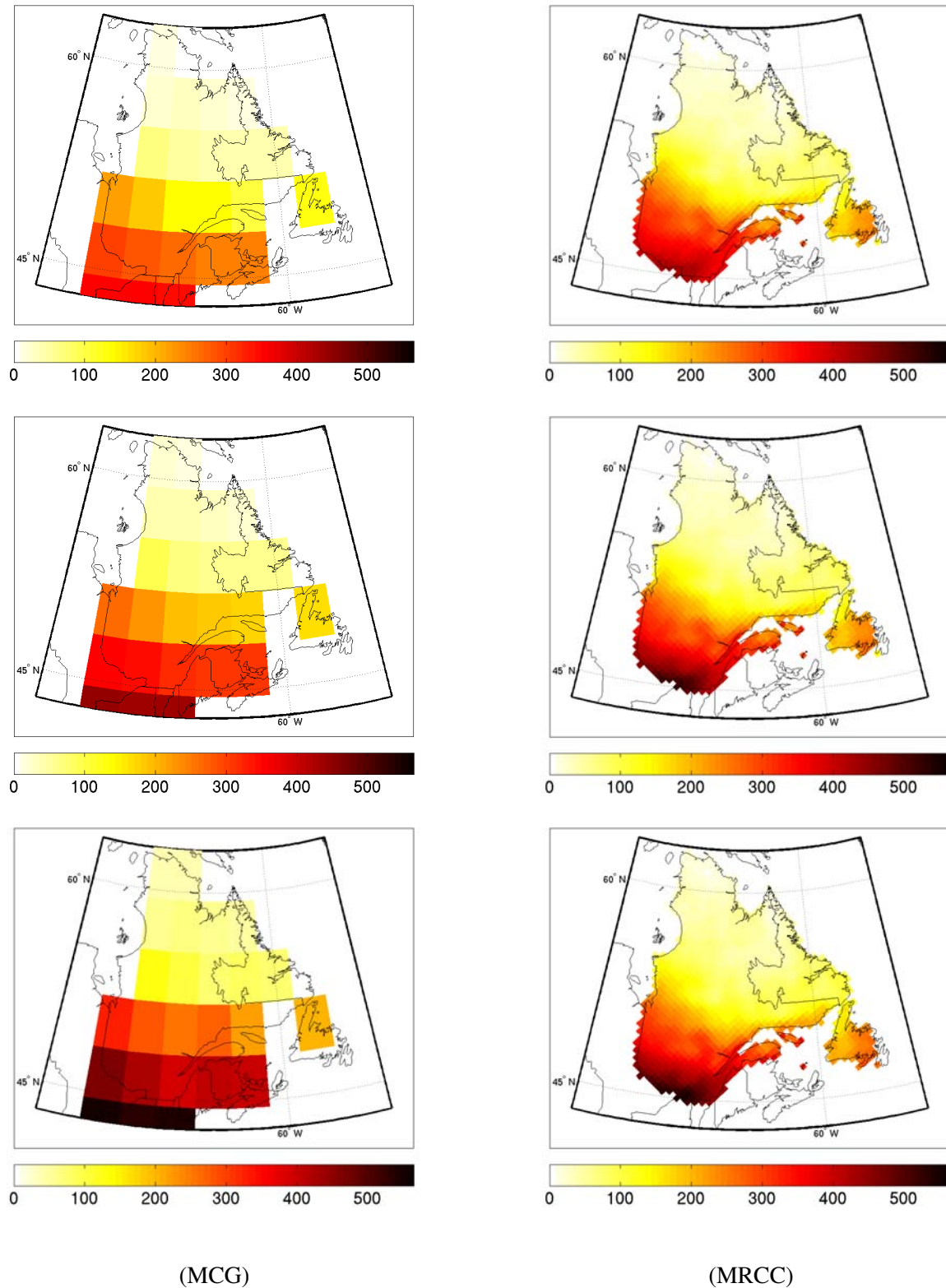


FIGURE 6.27: Deltas du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 10°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

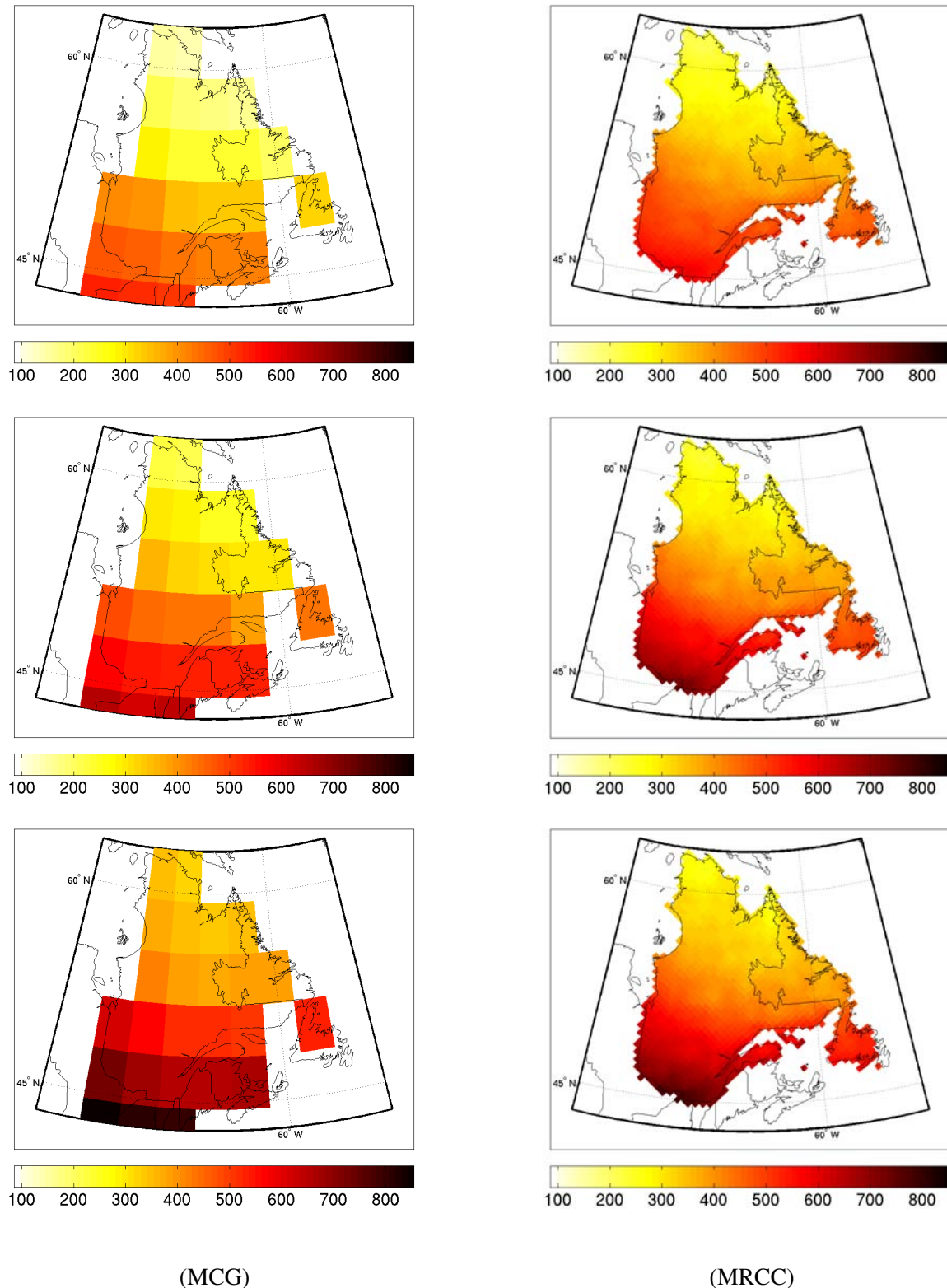


FIGURE 6.28: Deltas du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 0°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

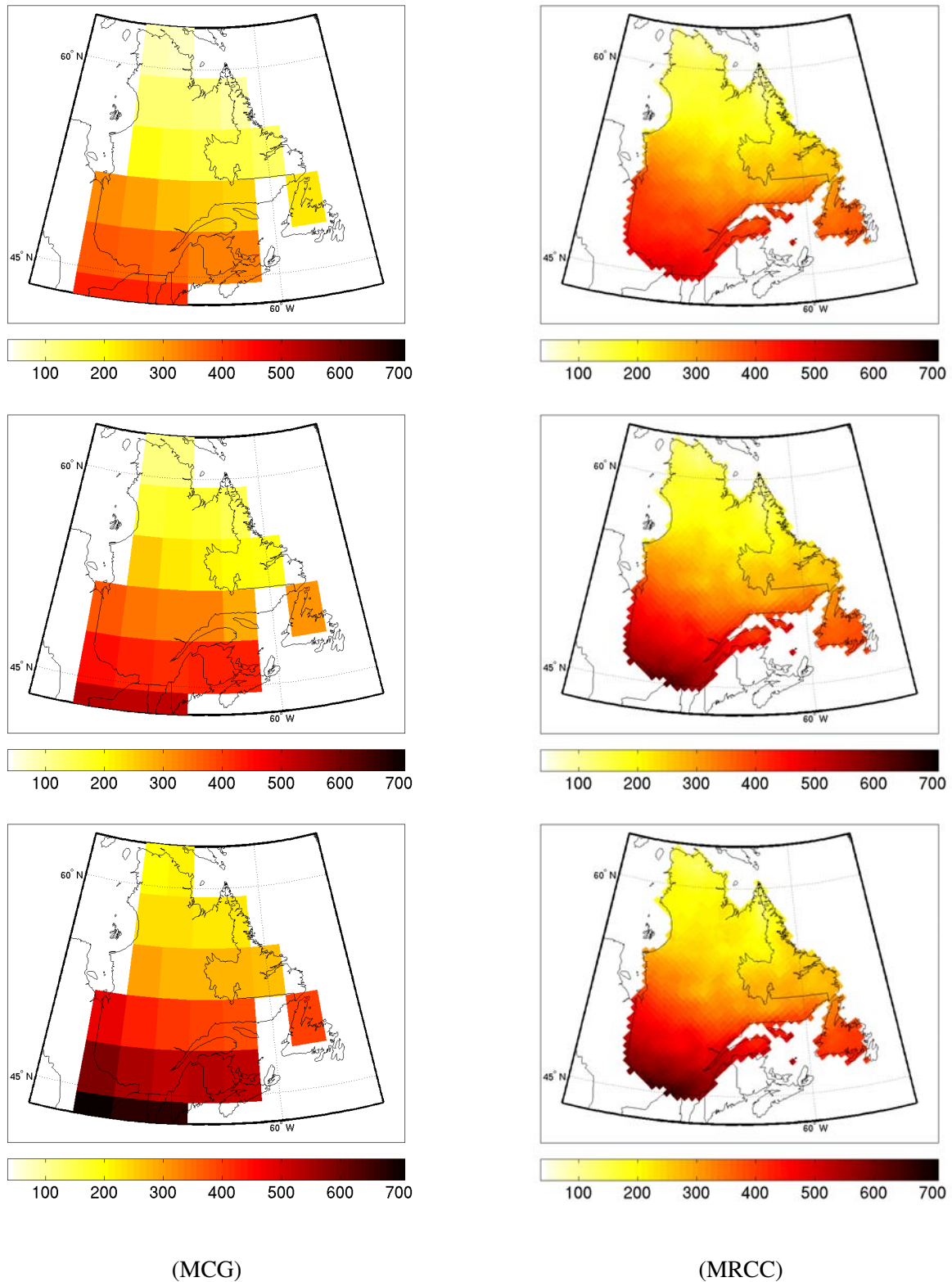


FIGURE 6.29: Deltas du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 5°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

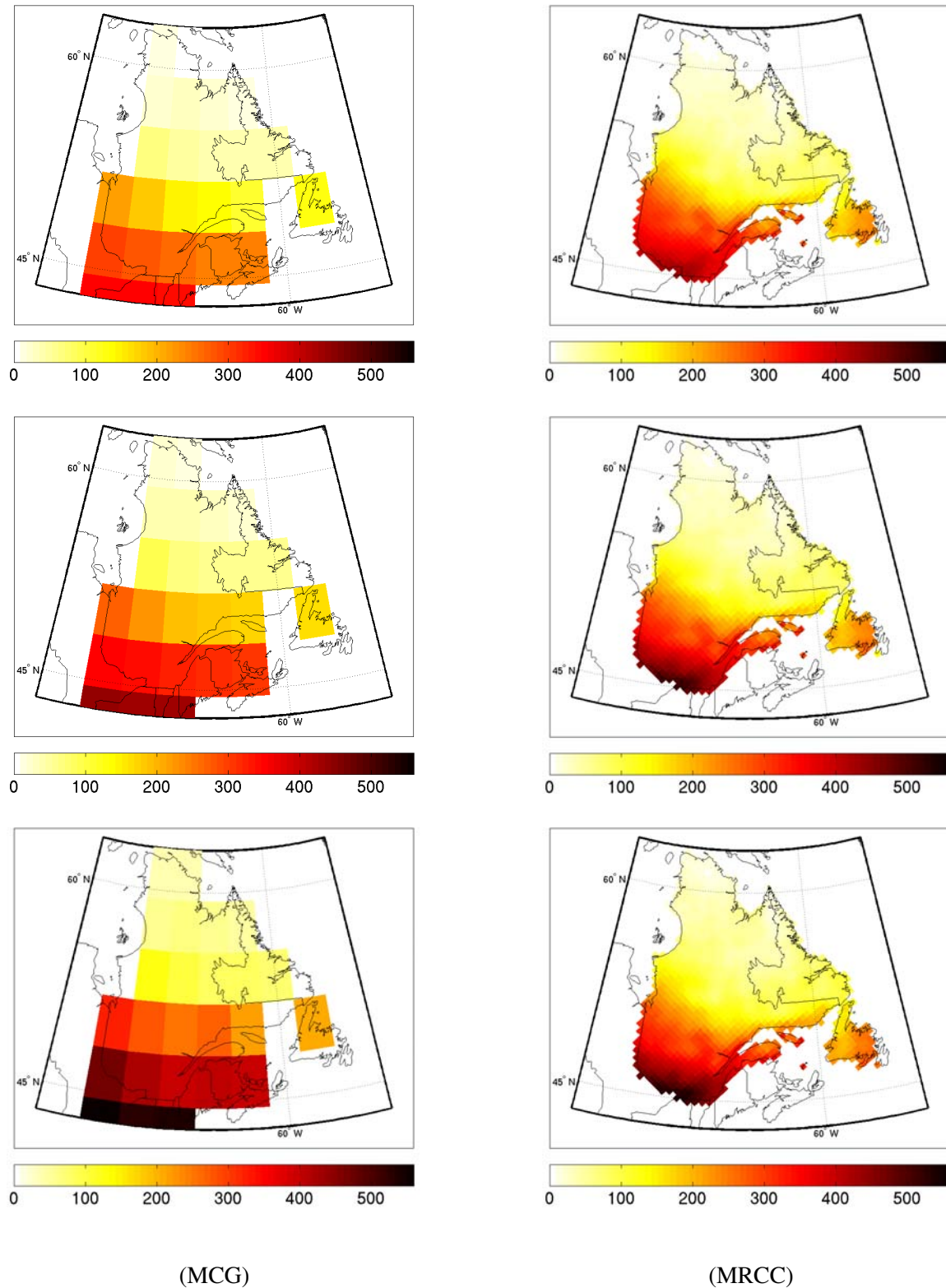
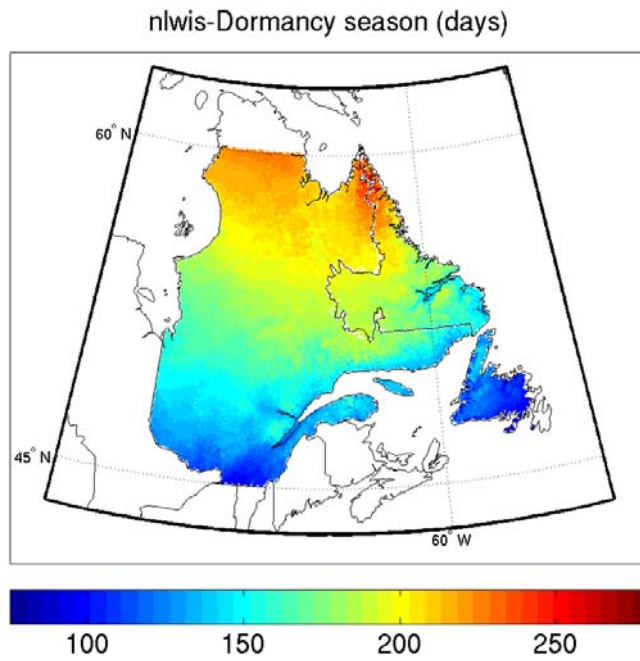


FIGURE 6.30: Deltas du nombre de degrés-jours de croissance pour la température de base égale à 10°C pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

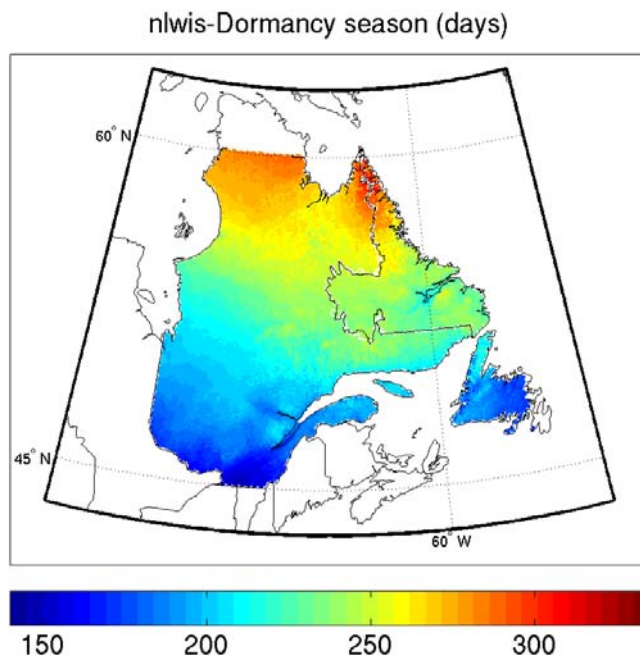


FIGURE 6.31: Normales climatiques de la longueur de la saisons de dormance (en jours) calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

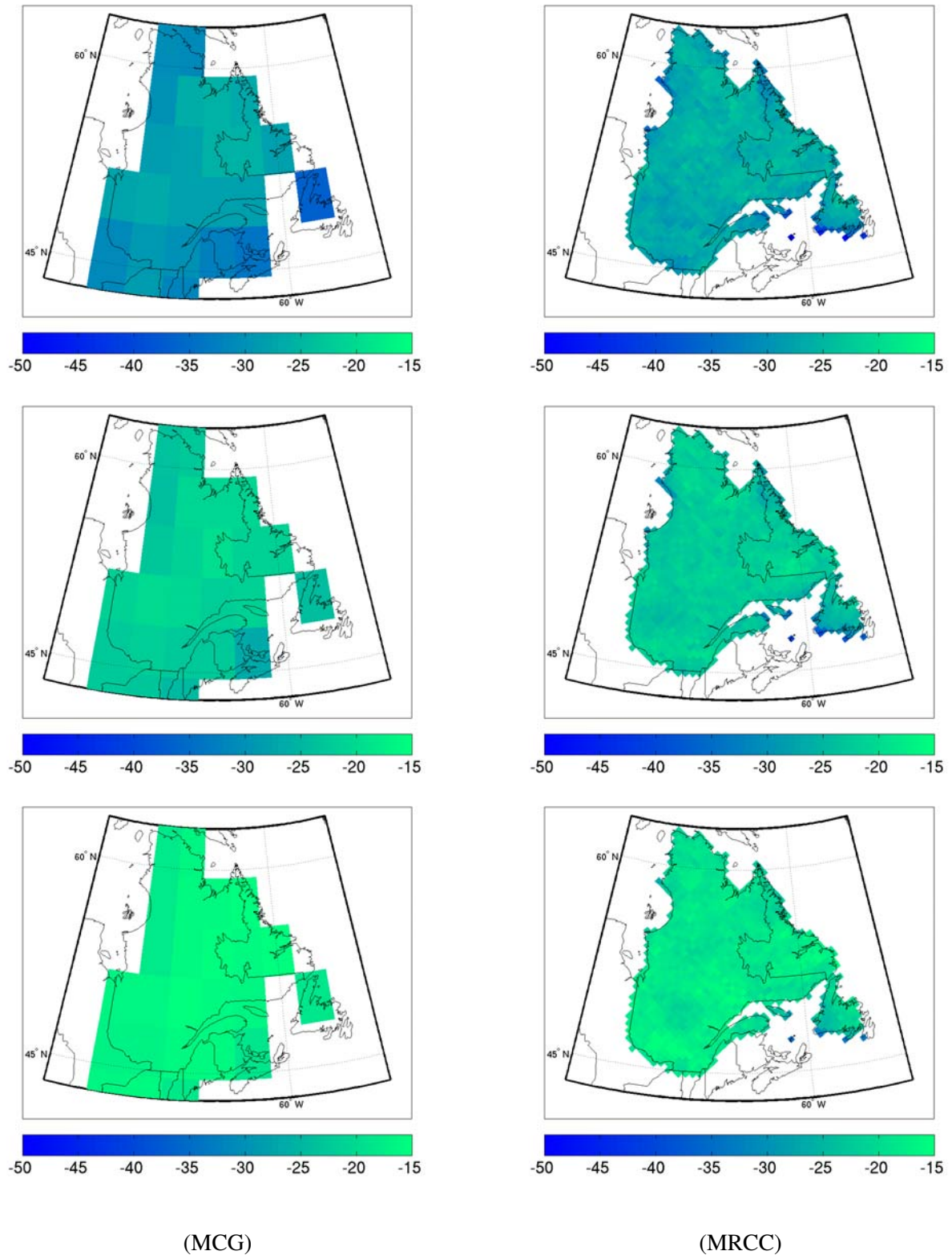


FIGURE 6.32: Deltas de la longueur de la saisons de dormance (en jours) pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

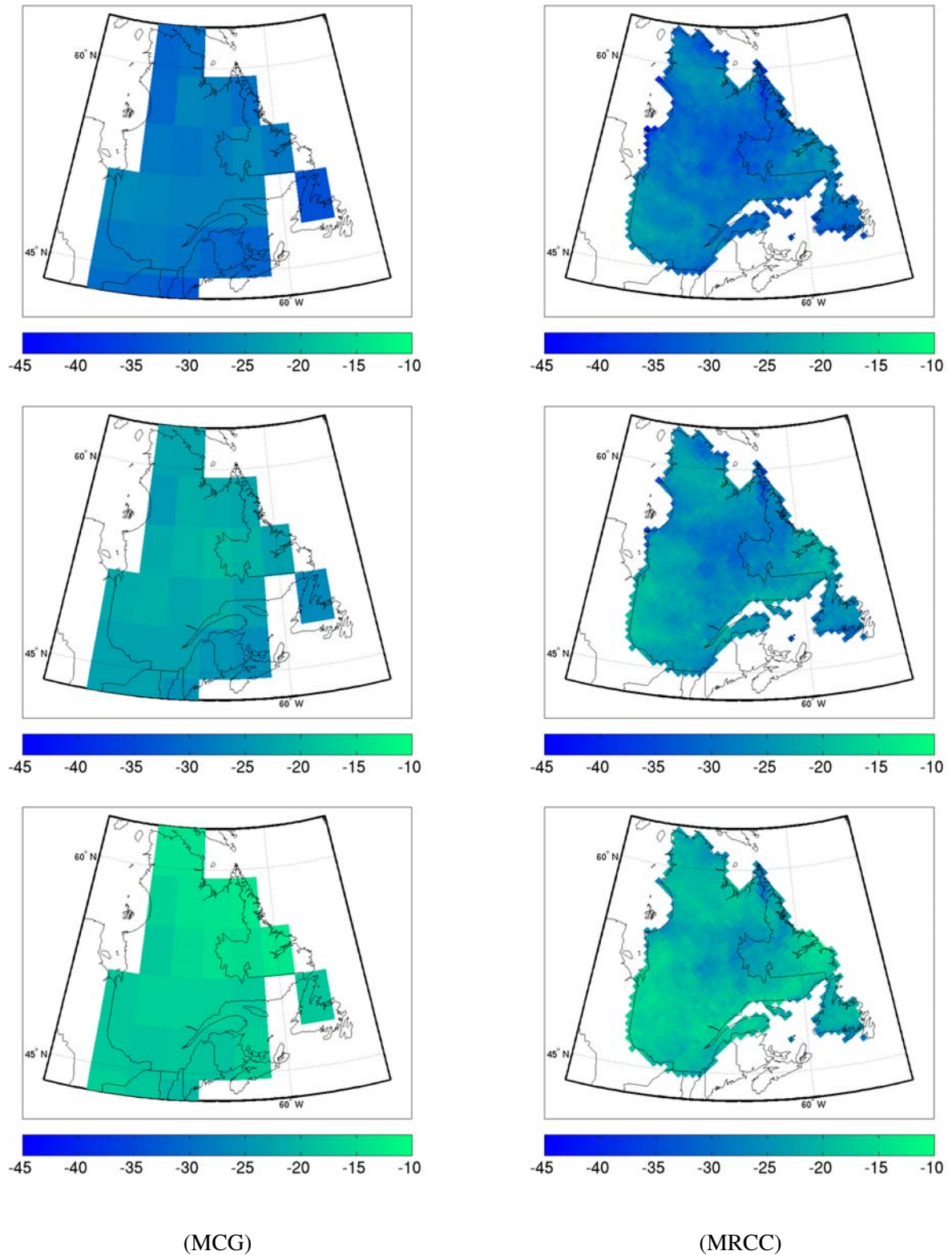


FIGURE 6.33: Deltas de la longueur de la saisons de dormance (en jours) pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

températures sont similaires à ceux de la température moyenne pour les saisons de croissance correspondantes.

6.4.9 Précipitation moyenne pendant la saison de croissance

Les normales climatiques de la précipitation pendant la saison de croissance définie pour les seuils de 0°C et de 5°C pour la période 1961-1990 obtenues à partir des observations quotidiennes interpolées (NLWIS/SNITE) sont montrées sur la figure 6.43. La précipitation pendant la saison de croissance de 0°C (figure 6.44) subira une augmentation qui sera surtout importante au nord du Québec.

Les changements suggérés par le MRCC sont beaucoup plus importants que ceux des MCGs pour tous les trois percentiles. La médiane des MCGs donne environ 10% d'augmentation au nord et 5% au sud, alors que l'ensemble des simulations du MRCC envisage plutôt une hausse de 15% au nord. Le changement le plus élevé est attendu sur la côte ouest de la Péninsule d'Ungava (18%).

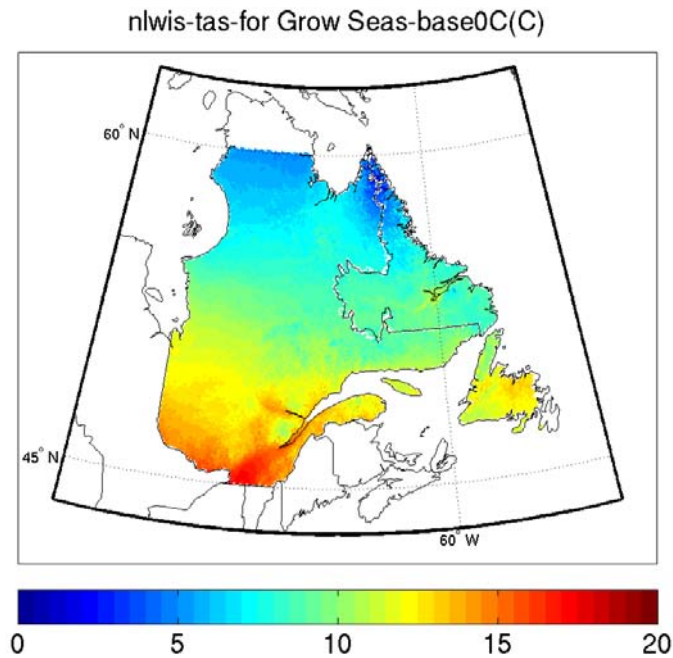
Le 25^e percentile du changement de la précipitation pendant la saison de croissance de 5°C suggère une baisse d'environ 1% selon les MCGs et 2% selon le MRCC au sud-est du Québec (figure 6.45). Au nord, les deux ensembles projettent une hausse de la quantité de la précipitation ; environ 5% (MCGs) et 10% (MRCC). Les médianes et les 75^e percentiles des deux ensembles envisagent une augmentation de la précipitation au-dessus du domaine au complet. La médiane de MRCC projette très peu de changement pour le sud-est du Québec. Le gradient du changement augmente graduellement du sud-est vers le nord-ouest atteignant 15-16% sur l'Ungava et la Baie d'Hudson. La médiane des MCGs suit le même patron, mais les valeurs maximales du changement sont autour de 10-11%.

6.4.10 Température moyenne, minimale et maximale pendant la saison de dormance

Les figures 6.46, 6.49 et 6.52 montrent les normales climatiques de la température moyenne, minimale et maximale respectivement pendant la saison de dormance définie pour les seuils de 0 et de 5°C. Les changements de la température moyenne pour les deux saisons de dormance attendus pour l'horizon 2050 sont montrés sur les figures 6.47 et 6.48. Une augmentation générale de la température est projetée sur tout le domaine avec les valeurs les plus importantes au nord. Les changements seront plus grands pendant la saison de dormance de 0°C. La médiane des deux ensembles est située entre 3.5 et 4°C pour le nord du Québec et entre 2.2 et 3°C pour le sud pendant la saison de 0°C. Pendant la saison de 5°C, les médianes varient entre 2.5 et 3°C au nord et entre 2 et 2.3°C au sud. Les 75^e percentiles projettent les plus grands changements allant jusqu'à 7°C sur la Baie d'Hudson pendant la saison de dormance définie pour le seuil de 0°C et jusqu'à 5°C pendant la saison avec le seuil égal à 5°C. Les changements minimaux dépassent 2.5°C au nord du Québec et 1.5 au sud pendant les deux saisons.

Les deltas des changements de la température minimale sont montrés sur les figures 6.50 et 6.51. Ces changements sont aussi plus importants pour la saison de dormance la plus longue. Les valeurs

a)



b)

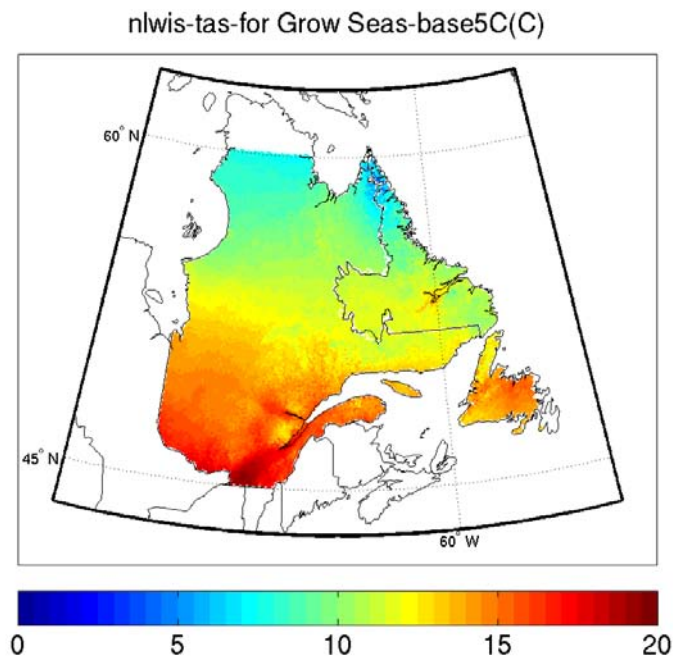


FIGURE 6.34: Normales climatiques de la température moyenne (en °C) pendant la saisons de croissance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

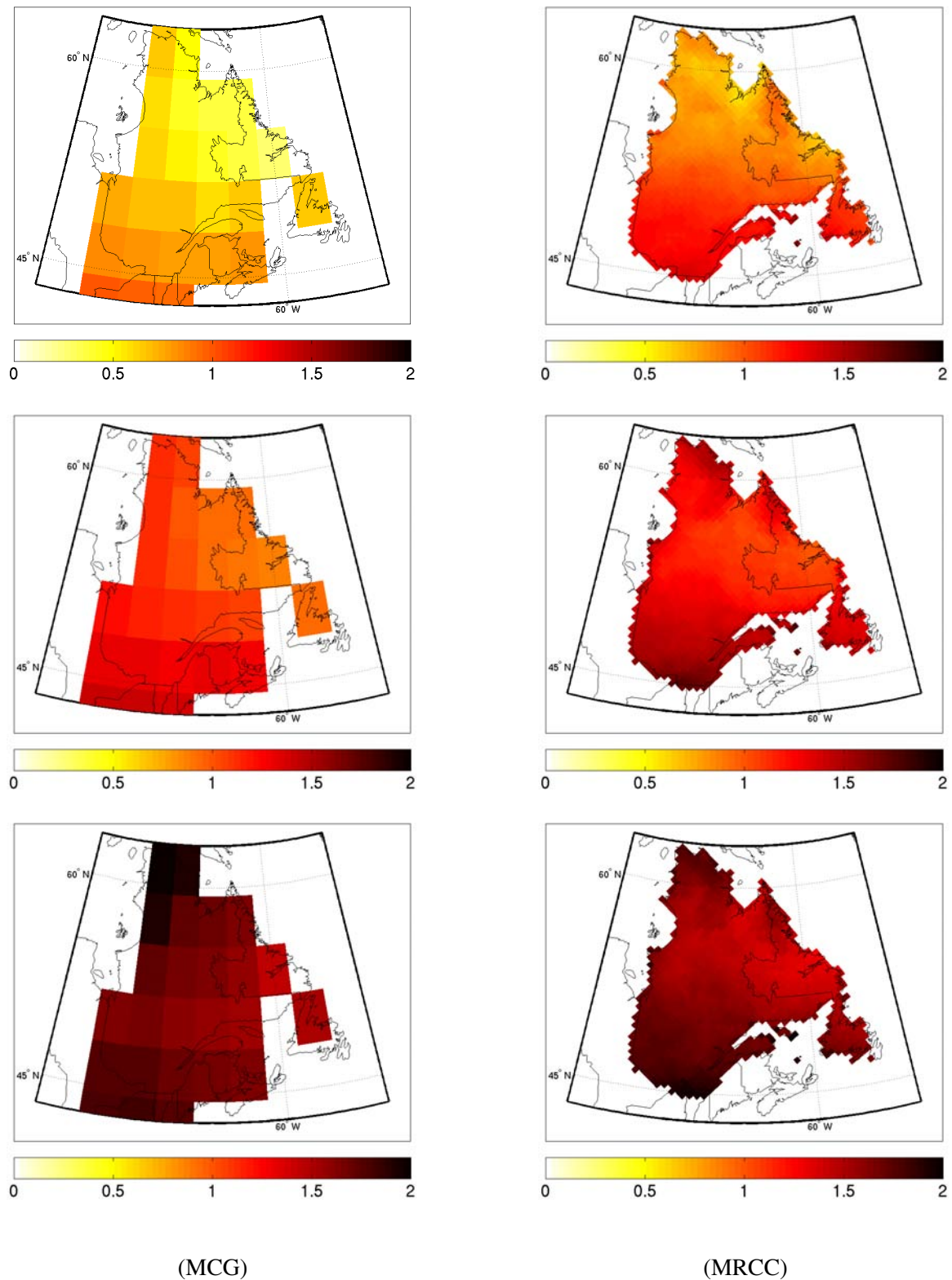


FIGURE 6.35: Deltas de la température moyenne (en °C) pendant la saison de croissance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

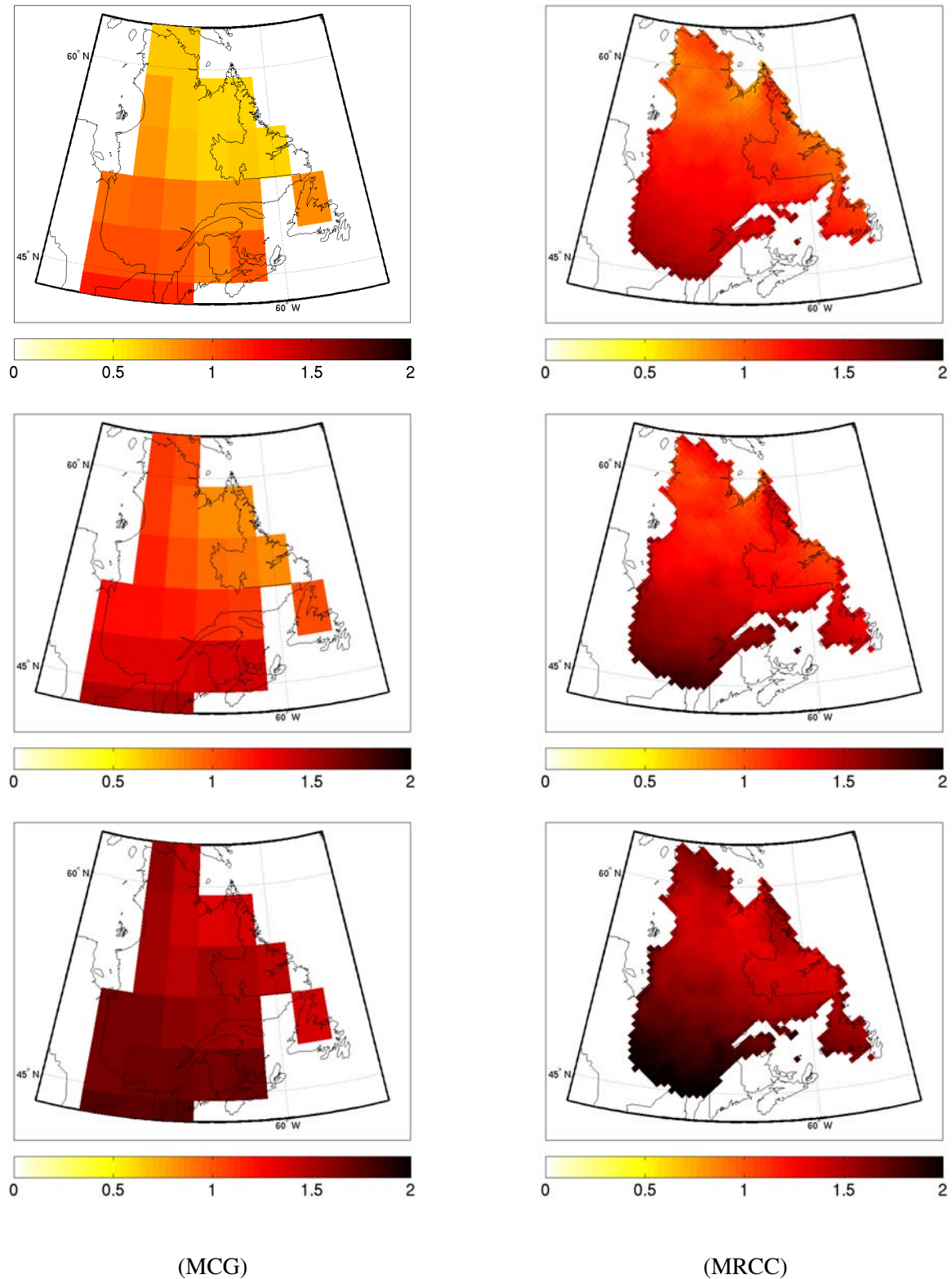
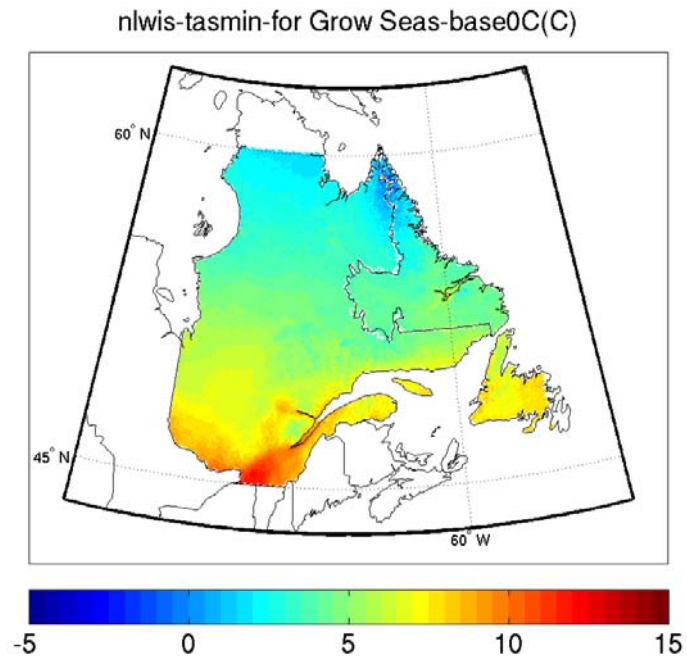


FIGURE 6.36: Deltas de la température moyenne (en °C) pendant la saisons de croissance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

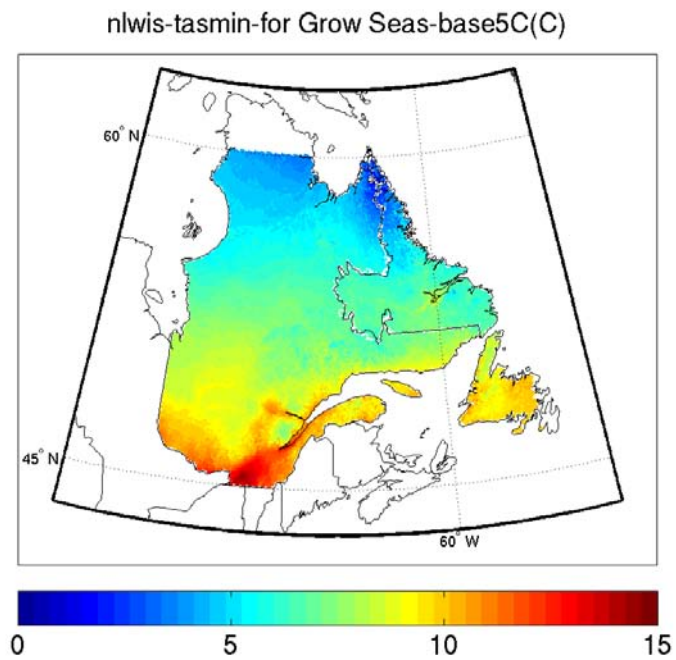


FIGURE 6.37: Normales climatiques de la température minimale (en °C) pendant la saisons de croissance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

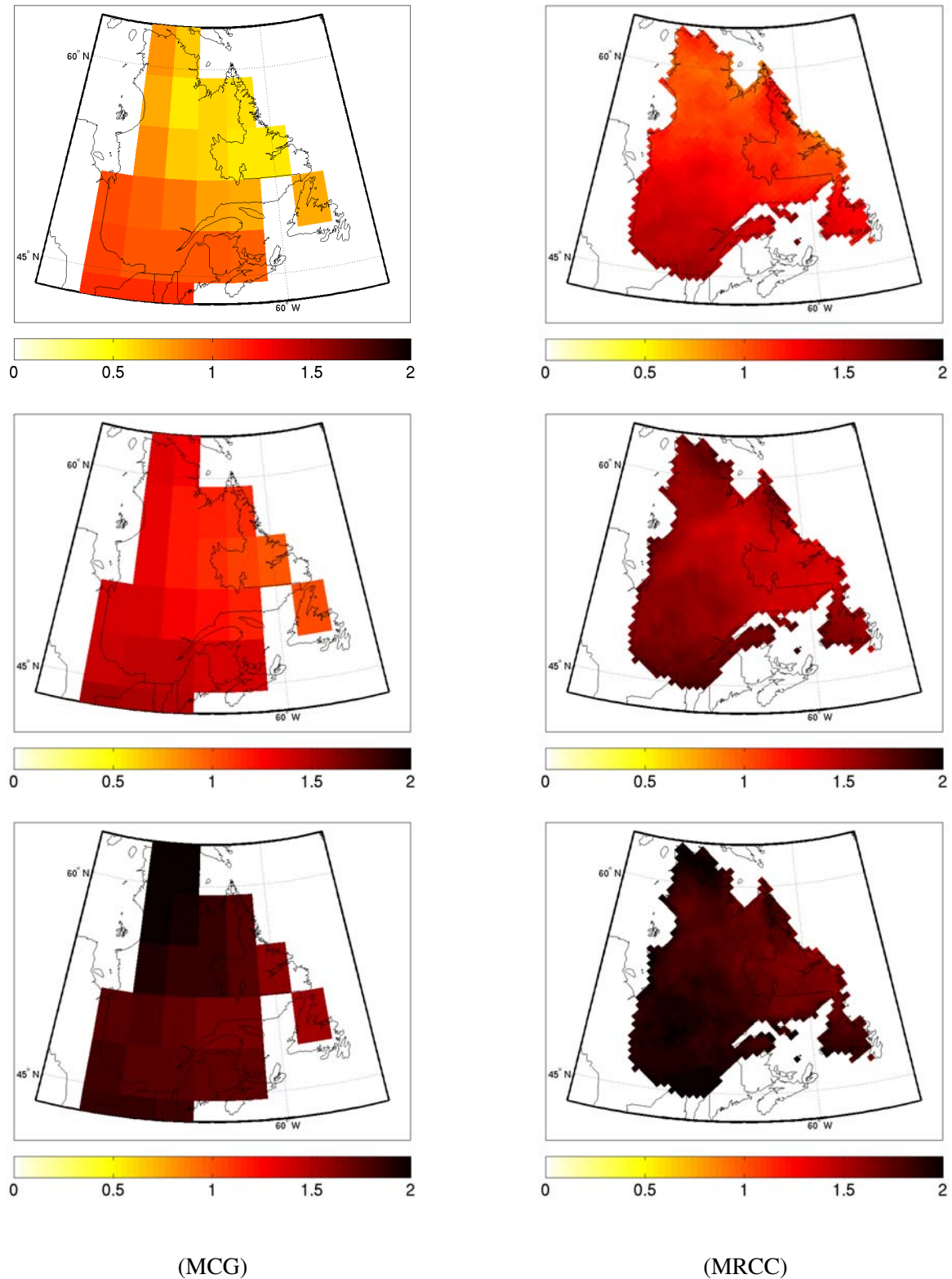


FIGURE 6.38: Deltas de la température minimale (en °C) pendant la saison de croissance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

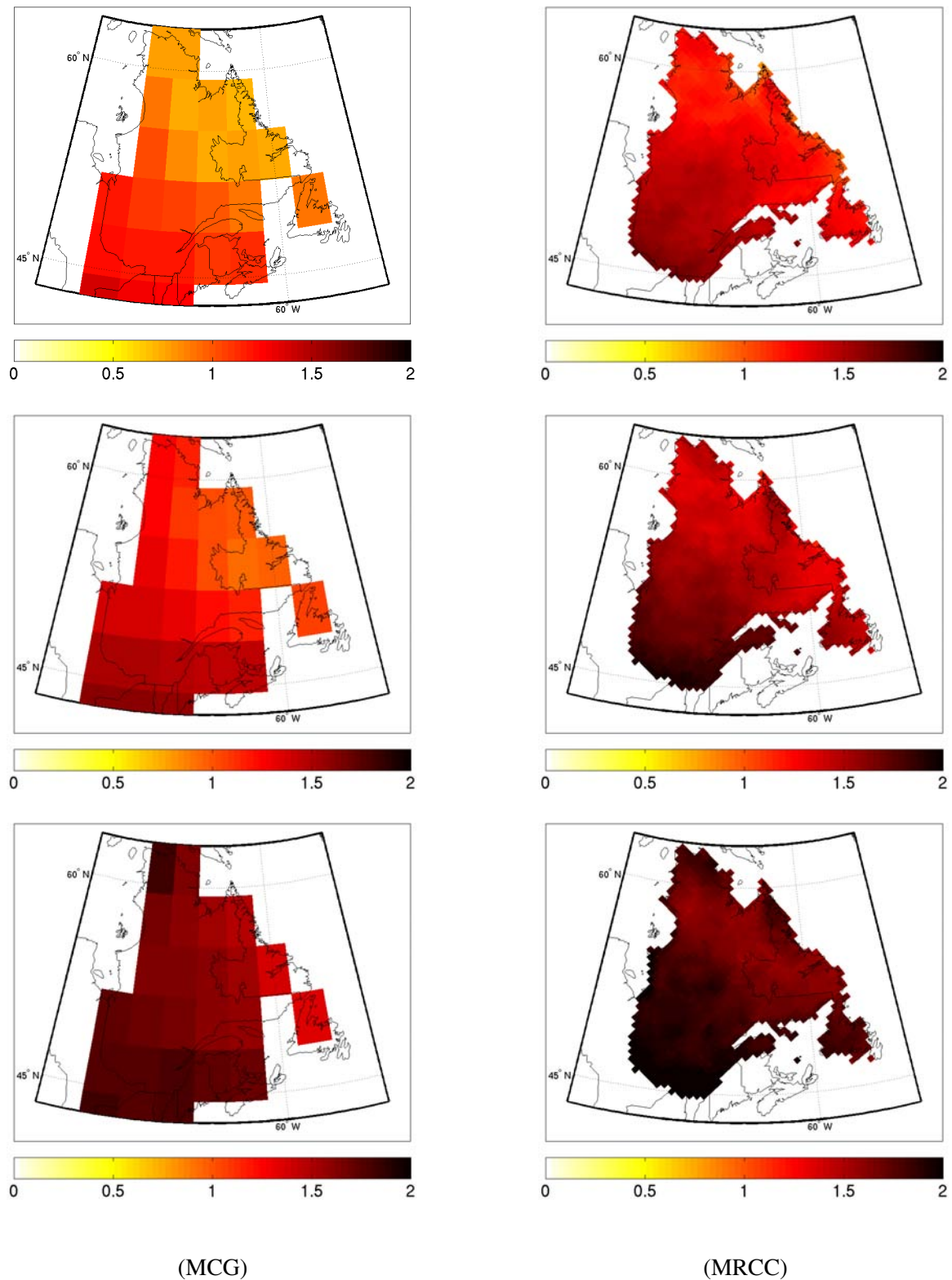
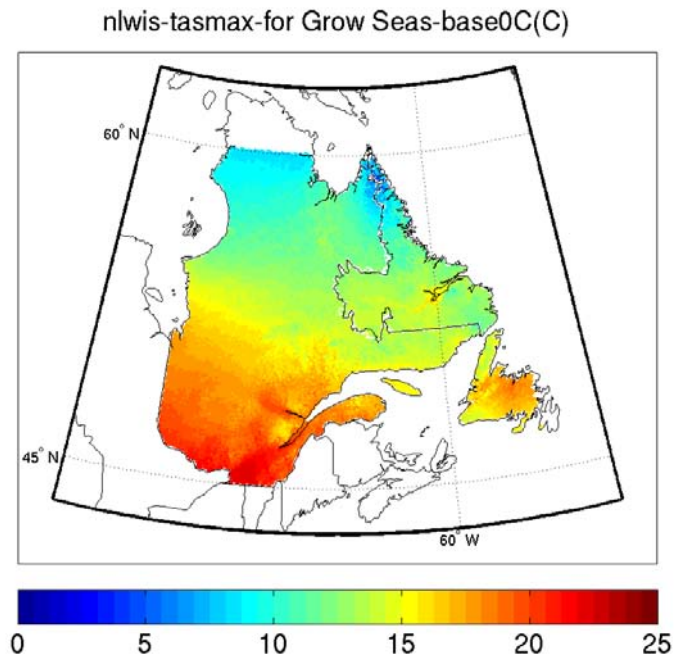


FIGURE 6.39: Deltas de la température minimale (en °C) pendant la saison de croissance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

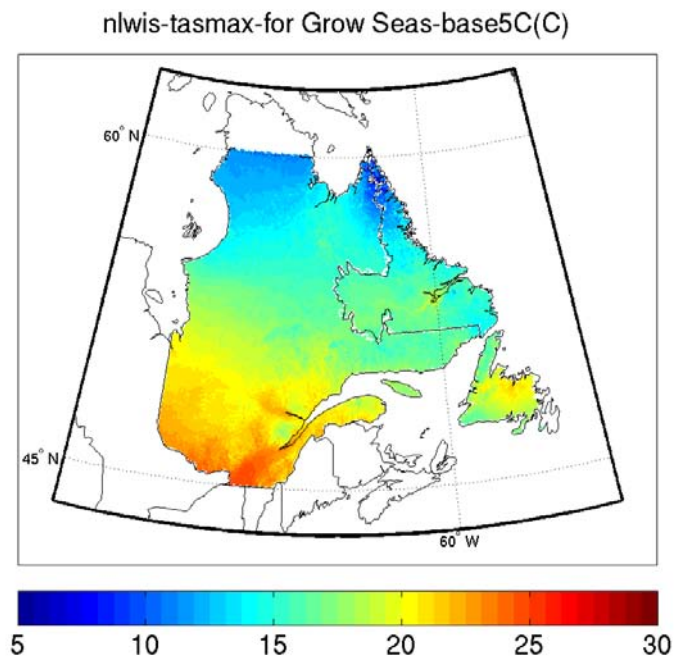


FIGURE 6.40: Normales climatiques de la température maximale (en °C) pendant la saisons de croissance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

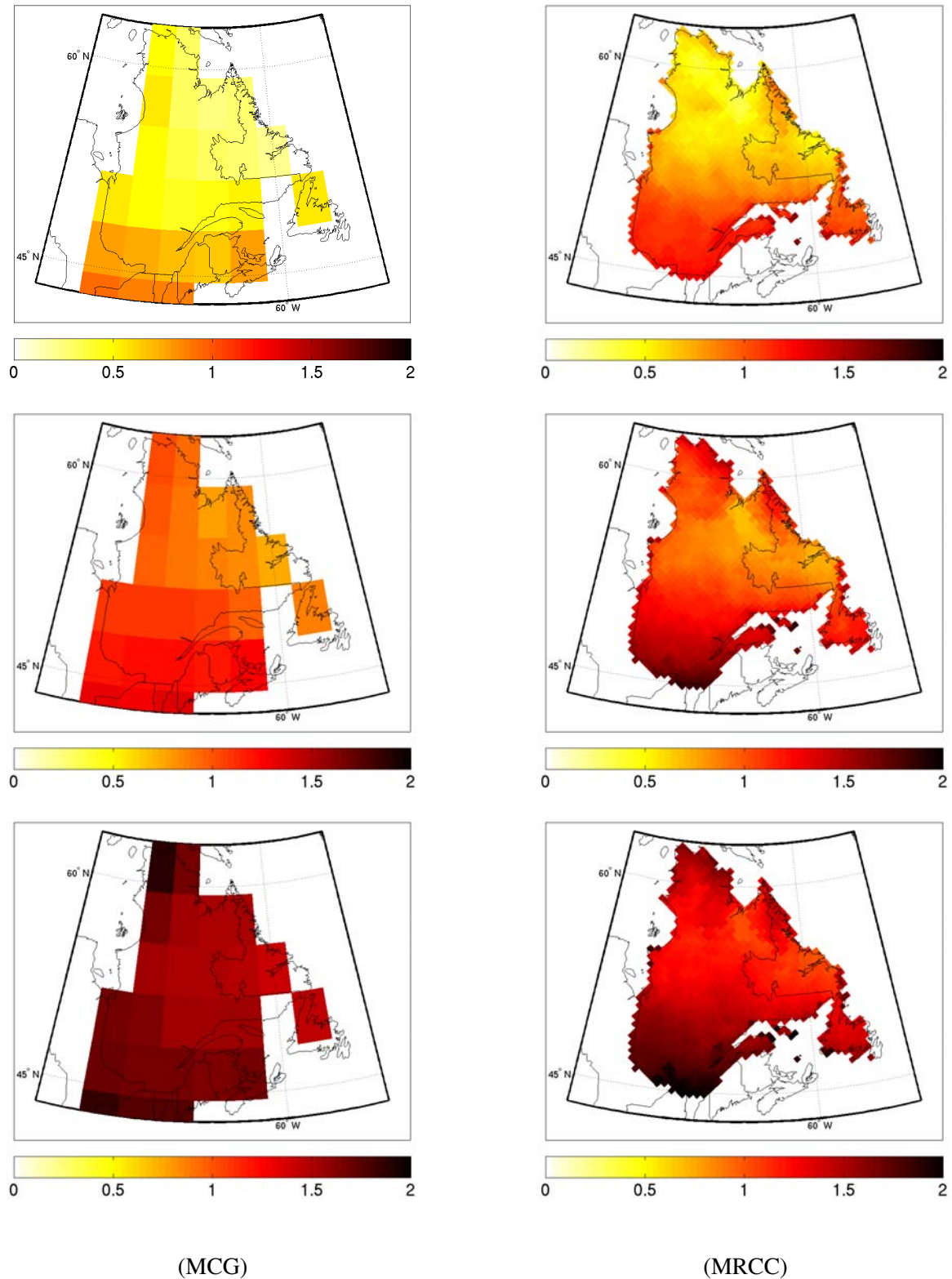


FIGURE 6.41: Deltas de la température maximale (en °C) pendant la saison de croissance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

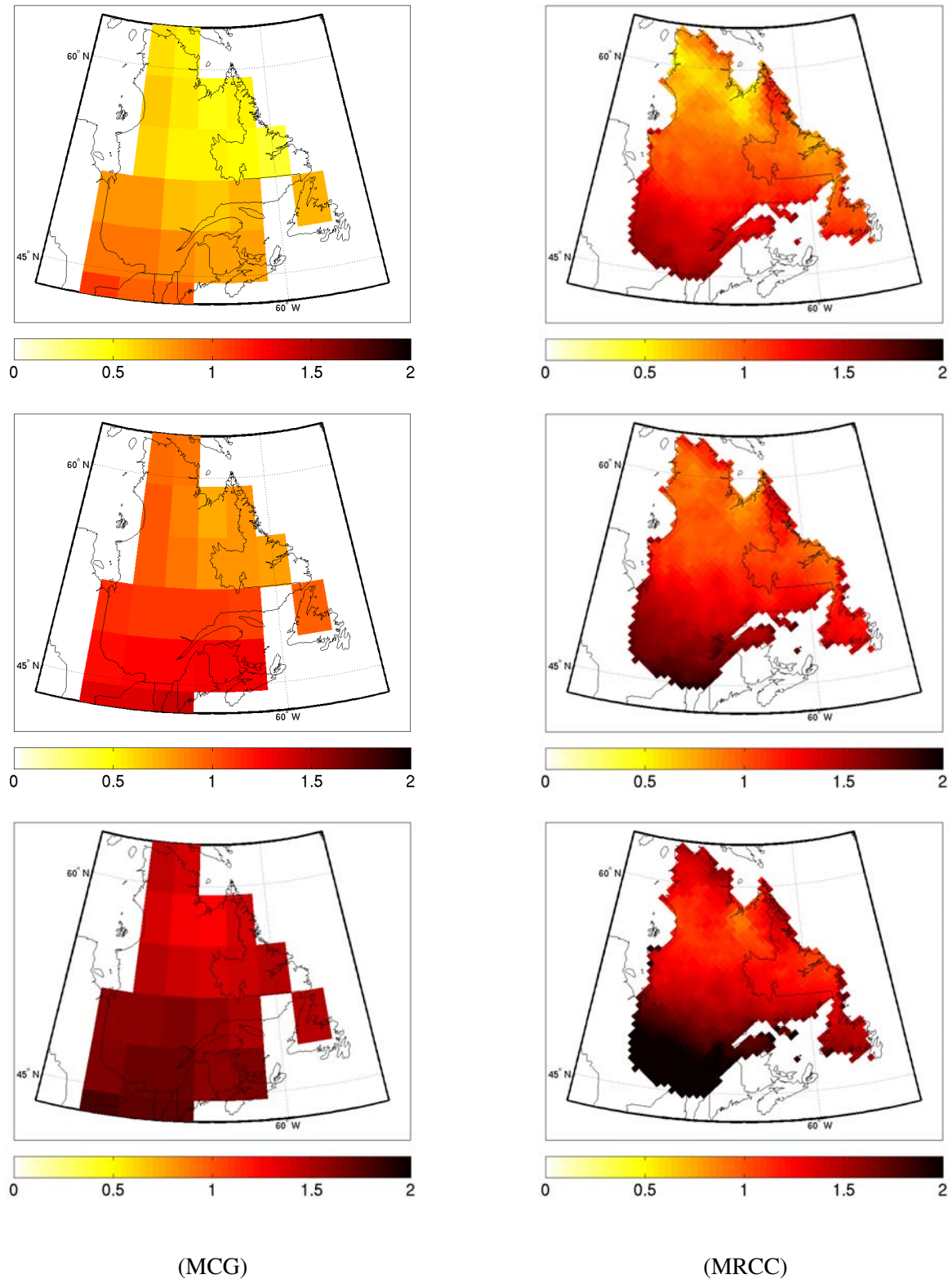
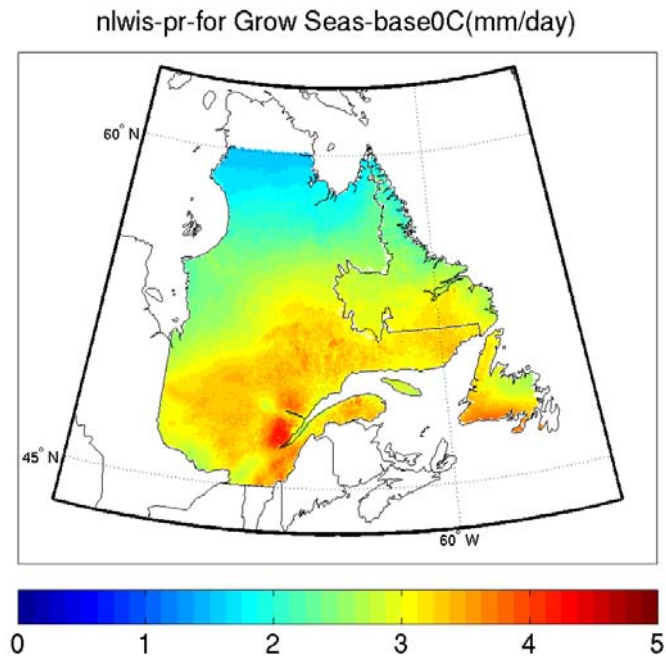


FIGURE 6.42: Deltas de la température maximale (en °C) pendant la saison de croissance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

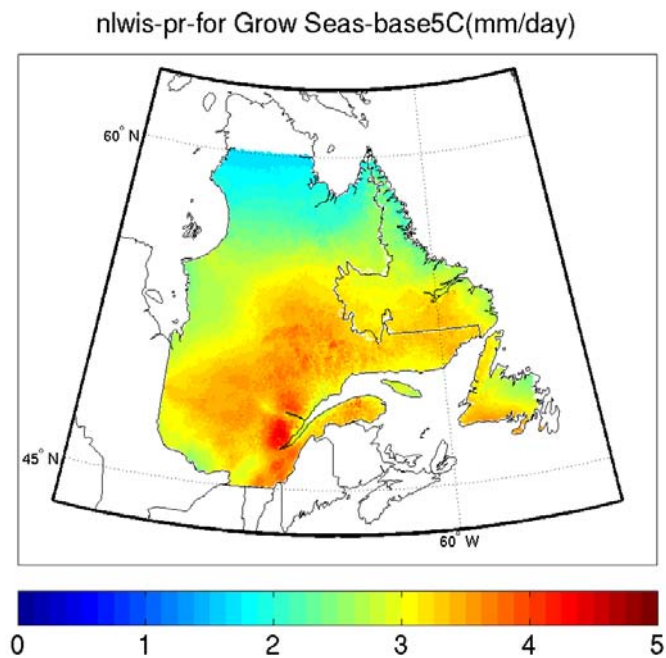


FIGURE 6.43: Normales climatiques de la précipitation (en mm/jour) pendant la saisons de croissance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

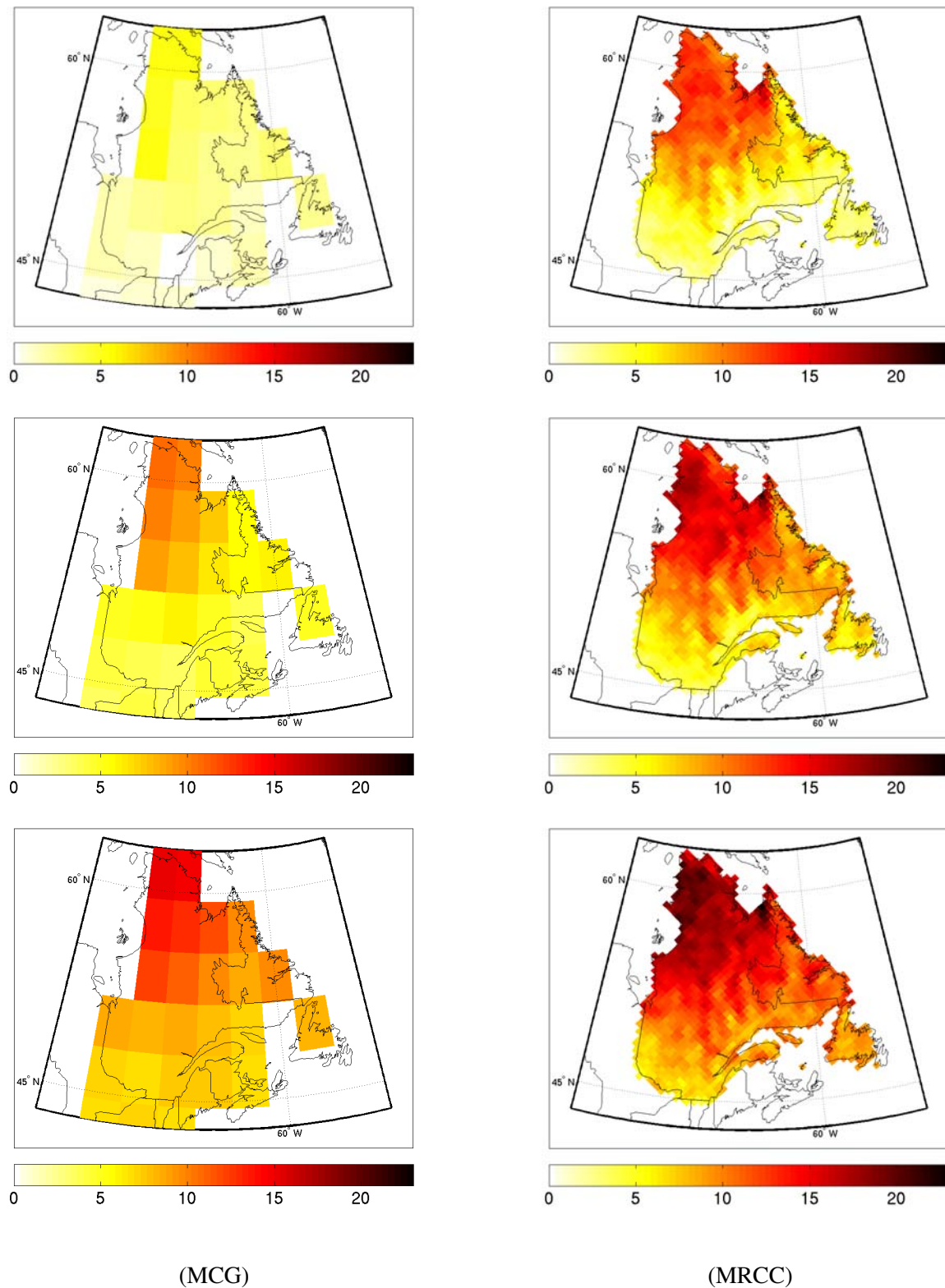


FIGURE 6.44: Deltas de la précipitation (en %) pendant la saisons de croissance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

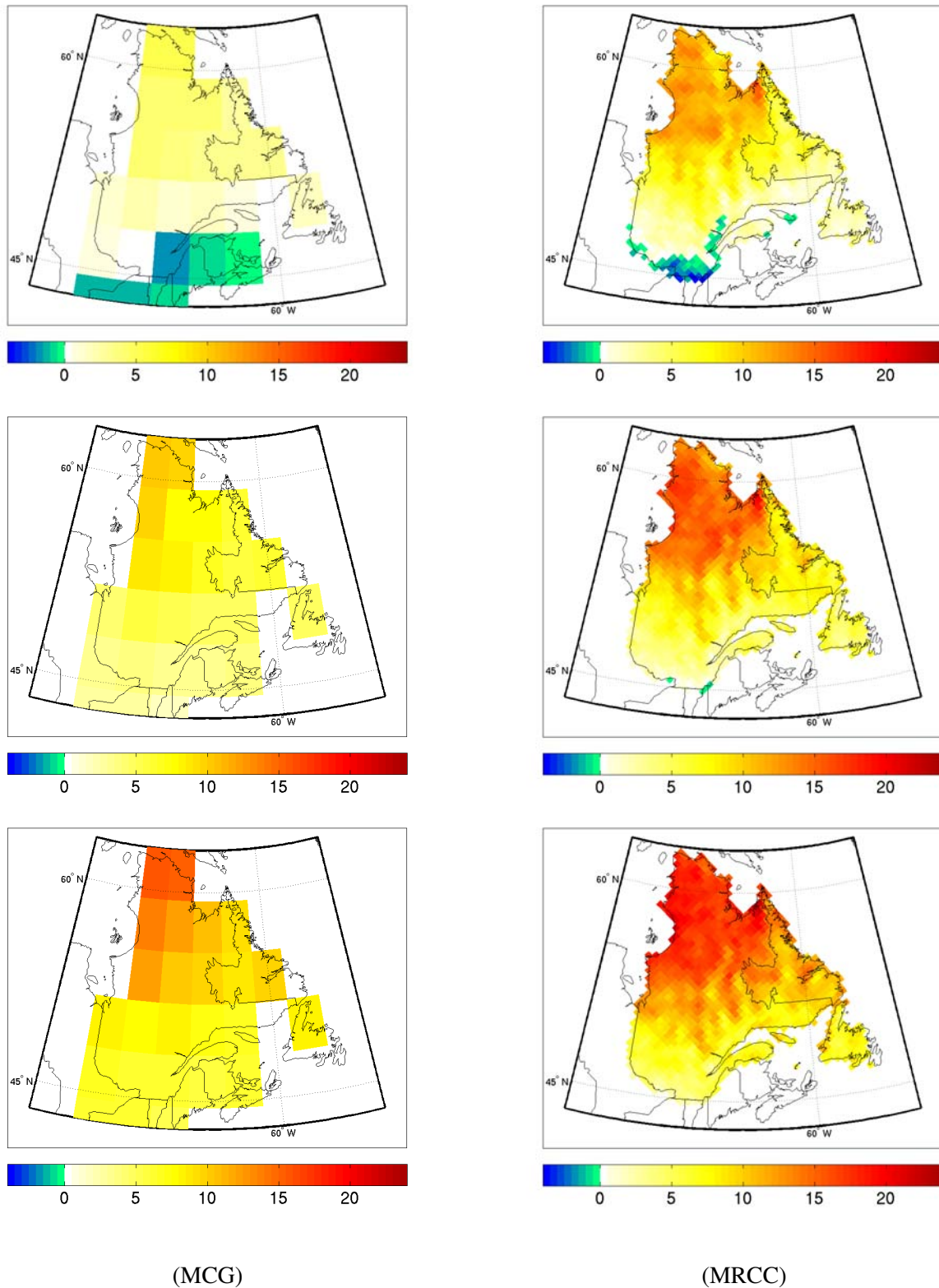


FIGURE 6.45: Deltas de la précipitation (en %) pendant la saisons de croissance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

médiane de deltas pendant la saison de 0°C varient entre 3°C au sud du domaine et 4.5°C au nord, selon les MCGs. L'ensemble de simulations du MRCC projette l'augmentation de la température un peu moins élevée pour le nord ; autour de 4°C et de 3°C au sud. Pendant la saison de dormance de 5°C , la médiane des MCGs suggère une hausse de température minimale allant d'un peu plus que 2°C au sud jusqu'à plus que 3.5°C au nord du Québec. Le MRCC projette une augmentation plus élevée au sud, d'environ 2.5°C , et moins élevée au nord, d'environ $3.3\text{-}3.4^{\circ}\text{C}$ comparé aux modèles globaux.

La température maximale changera en suivant le même patron que la température minimale : la plus grande augmentation est attendue au nord au Québec (6.53 et 6.54). La médiane des changements simulés par les MCGs pour la saison de dormance de 0°C atteint 3.8°C sur l'Ungava et la Baie d'Hudson et 2°C au sud du domaine. Le MRCC projette une hausse de la température maximale un peu moins prononcée au nord. Pendant la saison de dormance de 5°C , la médiane de changements simulés par les MCGs est située entre 1.5°C pour le sud et autour de 3°C pour le nord. La médiane de l'ensemble des simulations du MRCC donne une hausse de la température maximale semblable pour le nord du Québec, mais avec des valeurs un peu plus grandes pour le sud comparé aux MCGs.

6.4.11 Précipitation moyenne pendant la saison de dormance

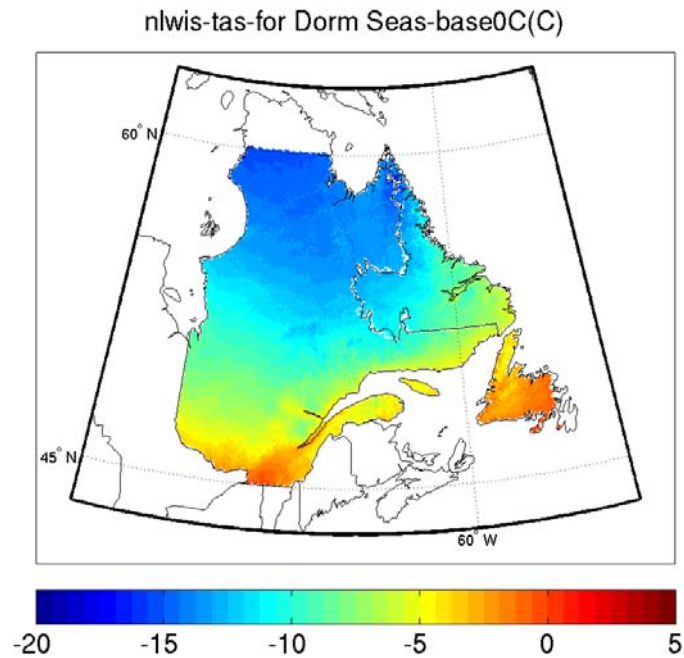
Les normales climatiques pour la saison de dormance définie pour les seuils de 0 et 5°C sont montrées sur la figure 6.55 et leurs changements sur les figures 6.56 et 6.57 respectivement. Les changements de la précipitation pendant la saison de dormance de 0°C sont généralement positifs et surtout élevés au nord du Québec et sur la côte de la Baie d'Hudson et de la Baie-James. La médiane des deux ensembles projette une augmentation de la précipitation plus grande que 20% sur la côte ouest du Québec. Le MRCC suggère des valeurs allant jusqu'à 40% sur les régions côtières de la Baie-James et de la Baie d'Hudson. Il accentue aussi les changements à l'intérieur du domaine grâce à une meilleure représentation de la topographie comparée aux MCGs. Les valeurs les plus élevées du 75^e percentile des MCGs sont égales à 40% et celles du MRCC vont même jusqu'à 50% d'augmentation.

Pendant la saison de dormance de 5°C les changements sont semblables à ceux de 0°C mais avec les valeurs plus basses. Les maximum d'augmentation projeté par le 75^e percentile de l'ensemble des simulations du MRCC sont égales à 35% et celles simulées par les MCGs vont jusqu'à 26-27%.

6.4.12 Événements de gel-dégel

Les événements de gel-dégel ont été définies dans la section 5.2 . Les projections du nombre d'événement de gel-dégel ont été calculées pour la saison d'hiver (décembre-janvier-février, DJF) et de printemps (mars-avril-mai, MAM), ainsi que pour la saison de croissance et de dormance définies pour les deux seuils de 0°C et de 5°C et pour l'année au complet. Les normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel pendant l'hiver et le printemps et au niveau annuel sont montrées sur la figure 6.58 . Les changements projetés pour l'horizon 2050 montre une augmentation du nombre d'événements de gel-dégel pendant l'hiver (figure 6.59). Une diminution est attendue

a)



b)

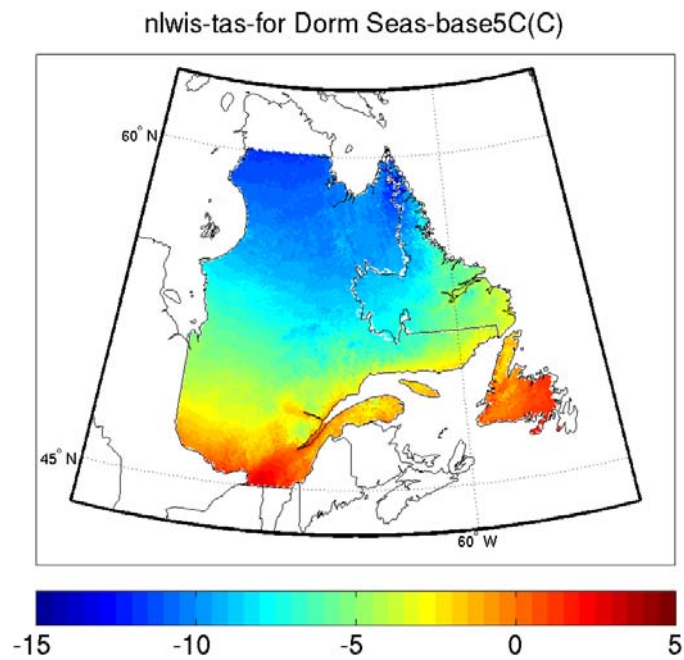


FIGURE 6.46: Normales climatiques de la température moyenne (en °C) pendant la saisons de dormance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

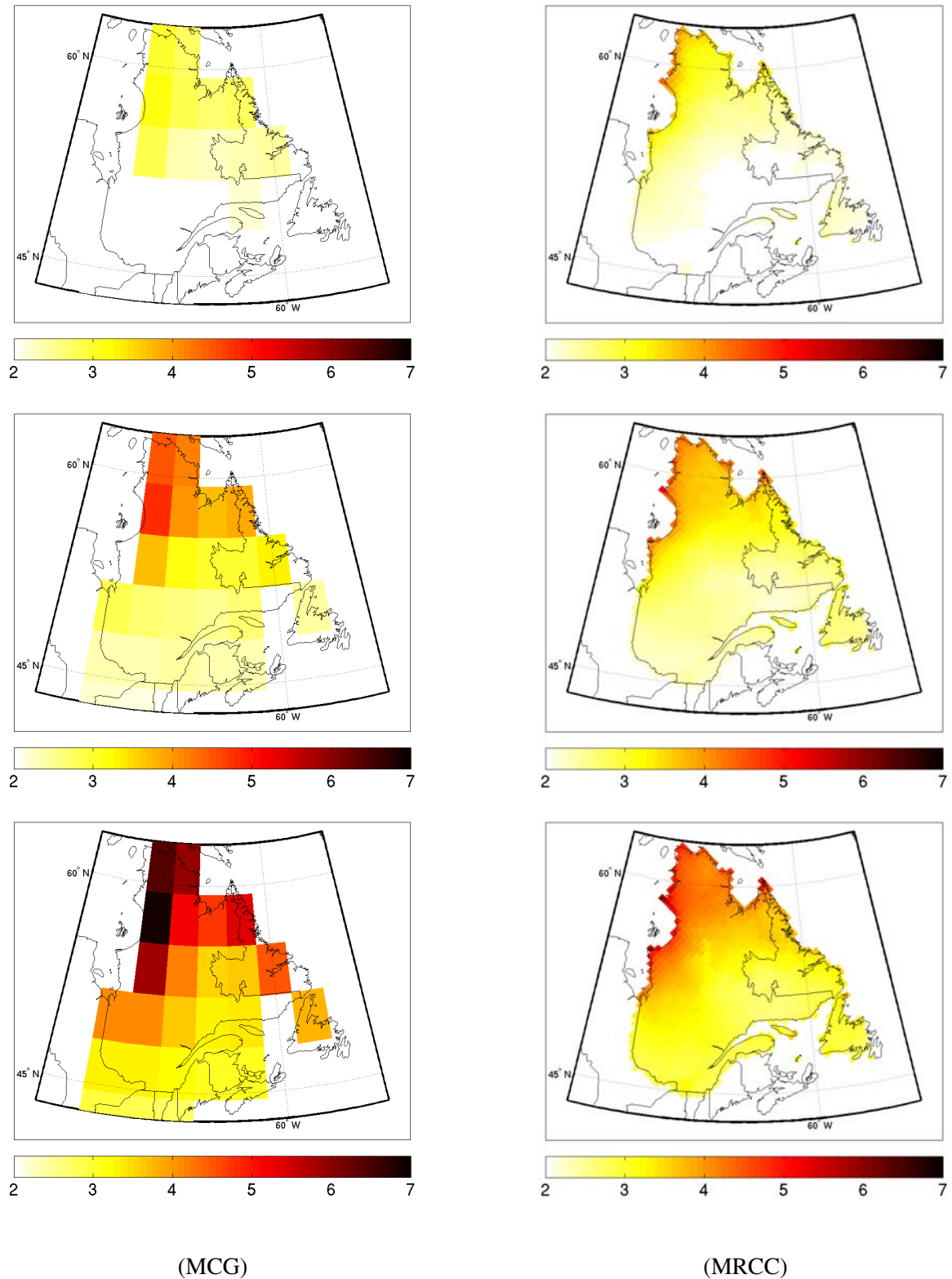


FIGURE 6.47: Deltas de la température moyenne (en °C) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

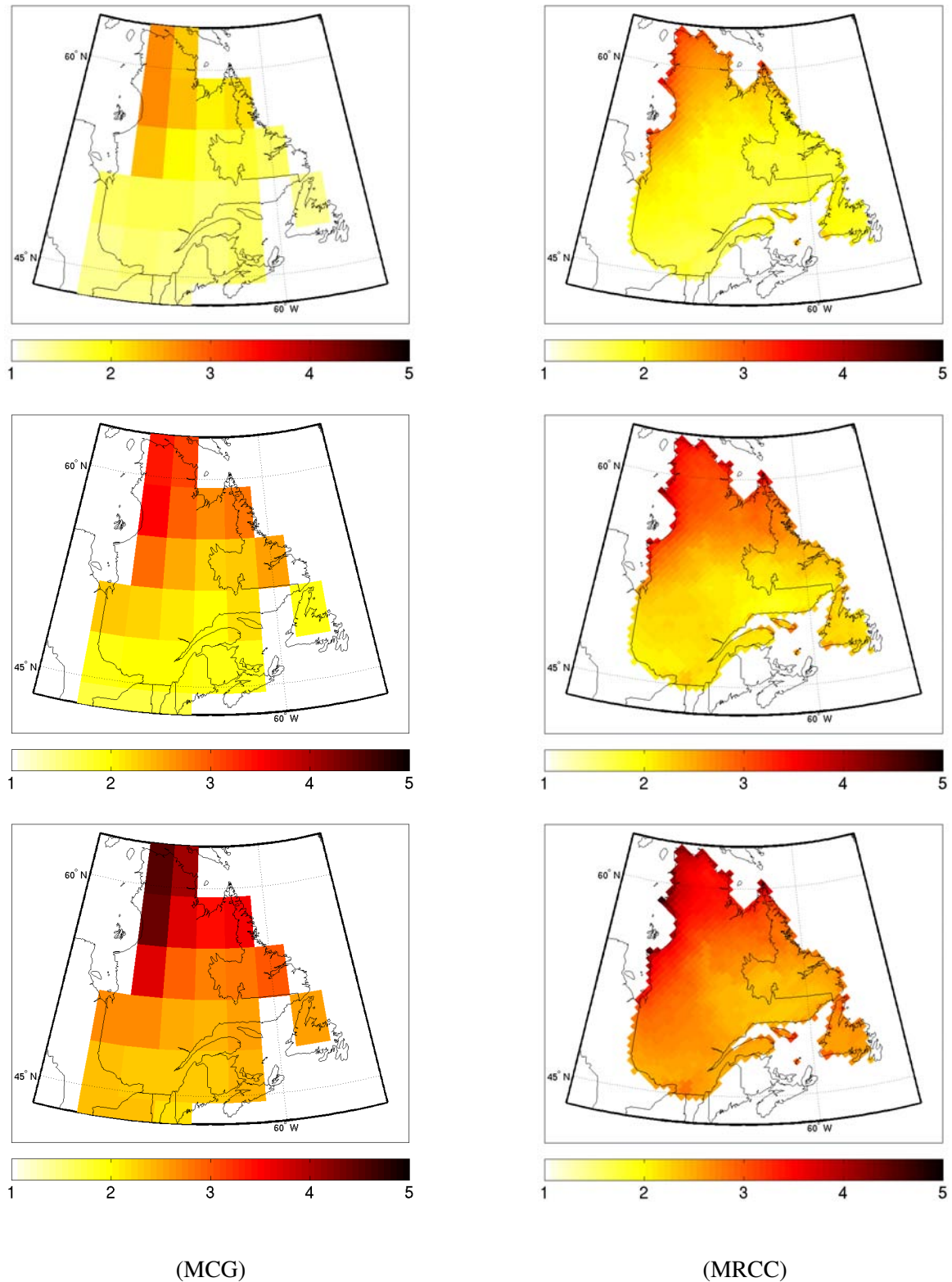
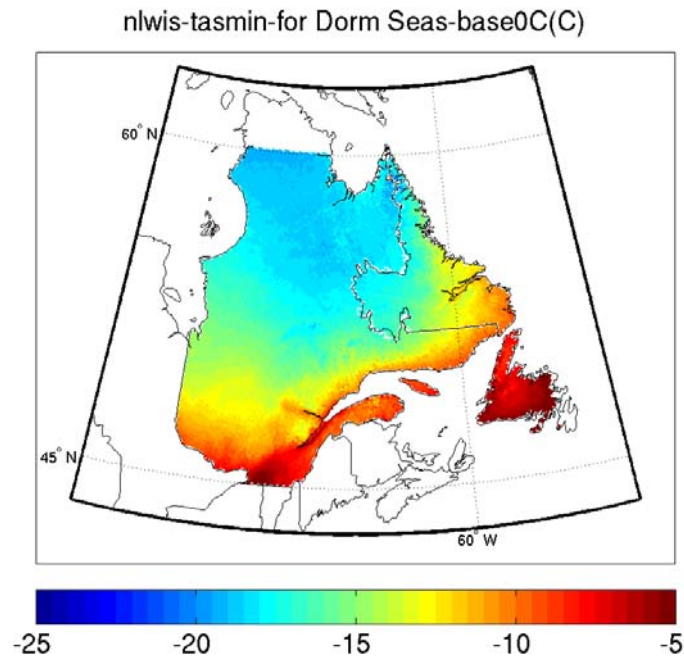


FIGURE 6.48: Deltas de la température moyenne (en °C) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

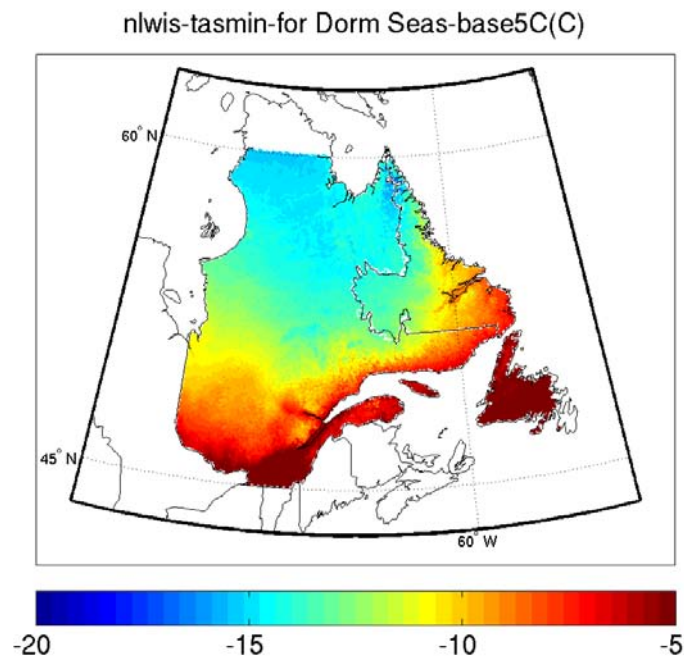


FIGURE 6.49: Normales climatiques de la température minimale (en °C) pendant la saisons de dormance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

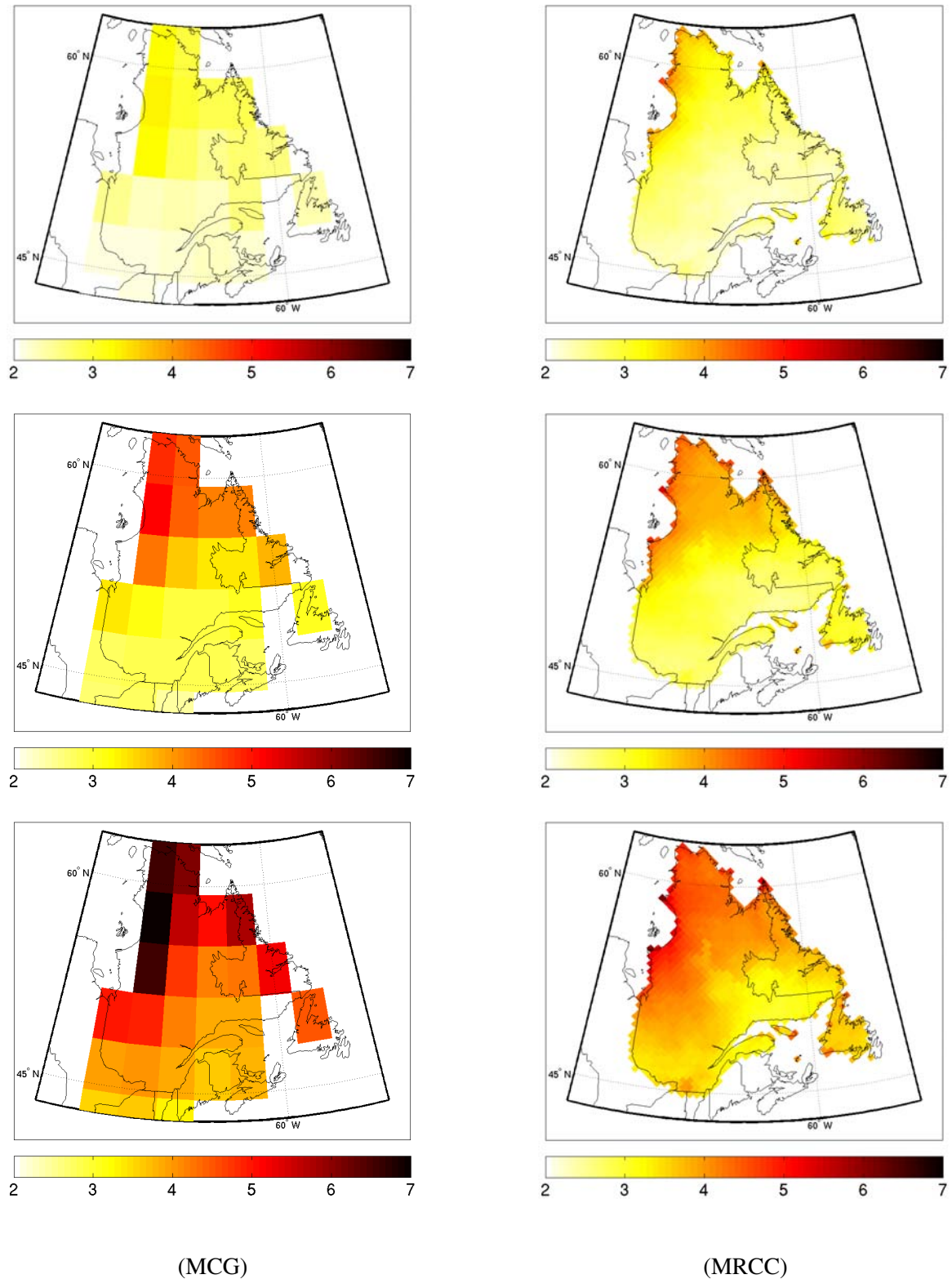


FIGURE 6.50: Deltas de la température minimale (en °C) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

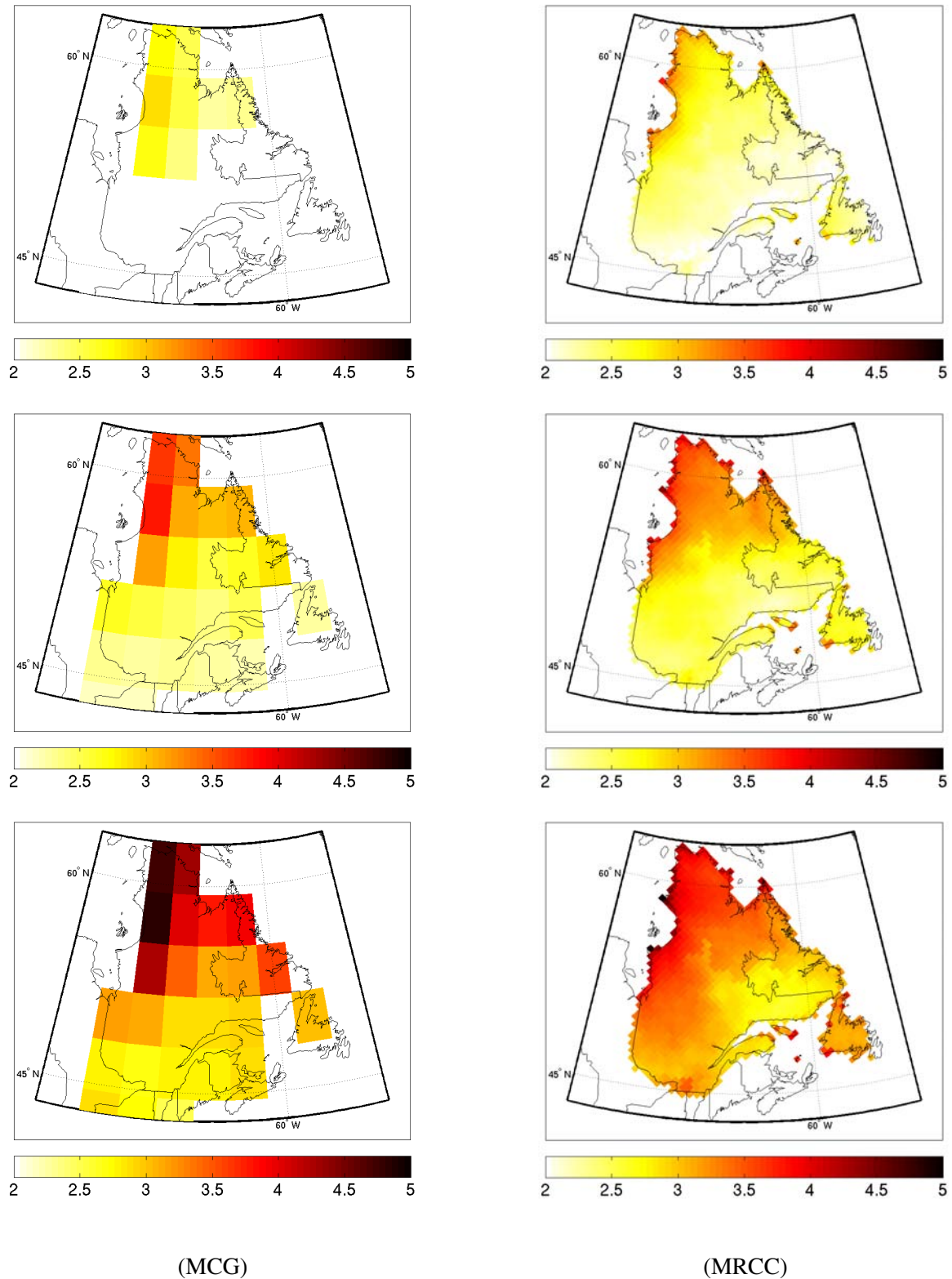
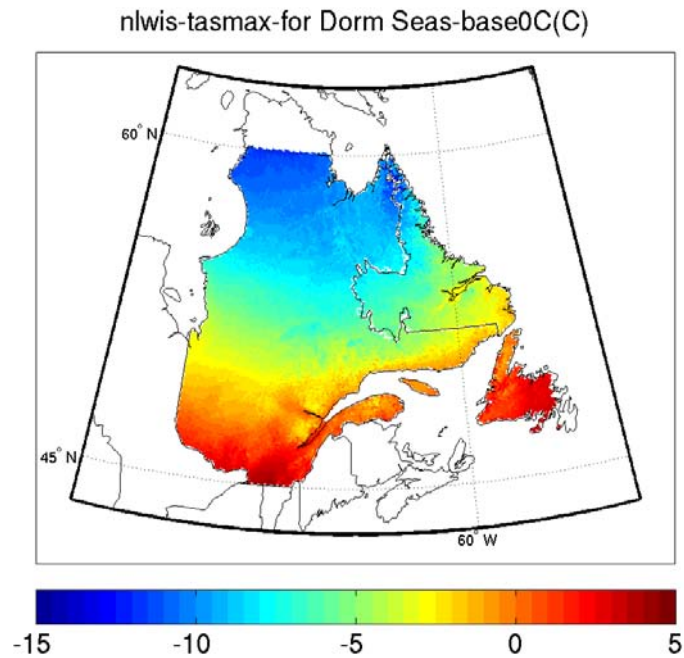


FIGURE 6.51: Deltas de la température minimale (en °C) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

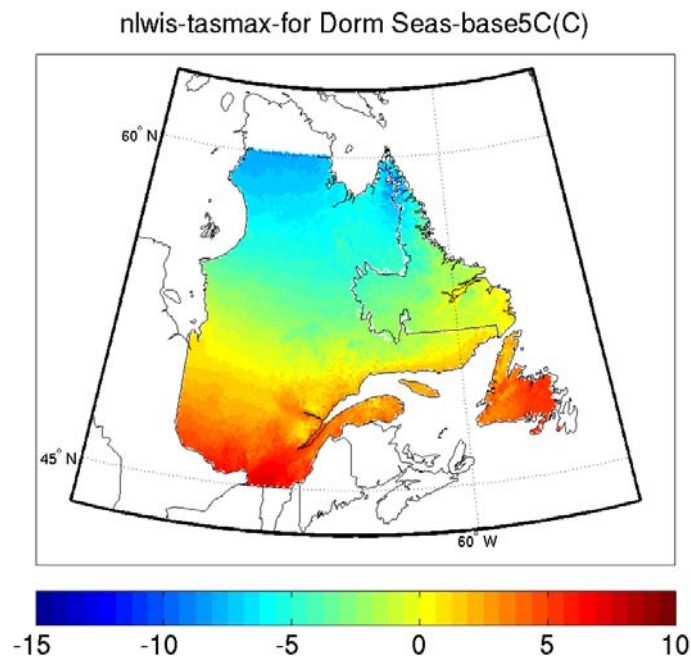


FIGURE 6.52: Normales climatiques de la température maximale (en °C) pendant la saisons de dormance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

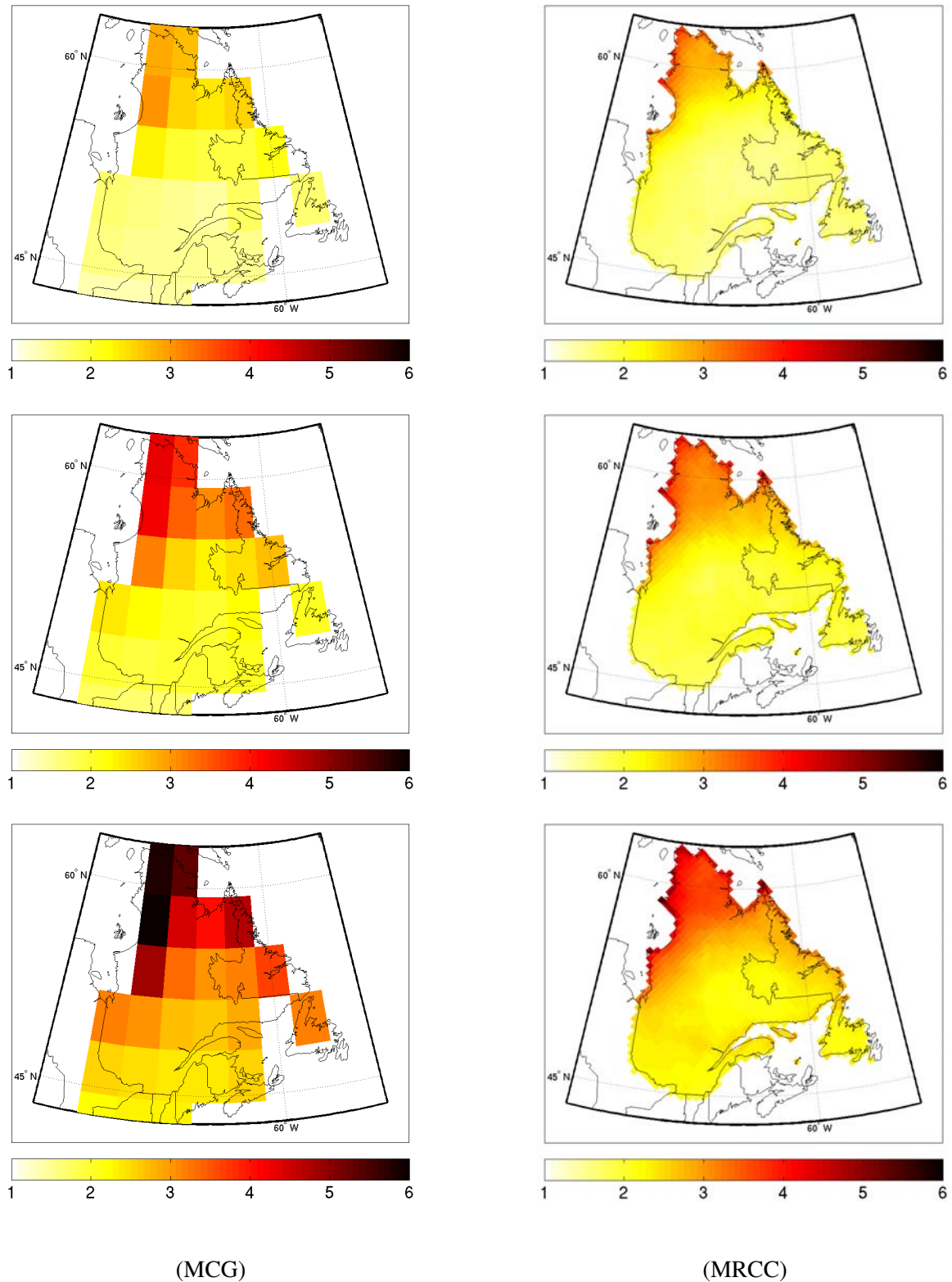


FIGURE 6.53: Deltas de la température maximale (en °C) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

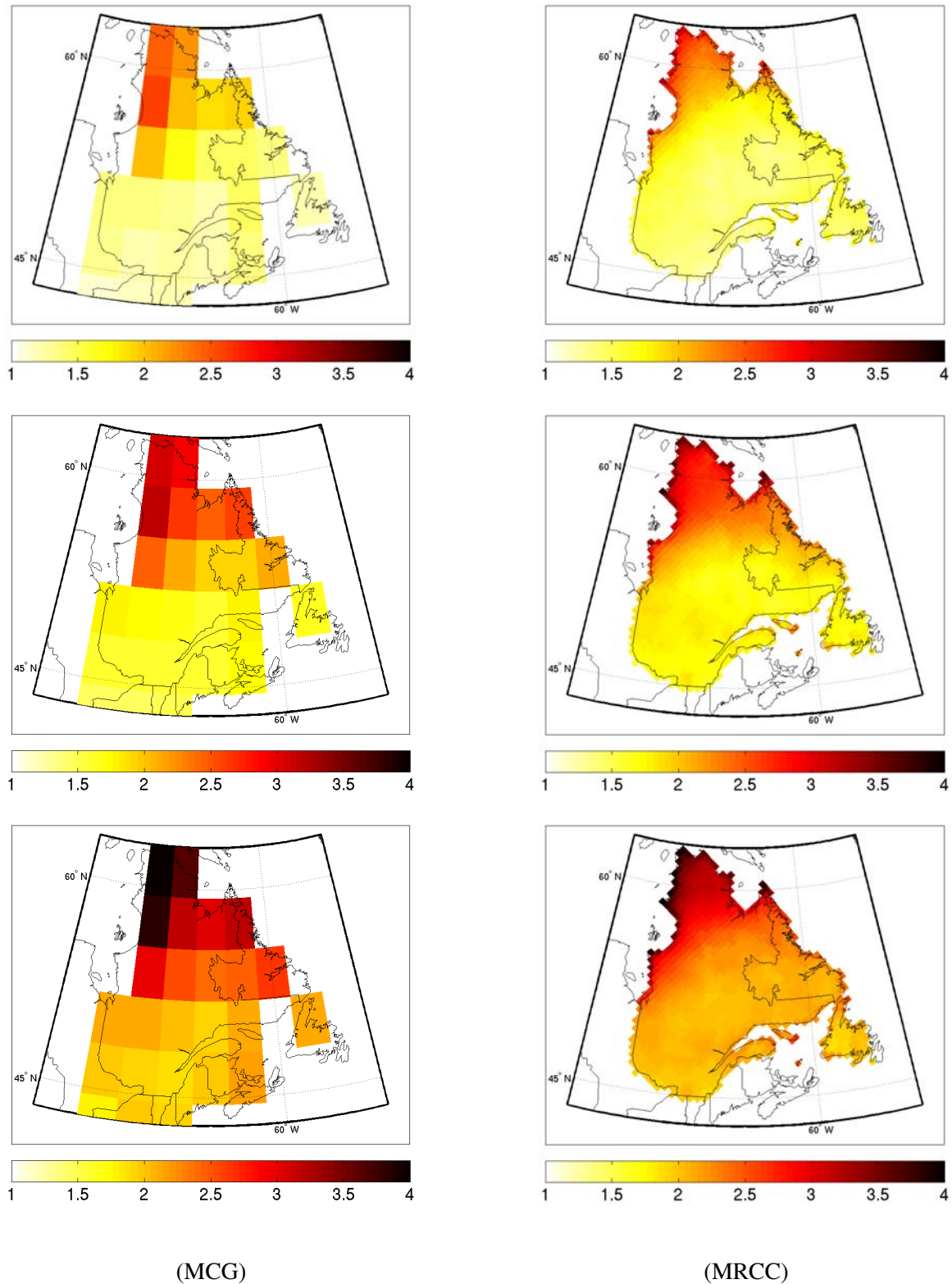
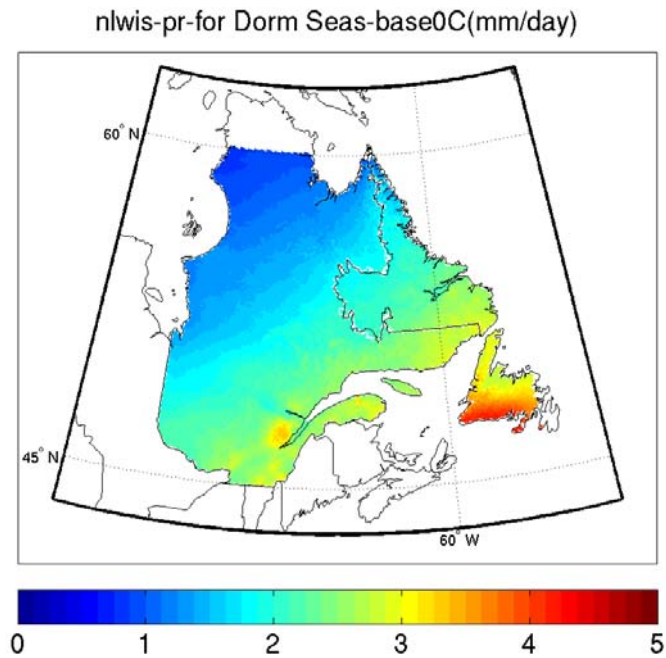


FIGURE 6.54: Deltas de la température maximale (en °C) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

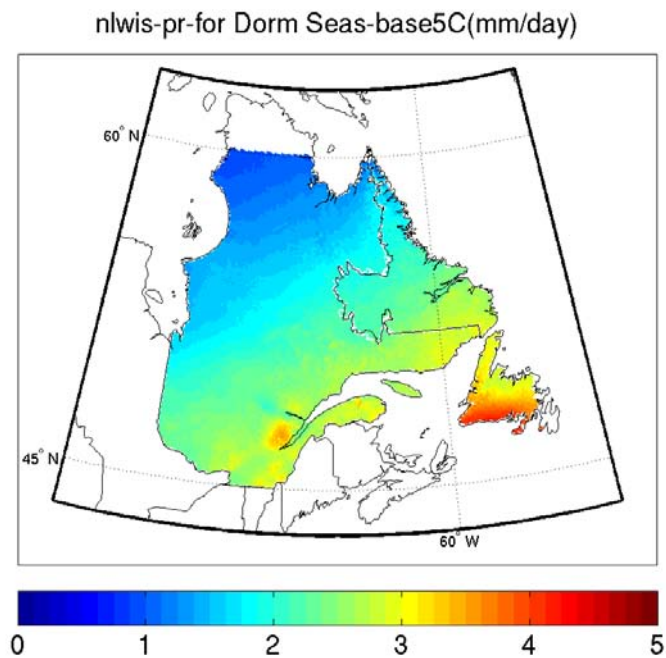


FIGURE 6.55: Normales climatiques de la précipitation (en mm/jour) pendant la saisons de dormance calculées pour un seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

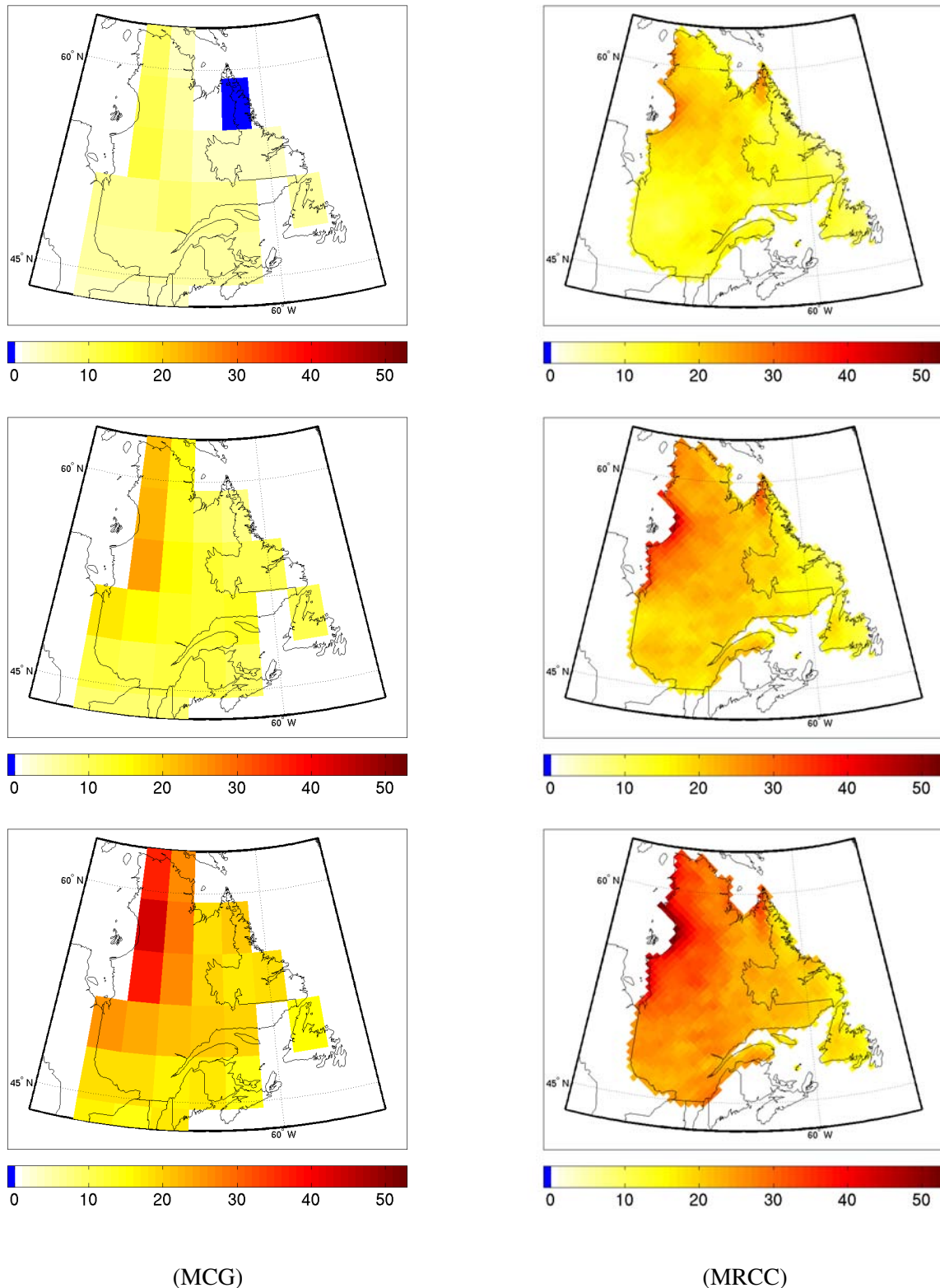


FIGURE 6.56: Deltas de la précipitation (en %) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

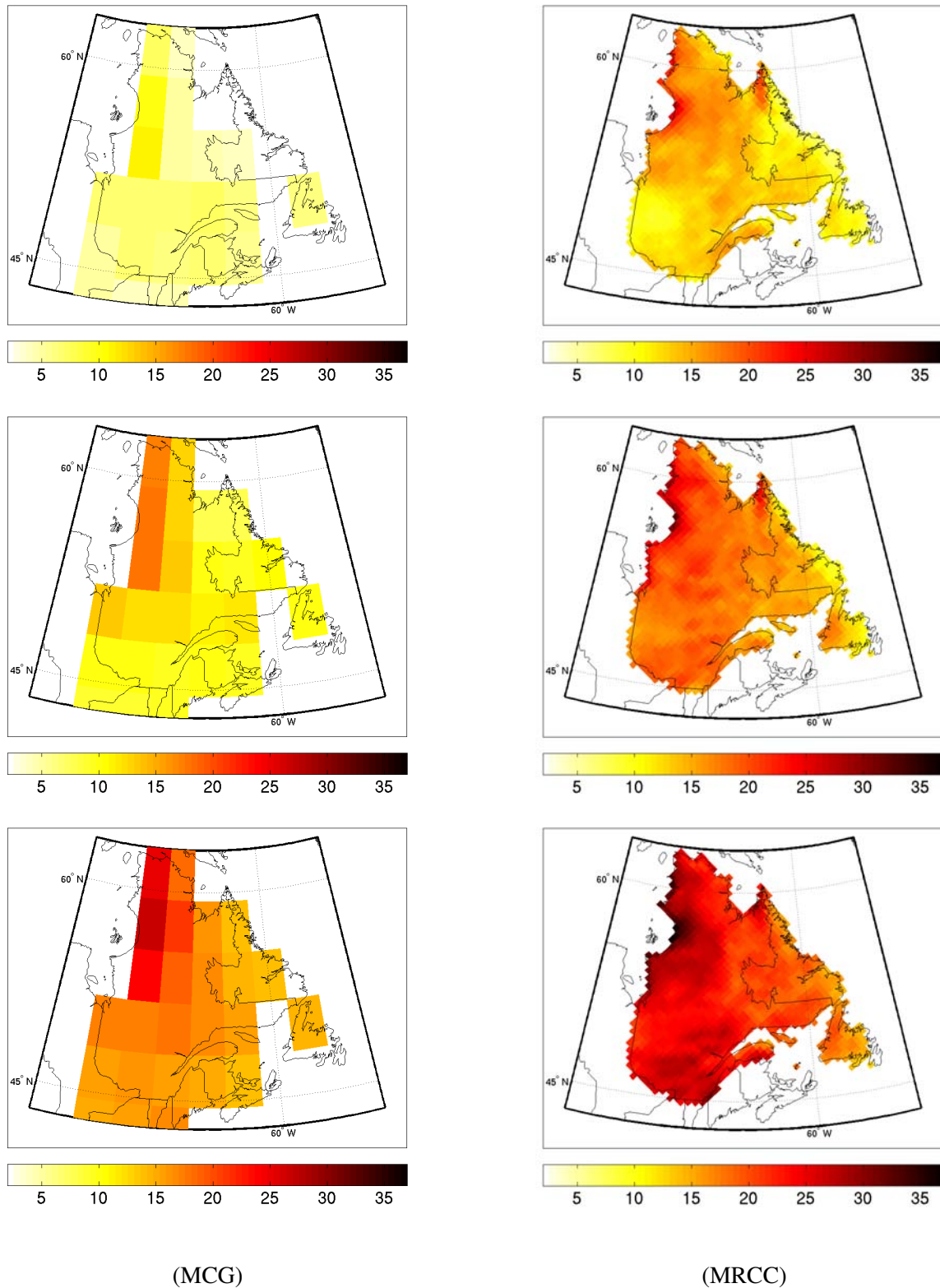


FIGURE 6.57: Deltas de la précipitation (en %) pendant la saisons de dormance définie pour un seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

au sud du Québec et une augmentation au nord pendant le printemps (figure 6.60). Au niveau annuel, l'ensemble des MCGs projette une diminution du nombre d'événements gel-dégel, lorsque le MRCC suggère peu de changements (figure 6.61). Pendant l'hiver, la plus grande augmentation du nombre d'événements de gel-dégel se produira au sud du Québec ; entre 5 et 14 jours, selon différentes percentiles (figure 6.59). Au nord du Québec, il y aura peu de changements car les températures maximales quotidiennes resteront toujours au-dessous de zéro degrés Celsius pendant la période DJF. Au printemps, au sud du Québec, la médiane des MCGs projette une diminution du nombre d'événements de gel-dégel d'environ une semaine et une augmentation de 3-4 jours au nord (figure 6.60). Le MRCC donne plutôt 5-6 jours d'augmentation sur les régions les plus au nord.

Le nombre de jours de gel-dégel annuel diminuera au-dessus du Québec au complet en 2050 selon l'ensemble des simulations des MCGs (figure 6.61). La médiane de diminution varie entre environ 2 et 6 jours pour différentes régions. Le 25^e percentile envisage une diminution entre 10 et 5 jours et la 75^e entre 2 jours et zéro. L'ensemble des simulations du MRCC ne projette aucun grand changement ; les valeurs de deltas sont très proche de zéro (entre +1 et -1 jour).

Les normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel pendant la saison de croissance définie pour les seuils de 0 et 5°C pour la période 1961-1990 sont montrées sur la figure 6.62 . Les changements de cette variable dans le futur sont montrés sur les figures 6.63 et 6.64 . L'ensemble des MCGs projette en général une diminution du nombre de jours de gel-dégel sur le domaine au complet sans une grande différence entre sud et nord. D'autre côté, le MRCC suggère un changement négatif plus important au nord du domaine qu'au sud. La médiane de delta des MCGs est située entre 0 et 4 jours de diminution tandis que celle du MRCC se trouve entre environ 10 jours au nord et 5 jours au sud.

Pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C, les résultats sont très semblables à ceux pour la saison de croissance de 0°C : les MCG donnent un changement généralement uniforme sur le domaine au complet, alors que le MRCC accentue la diminution de l'occurrence d'événement de gel-dégel au nord du Québec-Labrador (figure 6.64). Les valeurs de delta, dans ce cas, sont généralement plus petites que pendant la saison de croissance de 0°C.

La figure 6.65 montre les normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel pendant la saison de dormance définie pour les deux seuils, 0 et 5°C. Les changements de ce nombre pendant la saison de dormance de 0°C sont montrés sur la figure 6.66 . La médiane des changements simulée par les deux ensembles envisage une très petite diminution sur le domaine au complet. Le 75^e percentile des MCGs envisage une hausse du nombre d'événements de gel-dégel au sud du domaine allant jusqu'à 6-7 jours et une petite baisse de ce nombre au nord. Le 75^e percentile du MRCC projette très peu de changements sur le domaine au complet, entre +1 et -1 jour.

Pendant la saison de dormance de 5°C, la médiane des MCGs va jusqu'à dizaine de jours le plus au sud et elle atteint zéro le plus au nord du domaine. Celle du MRCC suggère les valeurs moins élevées et un gradient nord-sud moins important.

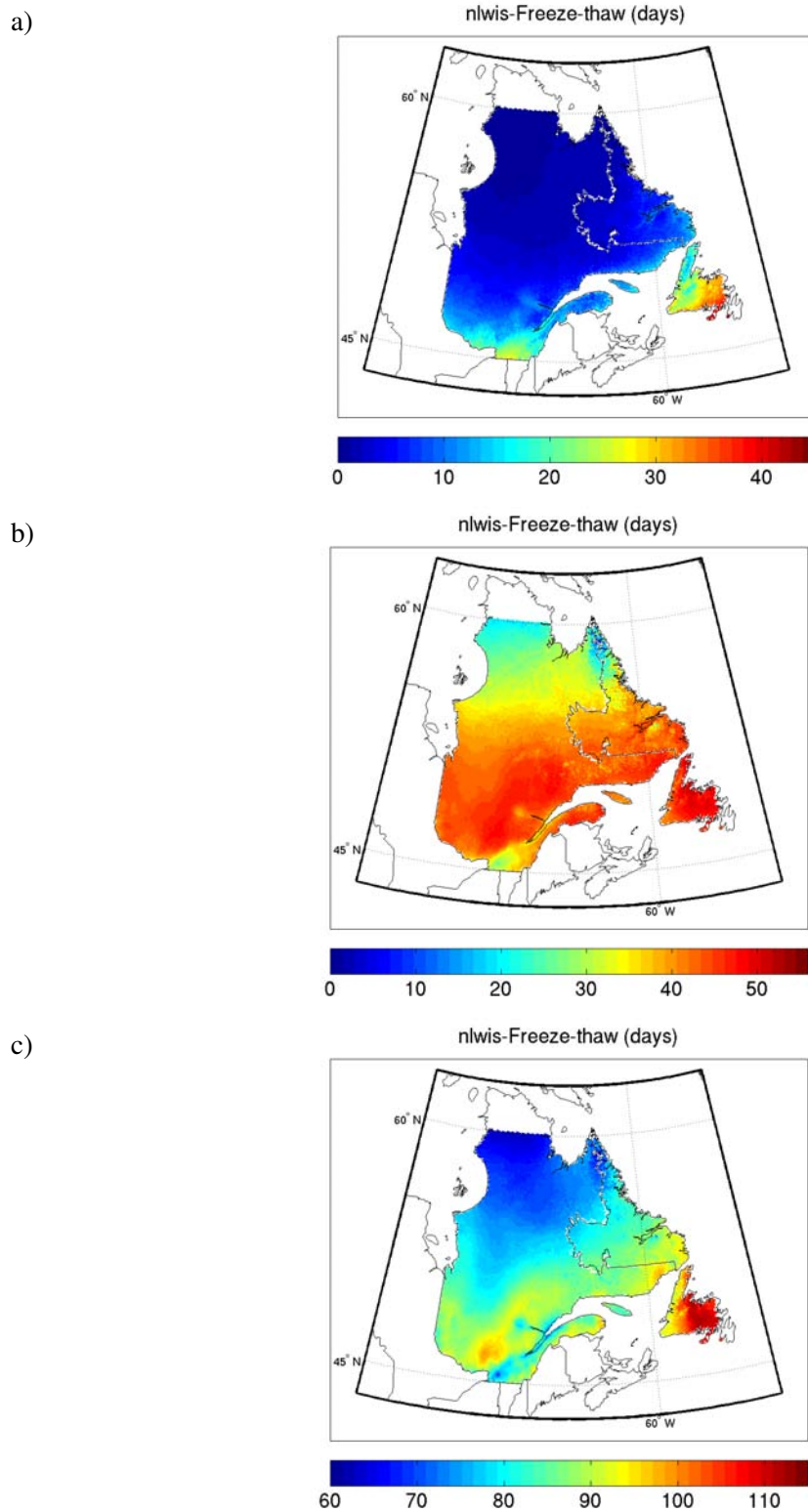


FIGURE 6.58: Normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant l'hiver (a), le printemps (b) et pendant une année (c) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

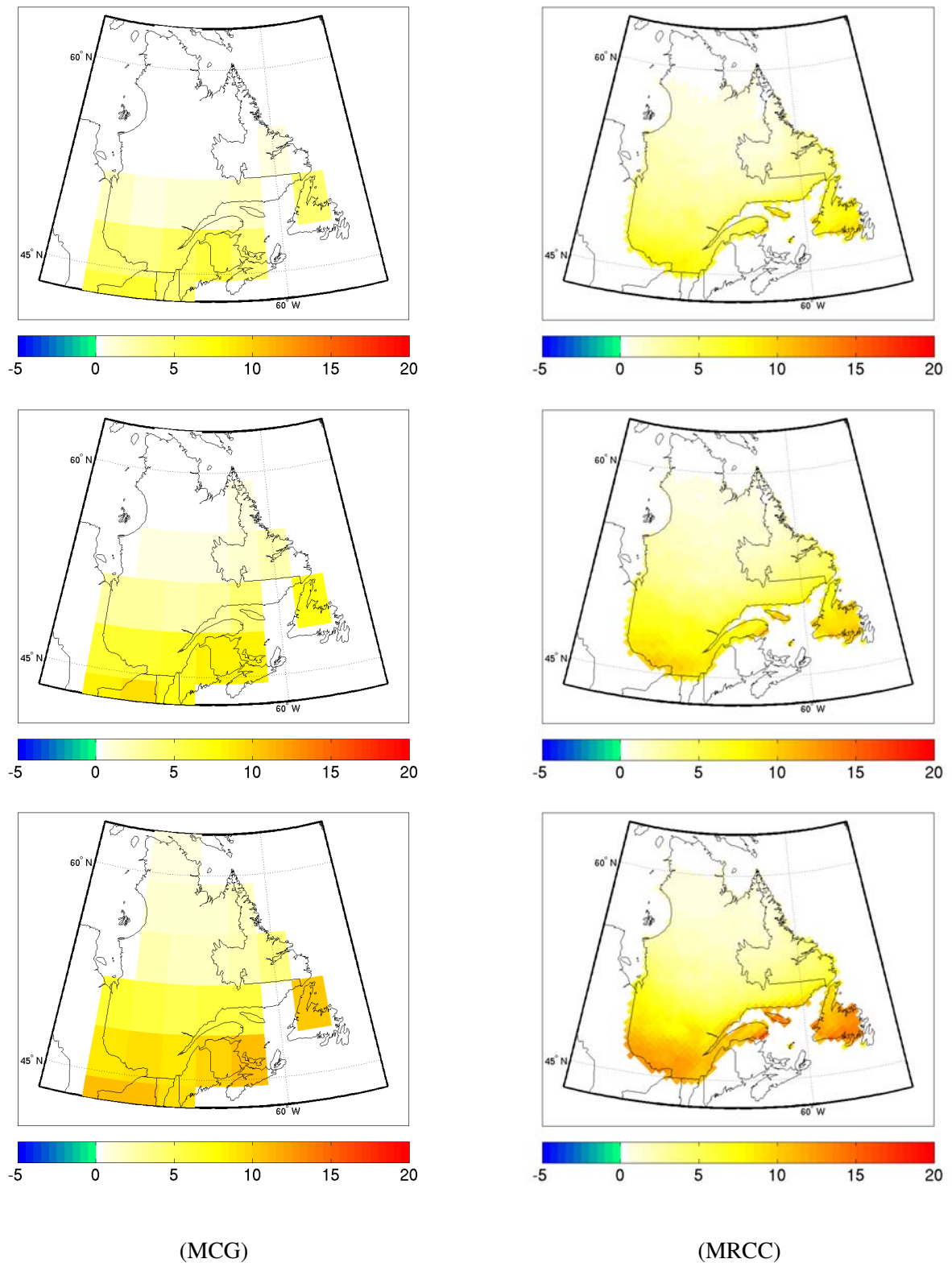


FIGURE 6.59: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant l'hiver pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

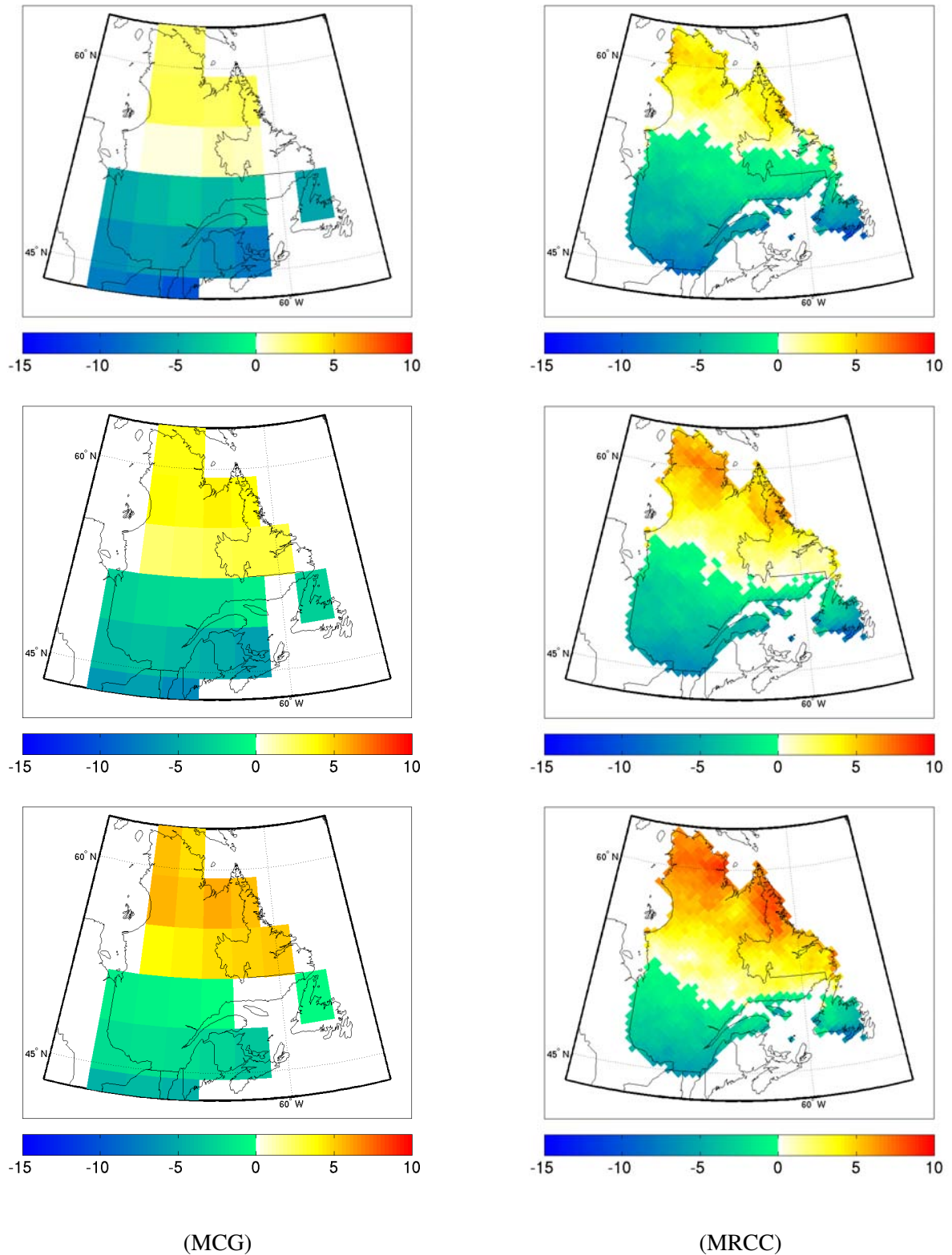


FIGURE 6.60: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant le printemps pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

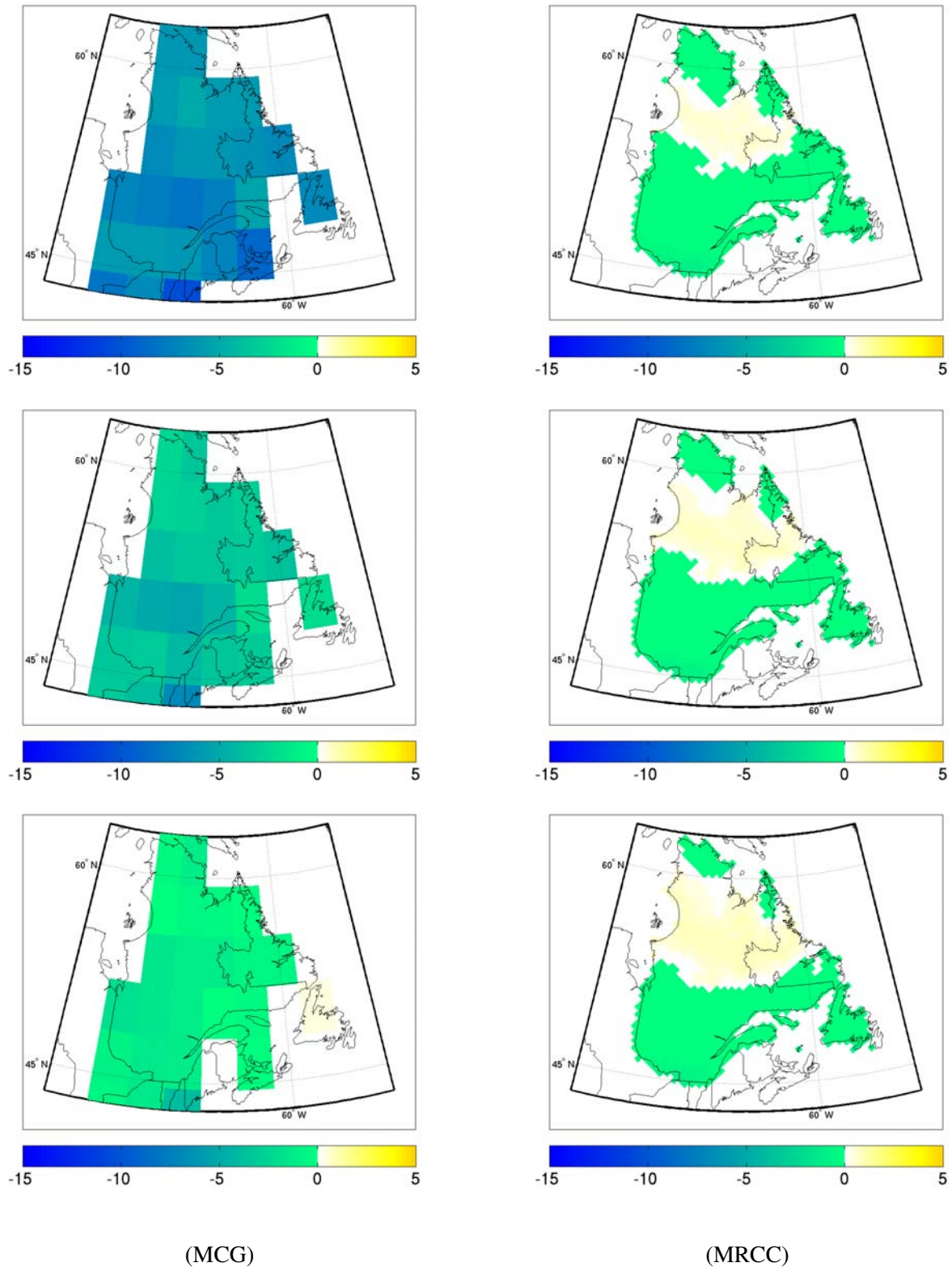
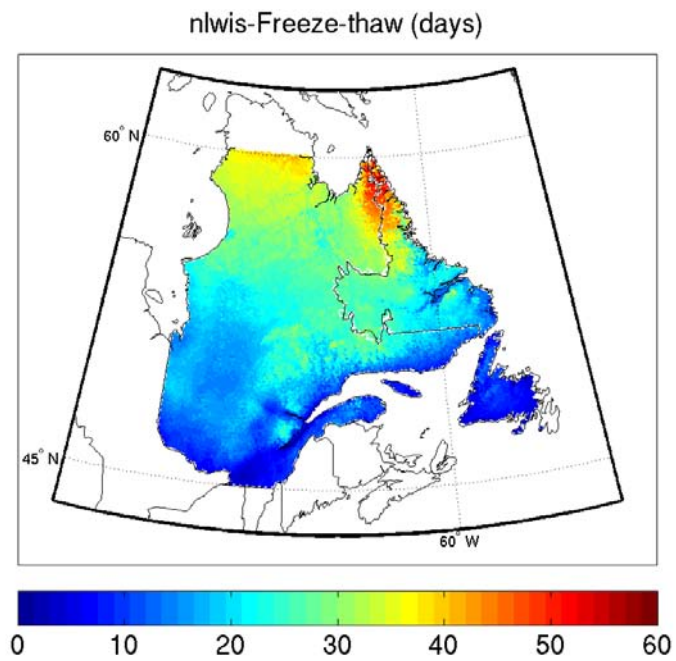


FIGURE 6.61: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel annuel (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations de MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

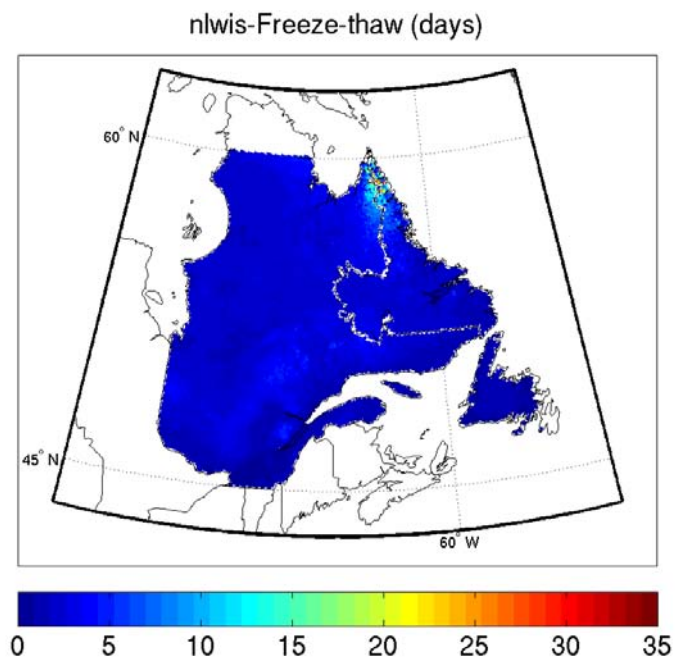


FIGURE 6.62: Normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

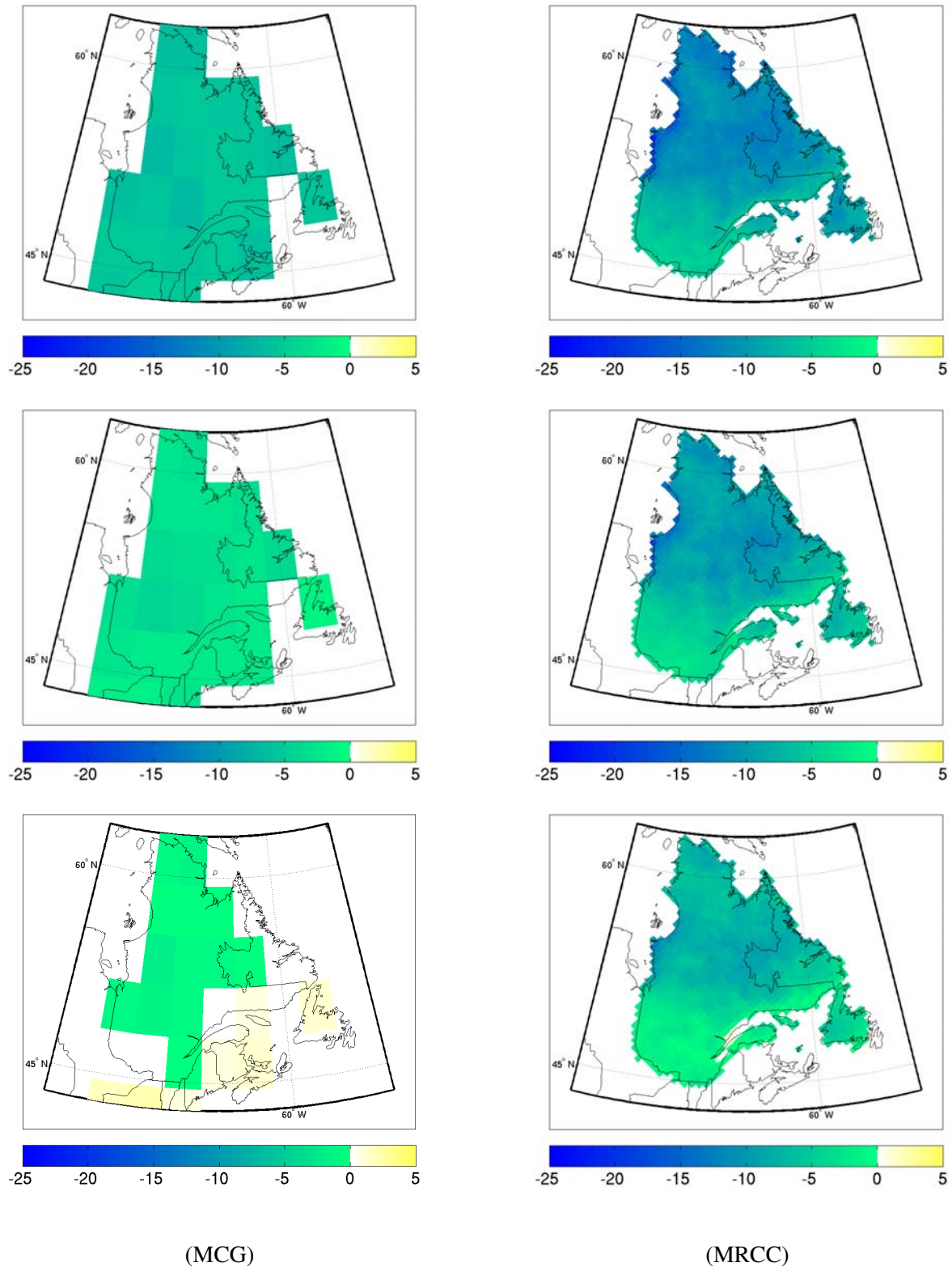


FIGURE 6.63: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

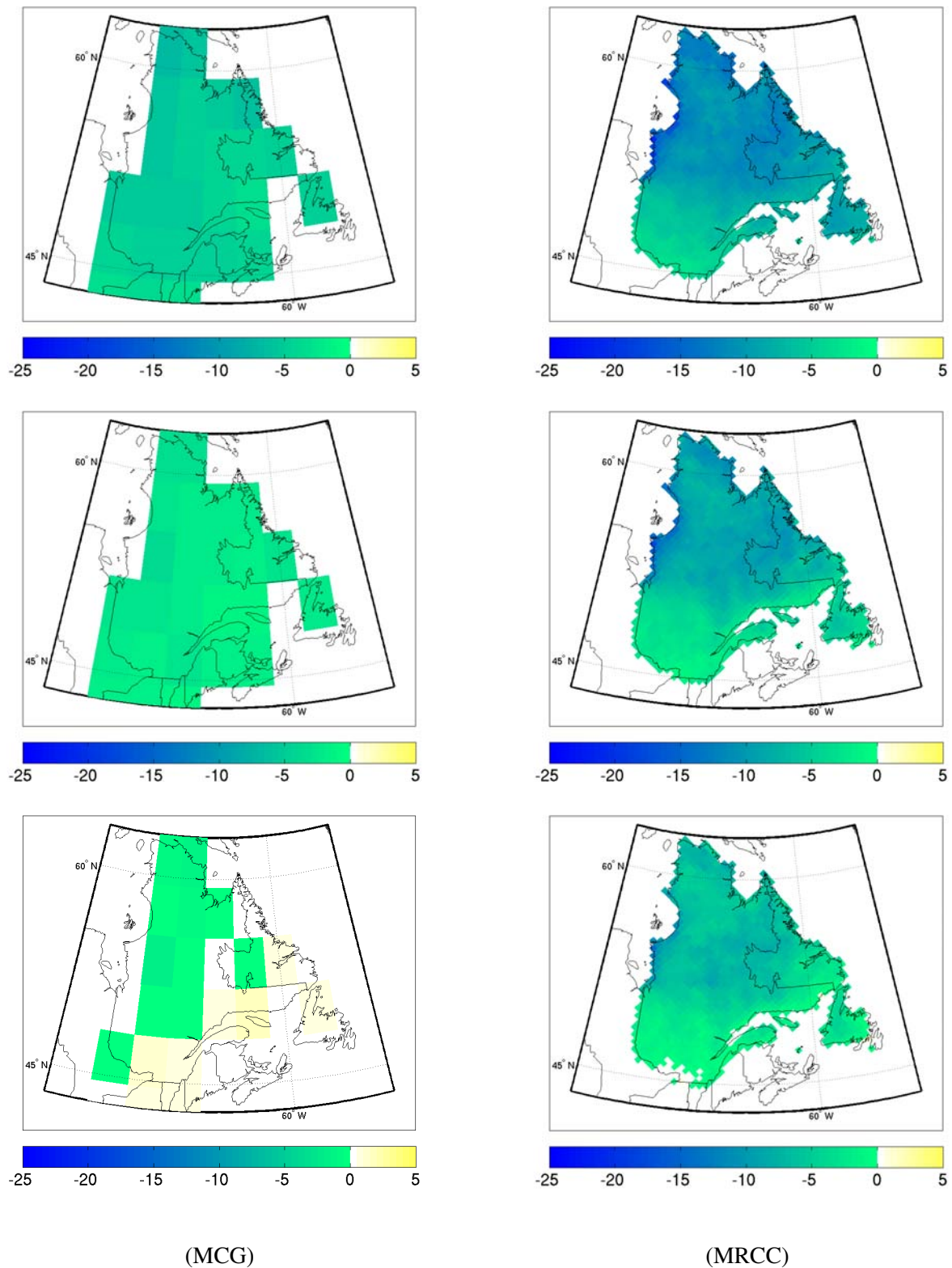
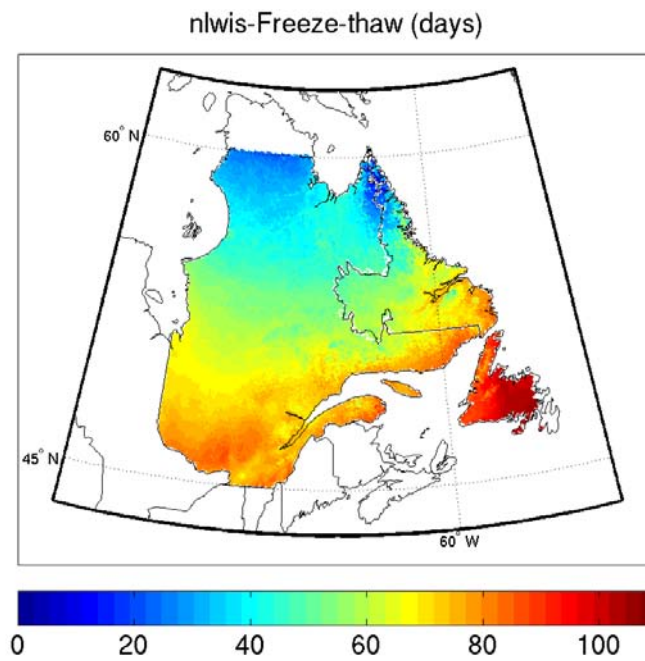


FIGURE 6.64: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant la saison de croissance définie pour le seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

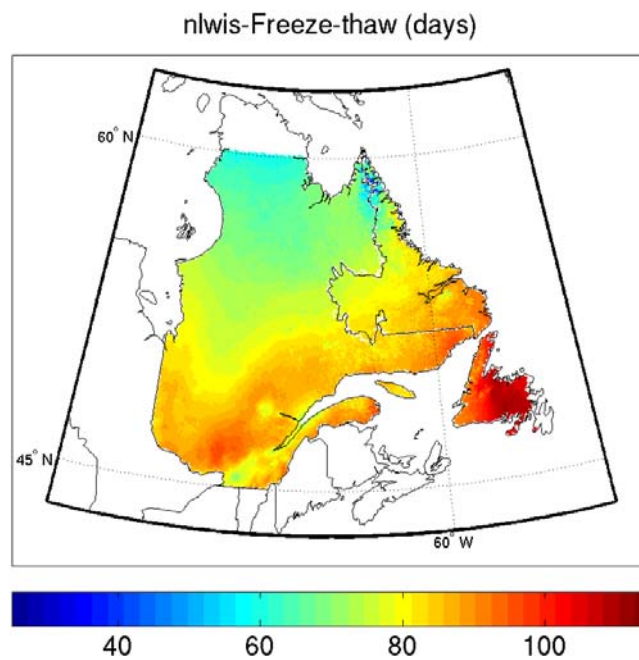


FIGURE 6.65: Normales climatiques du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant la saison de dormance définie pour le seuil de 0°C (a) et de 5°C (b) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

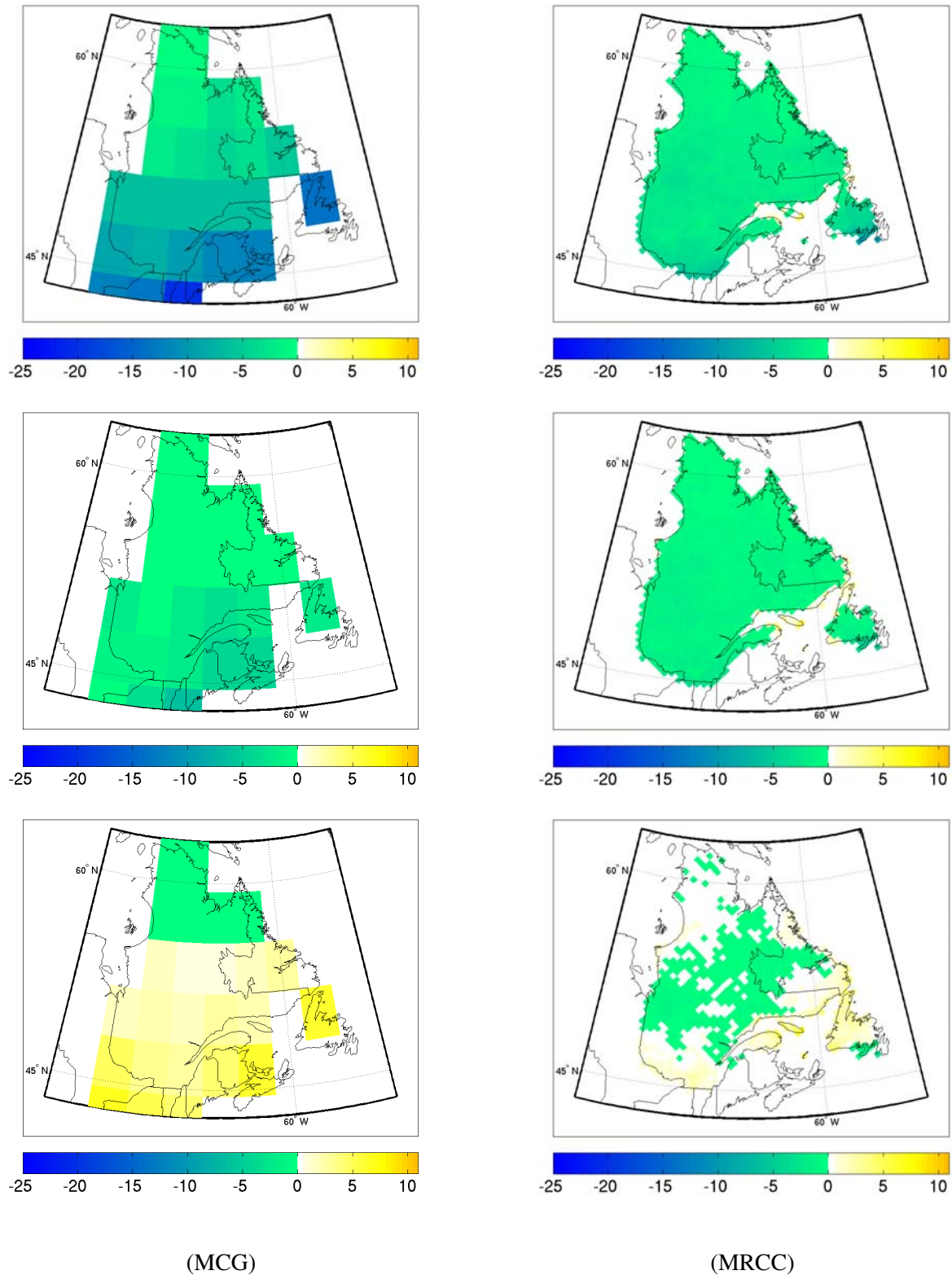


FIGURE 6.66: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant la saison de dormance définie pour le seuil de 0°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

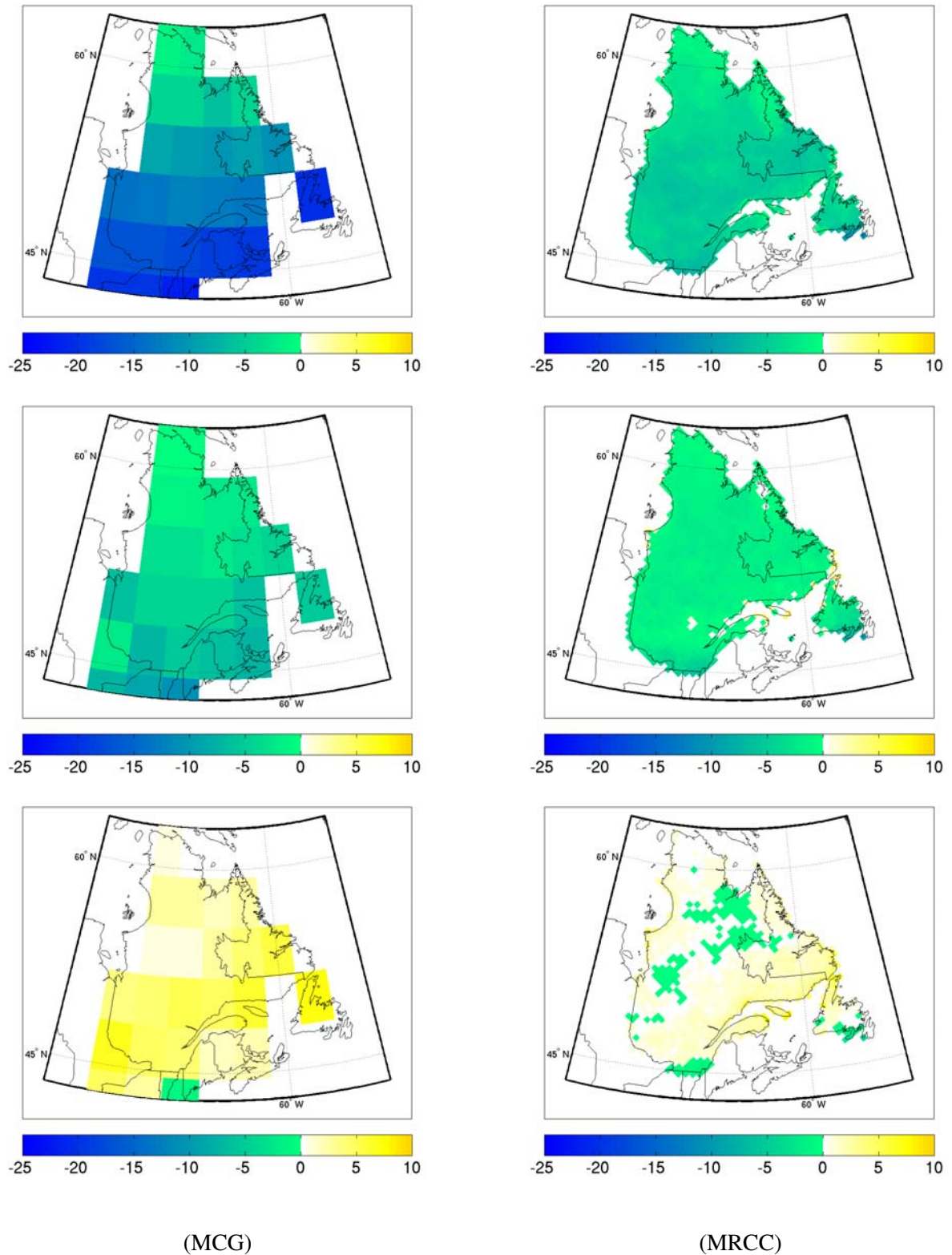


FIGURE 6.67: Deltas du nombre d'événements de gel-dégel (en jours) pendant la saison de dormance définie pour le seuil de 5°C pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

6.4.13 Températures extrêmes

Les changements de la fréquence moyenne et de la durée maximale d'événements avec les températures extrêmes telles que définies dans la section 5.3 ont été analysés dans cette sous-section.

Fréquence moyenne d'événements avec les températures extrêmes

Les normales de la fréquence d'événements chauds sont montrées sur la figure 6.68. La figure 6.69 montre les changements attendus pour l'horizon 2050 de la fréquence des jours avec la température maximale plus élevée que 20°C. La médiane des MCGs envisage peu de changements. Elle projette une diminution d'un événement par année au sud du Québec et une augmentation de 2-3 événements par année au-dessus de la partie centrale du domaine. L'ensemble du MRCC suggère une augmentation plus importante au-dessus de la Côte-Nord et de la région centrale du Québec, d'environ 5 événements et une diminution d'environ 1-2 événements par année au sud du Québec. Il est important de remarquer que la Côte-Nord et la Baie-James sont les régions avec la plus grande augmentation attendue selon tous les trois percentiles.

La fréquence d'événements avec la température maximale plus élevée que 25°C (figure 6.70) augmentera au sud de la 52^e parallèle environ 2-5 événements (25^e percentile), 3-6 événements (médiane) et d'environ 5-7 événements par année (75^e percentile). Au nord du domaine, les changements attendus sont plus petits qu'un événement par année.

La fréquence d'événements avec la température maximale plus élevée que 30°C subira une hausse surtout importante au sud de 48°N. La médiane de l'ensemble des MCGs est située entre 2-3 événements par année, lorsque celle du MRCC atteint les valeurs de 5 jours par année. Comme ces événements ne se produisent jamais au nord du Québec, leur nombre restera inchangé dans le futur.

Les normales de la fréquence des jours froids sont montrées sur la figure 6.72.

Le changement de la fréquence d'événements avec la température minimale plus basse que -30°C est montré sur la figure 6.73. On peut remarquer une diminution de la fréquence de ces événements surtout au-dessus de la région centrale du Québec. Le MRCC projette une baisse plus importante que celle suggérée par l'ensemble des MCGs. La valeur médiane du MRCC varie entre 3 jours et une semaine comparé à celle des MCGs qui est située entre 2 et 5 jours.

La fréquence d'événements avec la température minimale plus petite que -35°C diminuera aussi (figure 6.74), mais cette diminution sera plus importante le plus au nord où l'occurrence de ces températures est la plus grande. Au sud du domaine, où les températures tellement basses ne se produisent jamais, la fréquence d'événements ne changera pas. La médiane des MCGs est située autour de -3 événements par année au nord du domaine et celle du MRCC autour -7 événements.

La fréquence d'événements avec la température plus basse que -40°C diminuera très peu et surtout au nord de 55°N. La médiane des MCGs projette un changement négatif de -2 à -2 événements. Le MRCC accentue ce changement négatif donnant -5 événements par année.

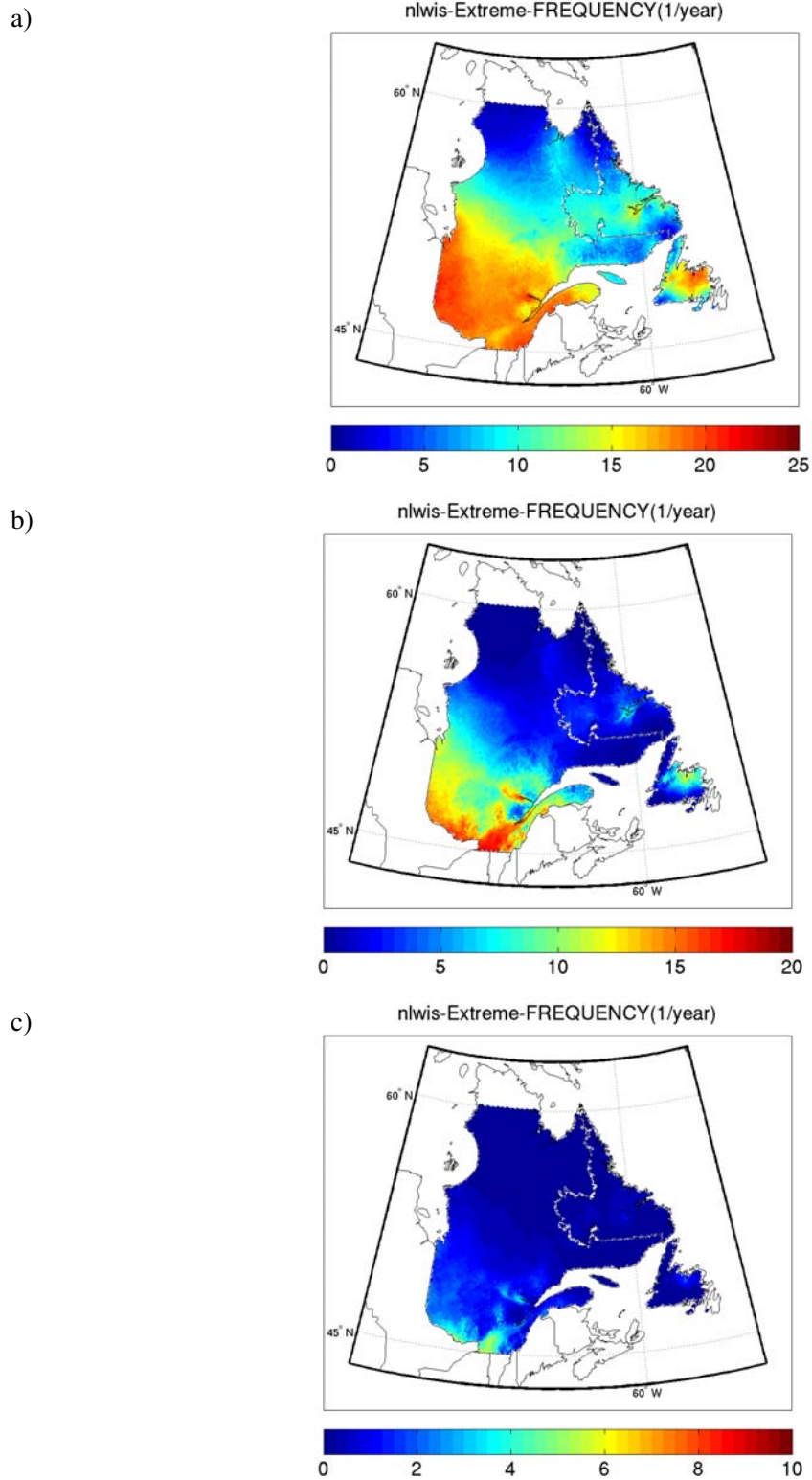


FIGURE 6.68: Normales climatiques de la fréquence moyenne d'événements avec la température maximale plus élevée que 20°C (a), 25°C (b) et 30°C (c) (en 1/année) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

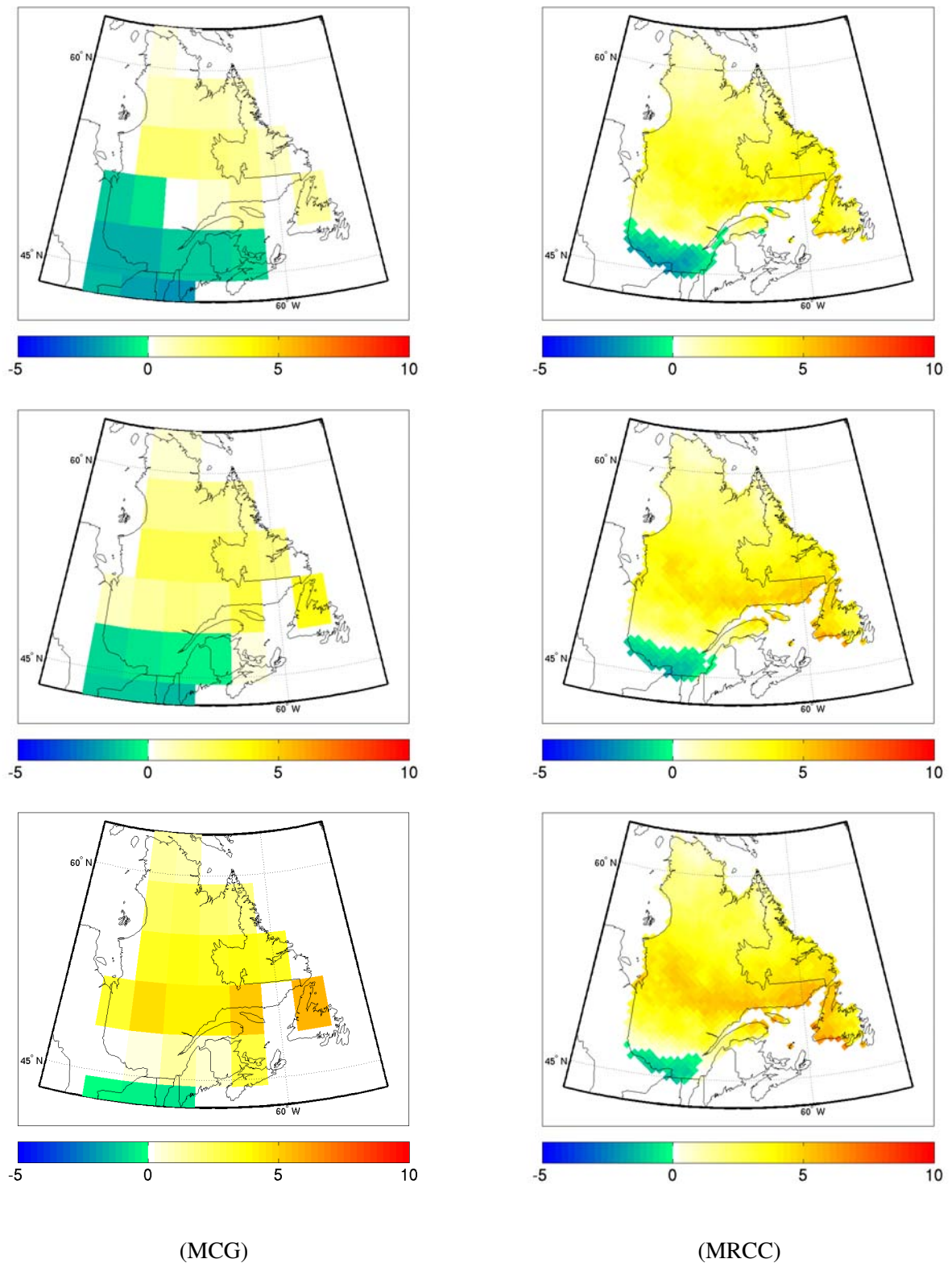


FIGURE 6.69: Deltas de la fréquence moyenne d'événements avec la température maximale plus élevée que 20°C (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

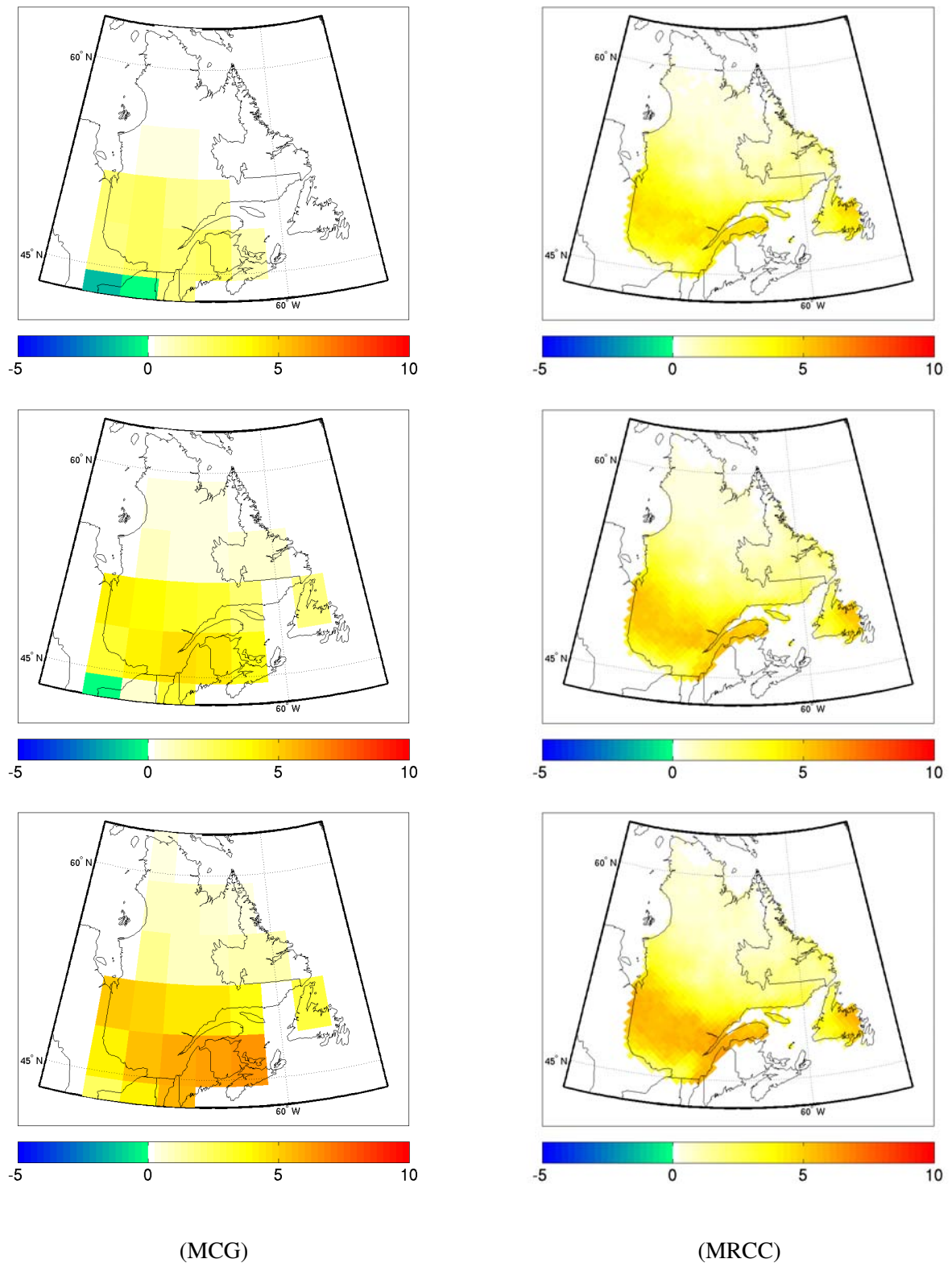


FIGURE 6.70: Deltas de la fréquence moyenne d'événements avec la température maximale plus élevée que 25°C (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

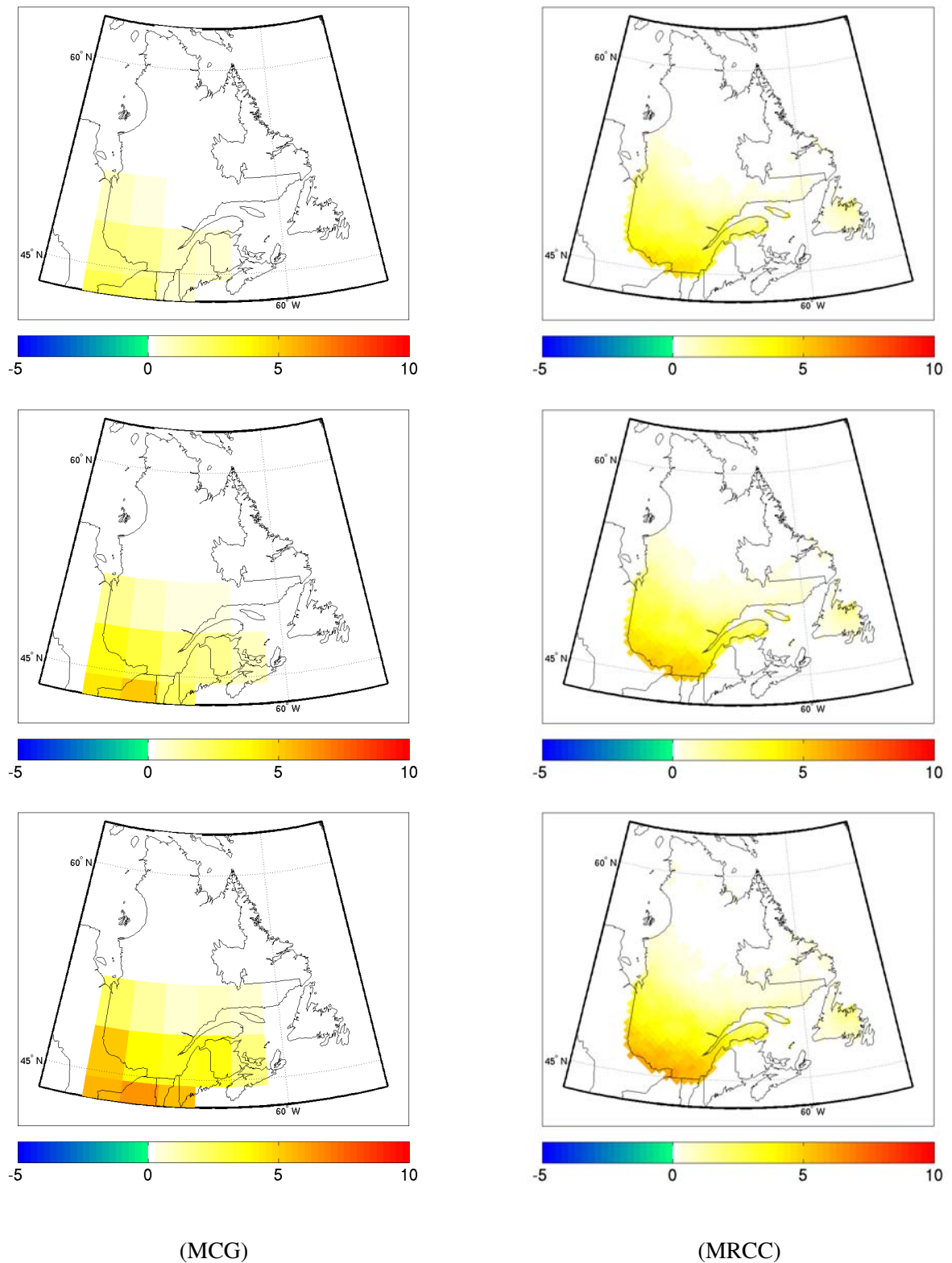


FIGURE 6.71: Deltas de la fréquence moyenne d'événements avec la température maximale plus élevée que 30°C (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

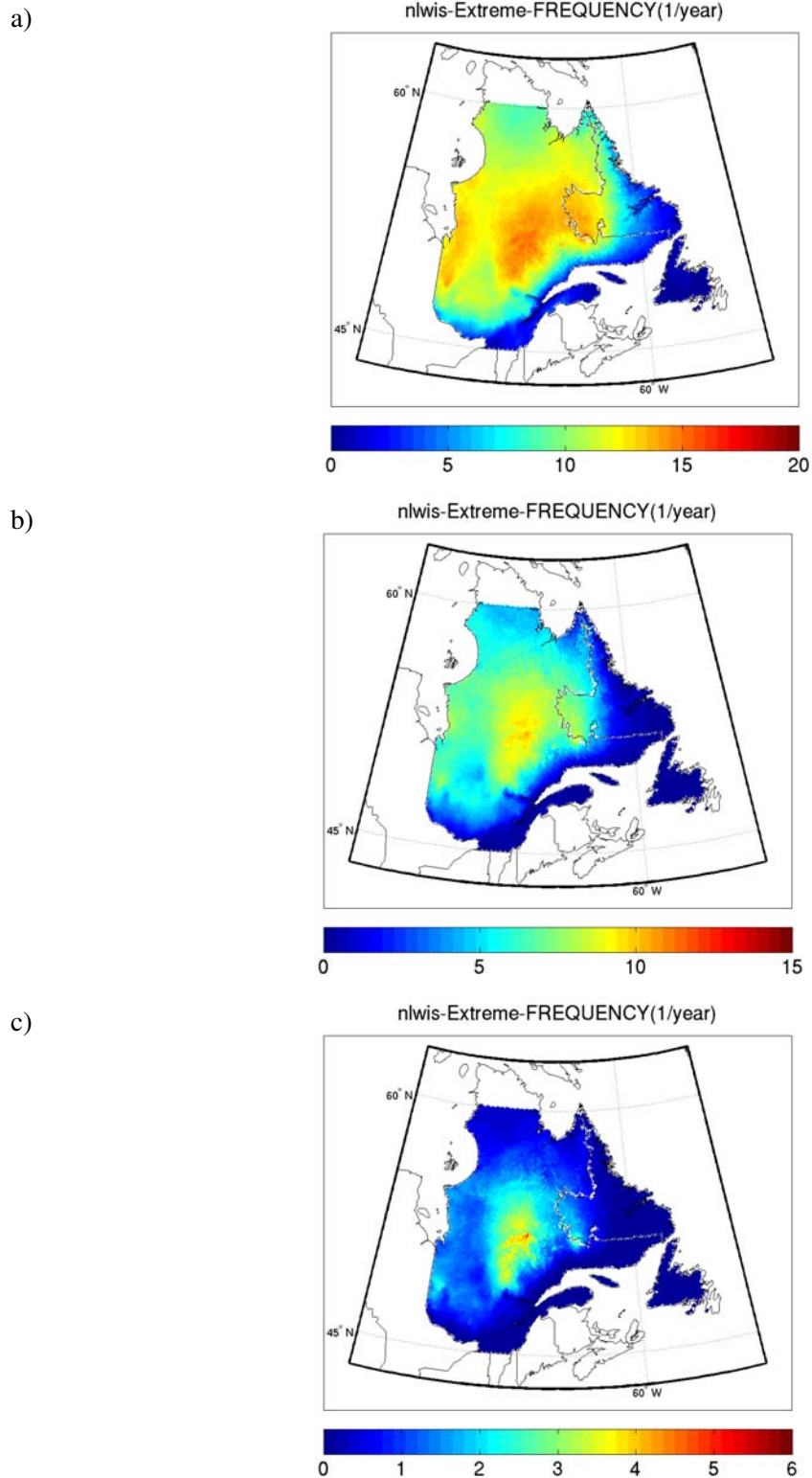


FIGURE 6.72: Normales climatiques de la fréquence moyenne d'événements avec la température minimale plus basse que -30°C (a), -35°C (b) et -40°C (c) (en 1/année) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

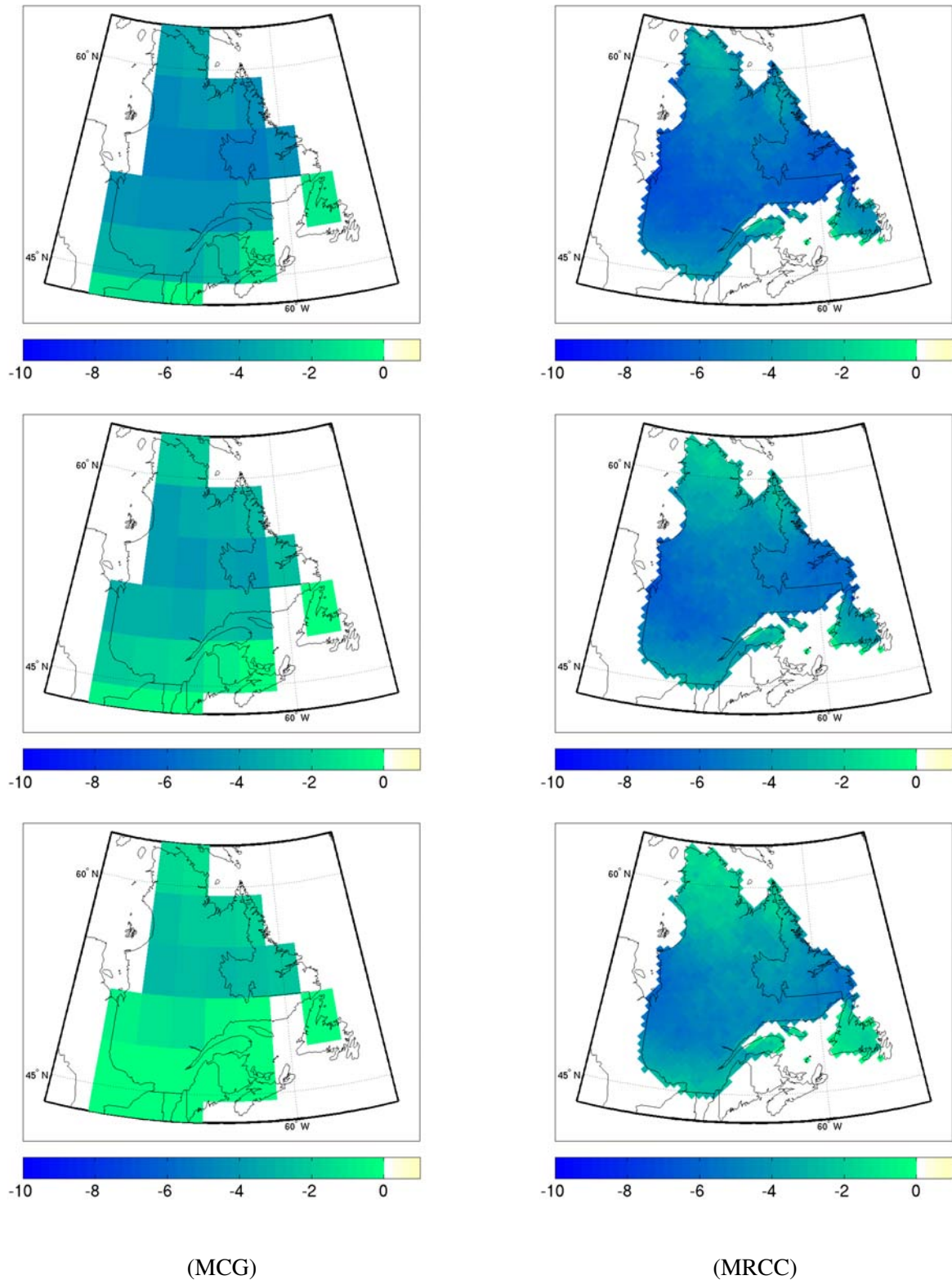


FIGURE 6.73: Deltas de la fréquence moyenne d'événements avec la température minimale plus basse que -30°C (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

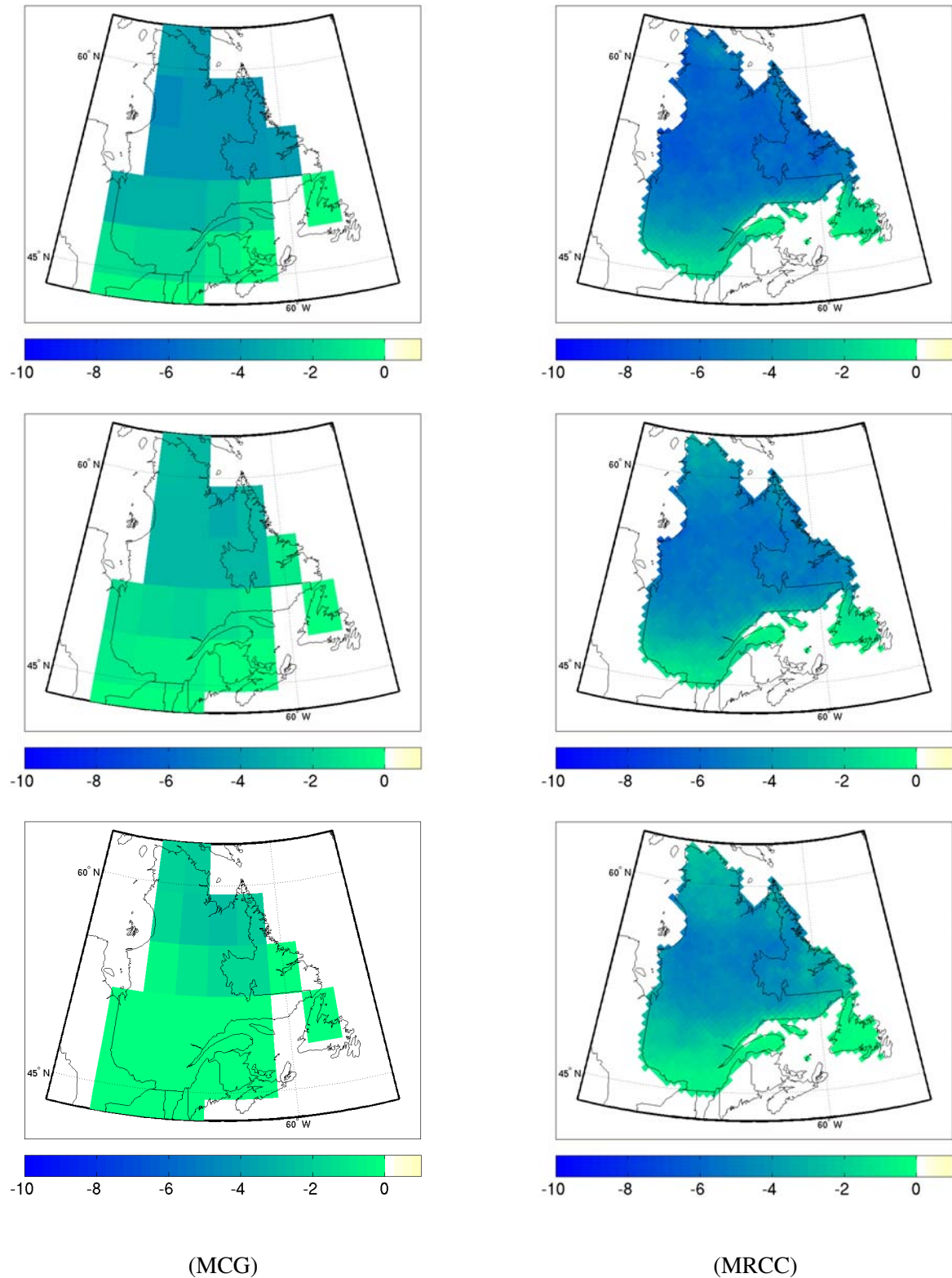


FIGURE 6.74: Deltas de la fréquence moyenne d'événements avec la température minimale plus basse que -35°C (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

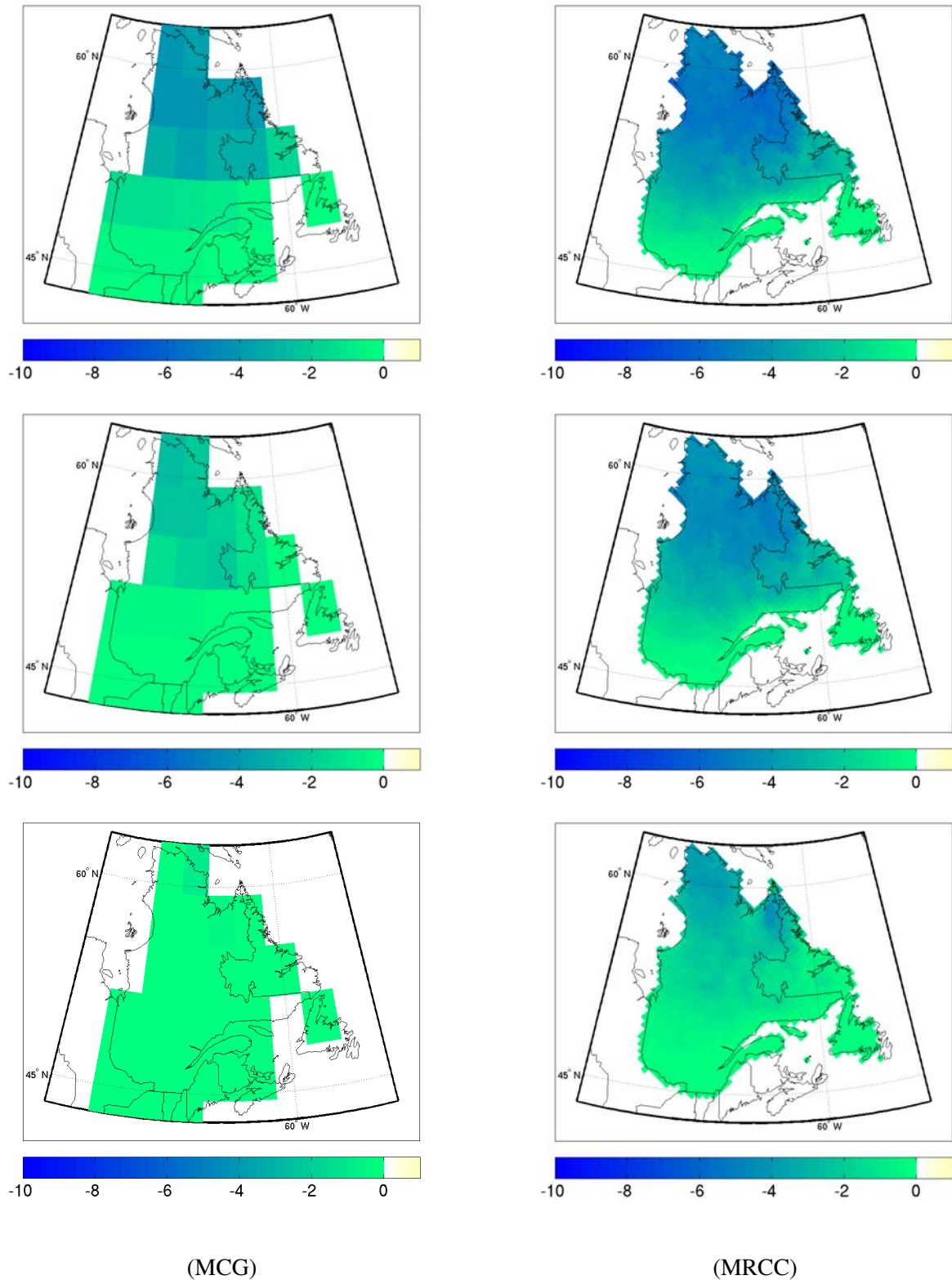


FIGURE 6.75: Deltas de la fréquence moyenne d'événements avec la température minimale plus basse que -40°C (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

Durée maximale d'événements avec les températures extrêmes

La durée maximale d'événements avec les températures extrêmes est définie dans la section 5.3 . Les normales de la durée des extrêmes chauds sont montrées sur la figure 6.76 .

Les deltas des changements projetés de ces événements pour l'horizon 2050 sont montrés sur les figures 6.77 - 6.79 . La durée d'événements avec la température maximale plus élevée que 20°C augmentera au sud du Québec et changera très peu au nord (figure 6.77). La médiane des MCGs donne un changement entre 10 et 20 jours au sud d'environ 52°N. Le MRCC suggère des valeurs semblables, mais plus accentuées d'environ 28 jours le plus au sud. Au nord du Québec-Labrador, les changements projetés sont plus petits que 3 jours pour tous les percentiles et selon les deux ensembles.

La durée d'événements chauds avec la température maximale plus grande que 25°C changera peu dans le futur au-dessus du domaine au complet (figure 6.78). La seule région avec un changement plus grand que 5 jours sera la Montérégie, selon l'ensemble des simulations du MRCC. La médiane de deltas atteint des valeurs d'environ 10 jours sur cette région. La médiane de l'ensemble des MCGs projette une faible hausse de moins que 5 jours au sud du Québec.

Les changements de la durée d'événements avec la température plus grande que 30°C seront très petits. Les deux ensembles donnent des valeurs très semblables : l'augmentation d'environ 1-2 jours se produira seulement au sud du Québec (figure 6.79).

Les normales climatiques de la durée d'événements froids sont montrées sur la figure 6.80 .

La durée d'un événement avec la température minimale plus petite que -30°C diminuera dans le futur (figure 6.81). La médiane de delta des MCGs prend les valeurs de -5 à -10 jours entre 52°N et 62°N. Le MRCC accentue un peu ces changements au-dessus des régions montagneuses au nord.

Les changements de la durée d'un événement avec la température minimale plus basse que -35°C (figure 6.82) sont négatifs. La médiane des MCGs projette une diminution entre -5 et -6 jours au-dessus d'Ungava et aucun changement au sud du domaine. La médiane du MRCC varie entre zéro au sud et -7 à -8 jours au nord.

La durée d'événements avec la température minimale plus basse que -40°C diminuera aussi dans le futur. Cette diminution est la plus importante au nord du Québec où ces événements se produisent le plus fréquemment. La médiane de changement est située entre -2 et -3 jours, selon les MCG et elle va jusqu'à -5 jours le plus au nord, selon l'ensemble de MRCC.

6.4.14 Degrés-jours de températures extrêmes

Les changements du nombre de degrés-jours de chaud accumulés pendant les jours avec la température maximale plus élevée que 20°C, 25°C et 30°C ainsi que les changements du nombre de degrés-jours de froid accumulés pendant des jours avec la température minimale plus basse que -30°C, -35°C et -40°C ont été analysés dans cette section. Les normales du nombre de degrés-jours de chaud sont montrées sur la figure 6.84 .

Les changements du nombre de degrés-jours de chaud pour la température plus grande que 20°C sont sur la figure 6.85 . On peut voir que ce nombre augmentera dans le futur surtout au sud du Québec selon les deux ensembles. La médiane des MCGs projette une augmentation entre 10

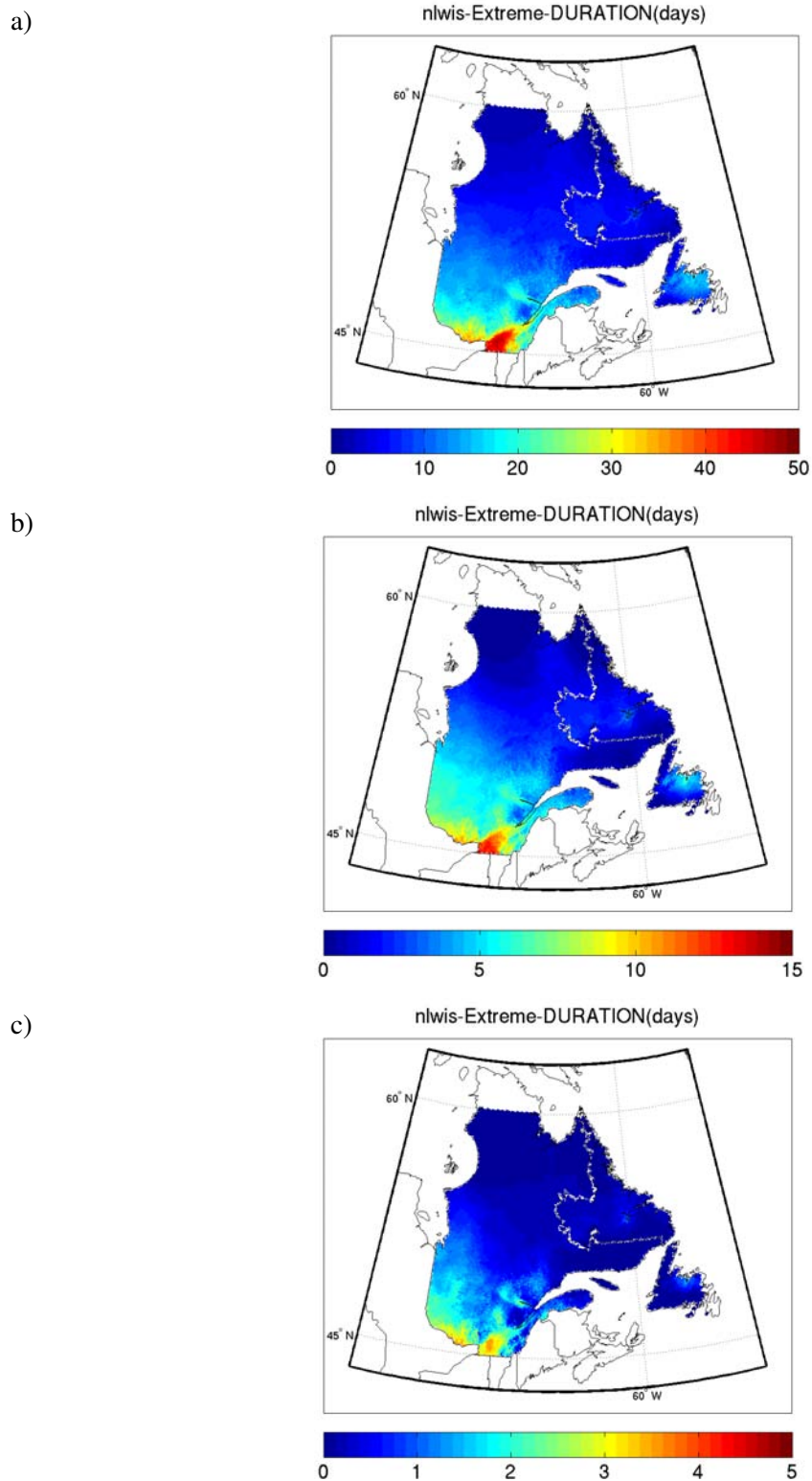


FIGURE 6.76: Normales climatiques de la durée maximale d'événements avec la température maximale plus élevée que 20°C (a), 25°C (b) et 30°C (c) (en jours) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

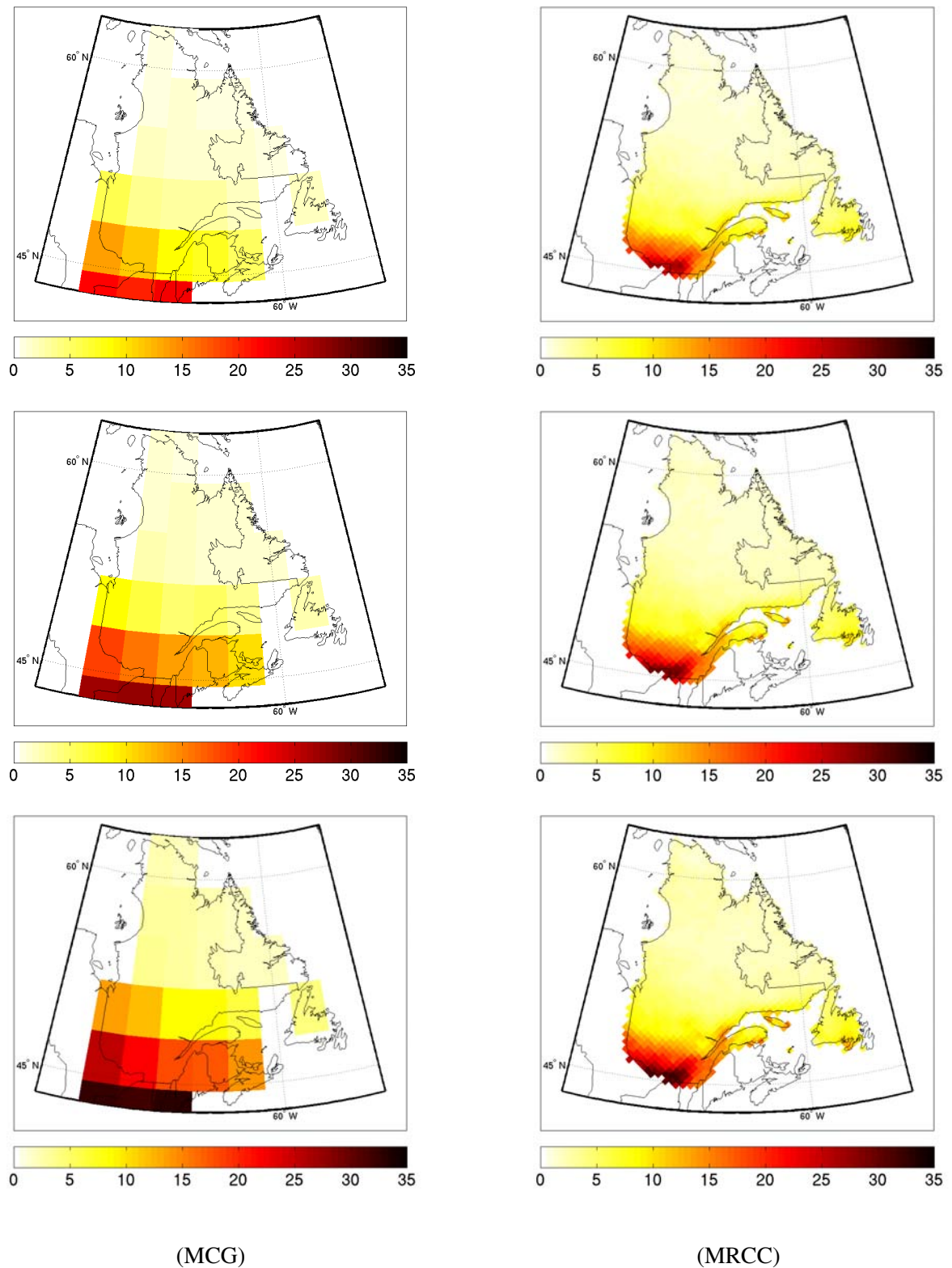


FIGURE 6.77: Deltas de la durée maximale d'événements avec la température maximale plus élevée que 20°C (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

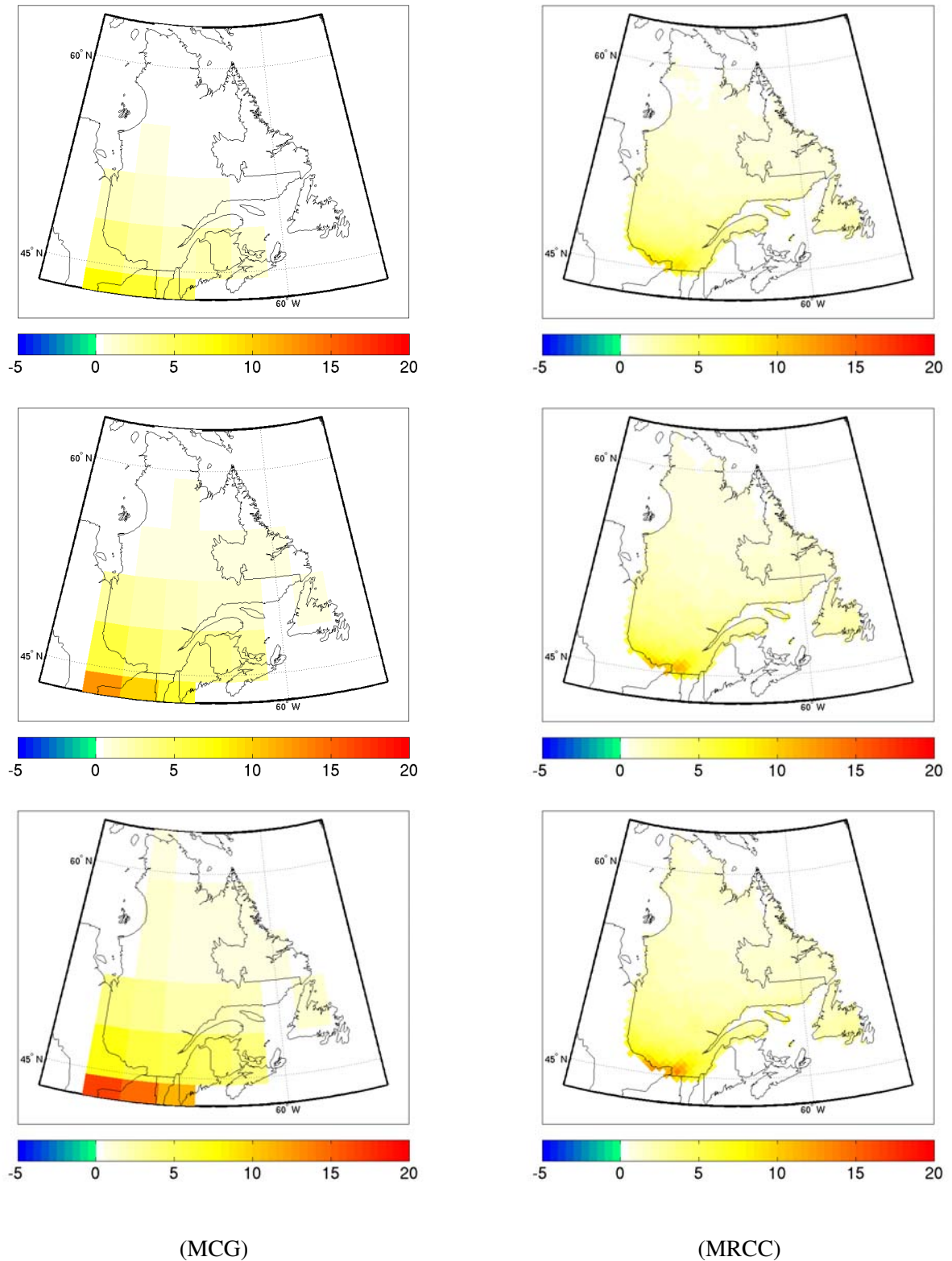


FIGURE 6.78: Deltas de la durée maximale d'événements avec la température maximale plus élevée que 25°C (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

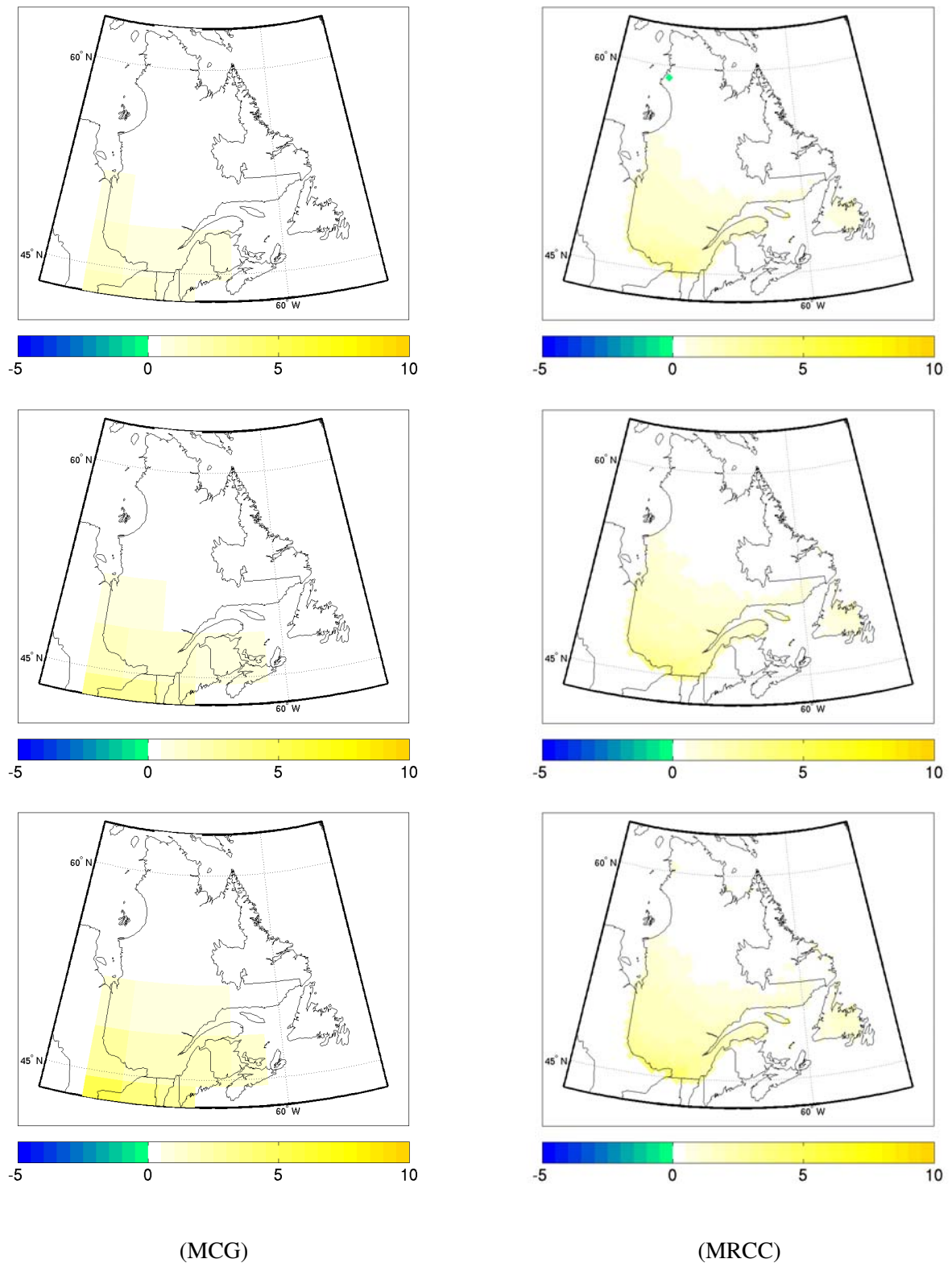


FIGURE 6.79: Deltas de la durée maximale d'événements avec la température maximale plus élevée que 30°C (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

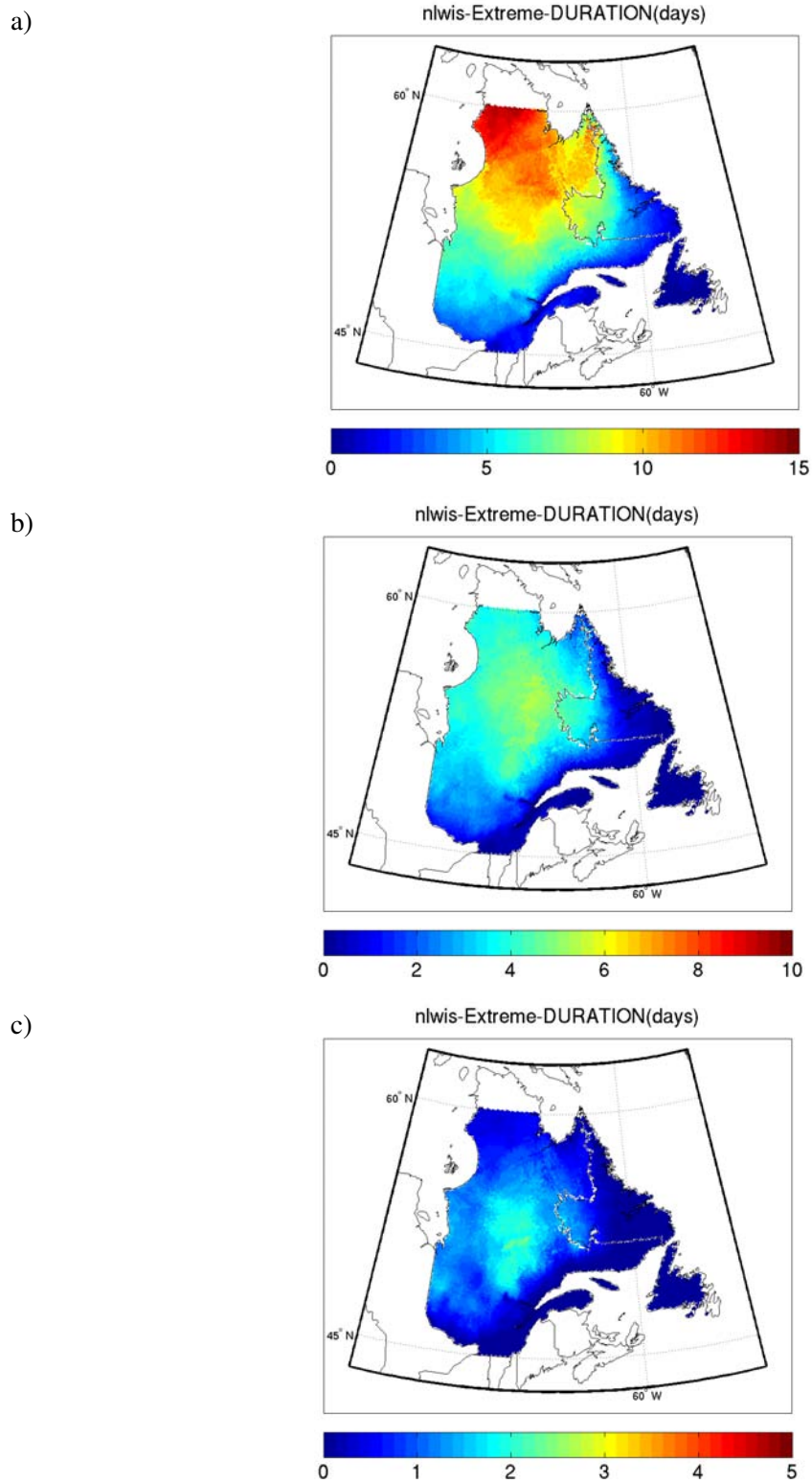


FIGURE 6.80: Normales climatiques de la durée maximale d'événements avec la température minimale plus basse que -30°C (a), -35°C (b) et -40°C (c) (en jours) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

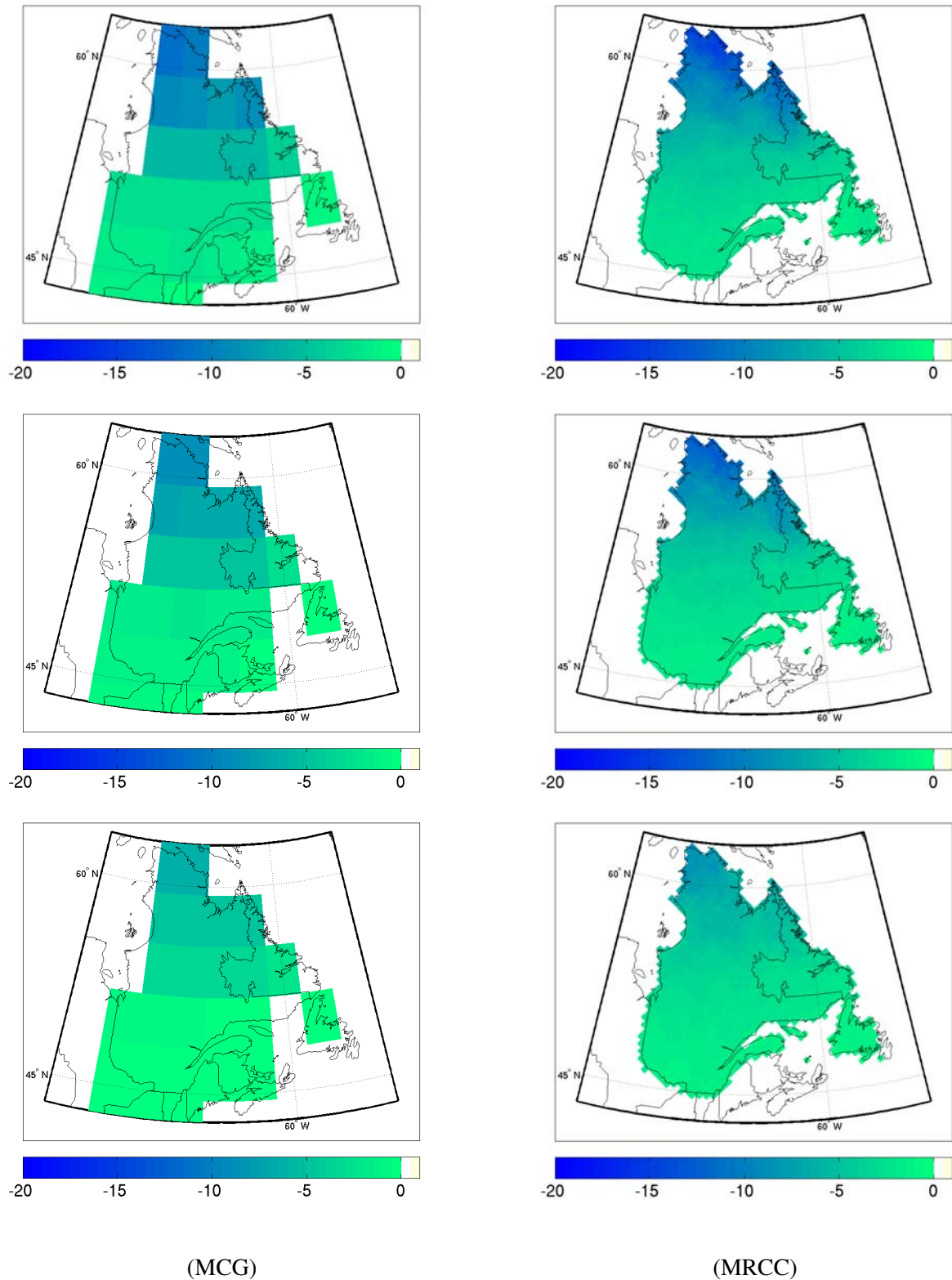


FIGURE 6.81: Deltas de la durée maximale d'événements avec la température minimale plus basse que -30°C (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

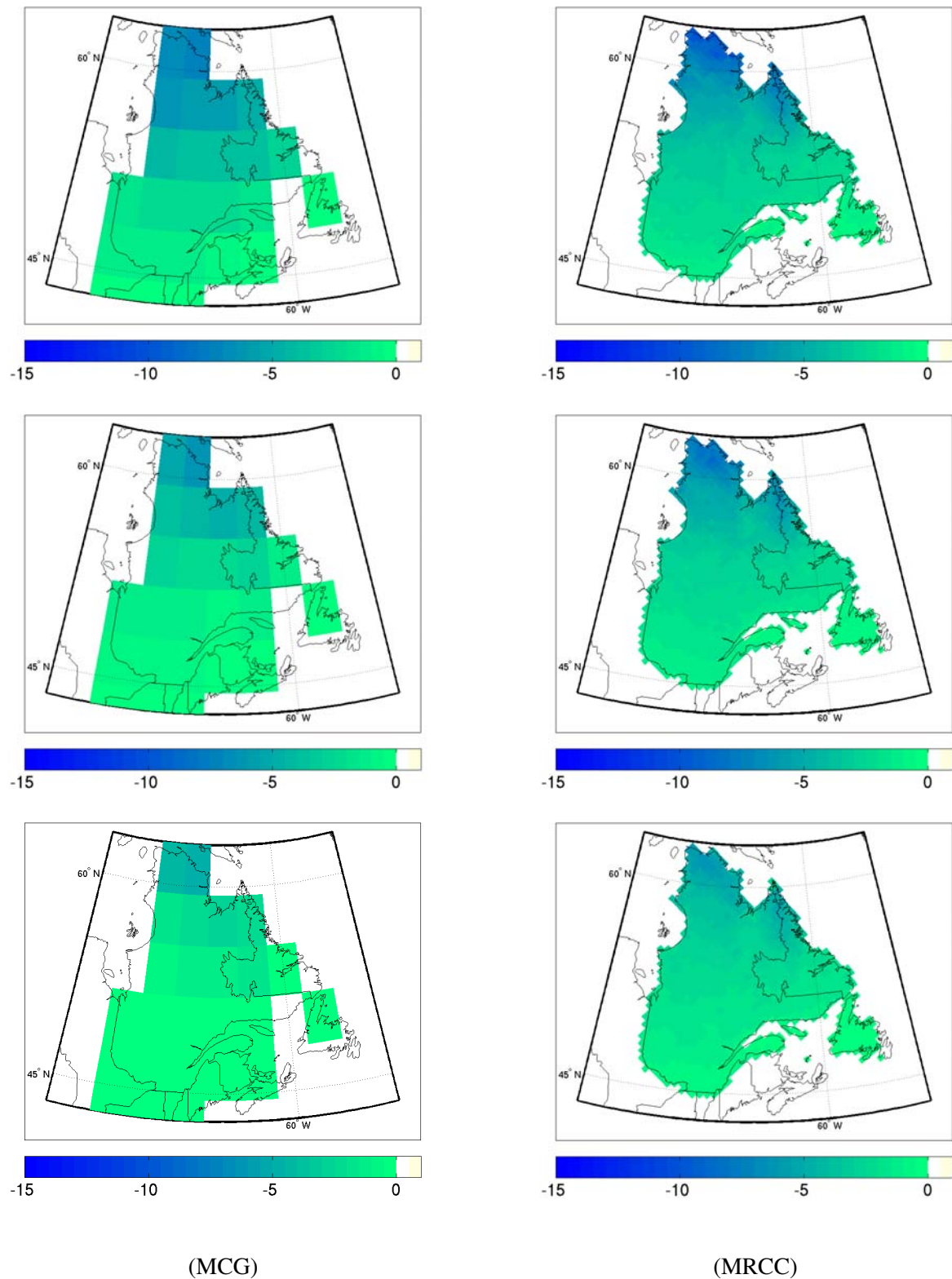


FIGURE 6.82: Deltas de la durée maximale d'événements avec la température minimale plus basse que -35°C (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

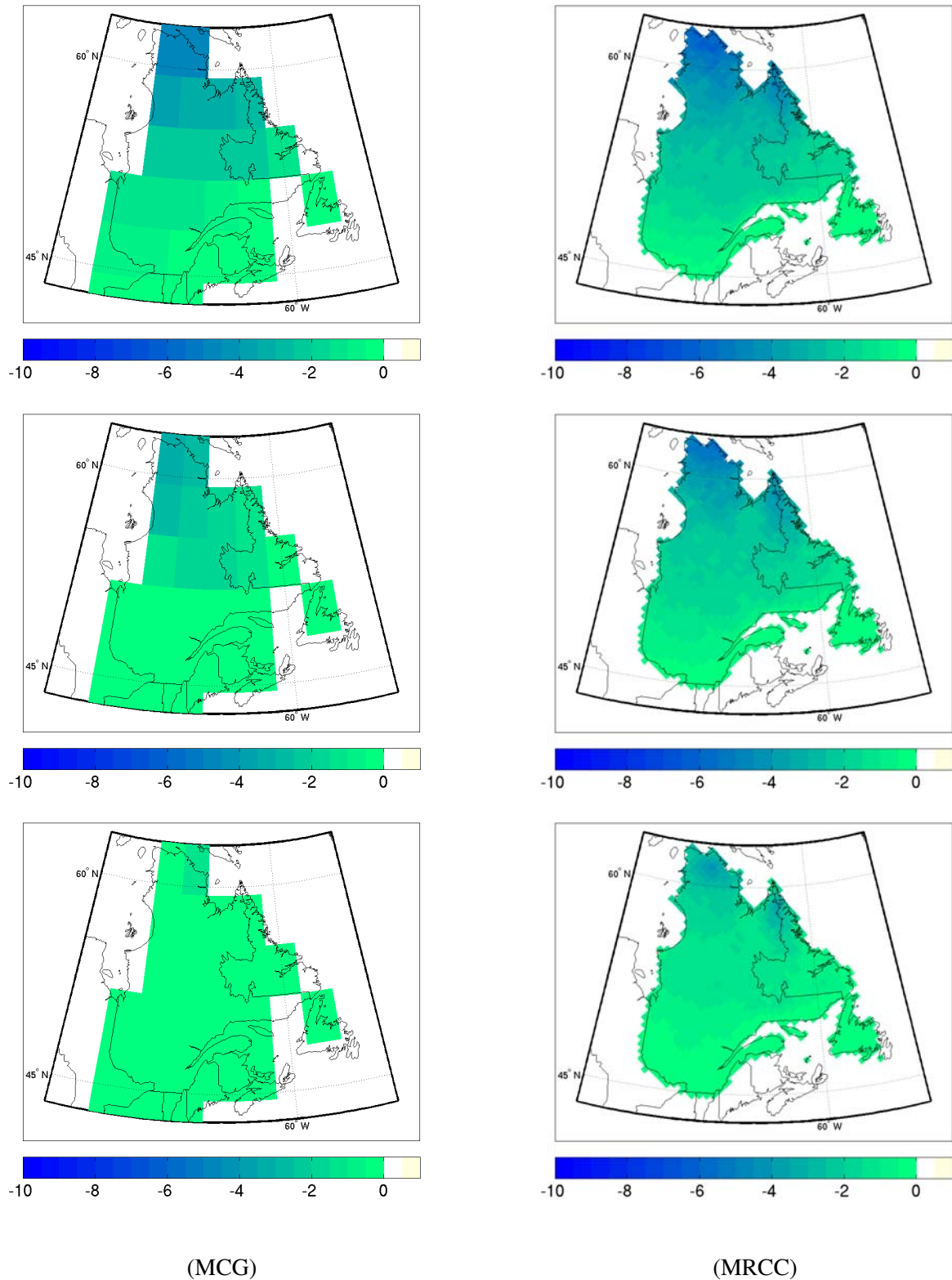


FIGURE 6.83: Deltas de la durée maximale d'événements avec la température minimale plus basse que -40°C (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

degrés-jours au nord et 220 degrés-jours au sud-ouest du Québec. Le MRCC accentue les valeurs projetées par les MCGs surtout au sud du domaine où les valeurs montent jusqu'à 360-370 degrés-jours.

Le nombre de degrés-jours de chaud pour la température maximale plus élevée que 25°C subira aussi une hausse en 2050 (figure 6.86). Au nord du domaine il n'y aura pas de changement. Au sud, la médiane des MCGs projette une augmentation du nombre de degrés-jours de chaud entre 50 et 110 degrés-jours. Le maximum d'augmentation est attendu au sud-ouest du Québec selon l'ensemble des MCGs. Les changements projetés par le MRCC sont plus importants au sud du Québec que ceux simulés par les MCGs. La médiane projette une hausse entre 150 et 160 degrés-jours pour cette région.

Le nombre de degrés-jours de chaud accumulés pendant les jours avec la température plus grande que 30°C changera peu dans le futur (figure 6.87). La médiane des MCGs suggère une hausse plus basse que 20 degrés-jours et celle du MRCC proche de 90 degrés-jours. Ces changements se produiront au sud du domaine seulement car la température ne montera jamais au-dessus 30°C au nord du Québec.

La figure 6.88 montre les normales climatiques du nombre de degrés-jours de froid pour la période de référence (1961-1990) obtenues à partir des observations NLWIS/SNITE. Les valeurs négatives sont le résultats des températures négatives prises pour les seuils à partir desquels l'accumulation de degrés-jours commence.

Les changements du nombre de degrés-jours accumulés à partir de la température minimale plus basse que -30°C sont sur la figure 6.89. Ce nombre diminuera dans le futur par tout où ces températures se produisent présentement. Ceci est en accord avec l'augmentation générale de la température minimale au-dessus du domaine au complet. La médiane des MCGs prend des valeurs d'environ -220, -230 degrés-jours le plus au nord du domaine et celle du MRCC descend jusqu'à -350 degrés-jours sur la même région.

Le nombre de degrés-jours de froid au-dessous de -35°C diminuera aussi en 2050 (figure 6.90). Cette diminution sera entre -100 et -130 degrés-jours selon la médiane des MCGs et elle ira jusqu'à -250 degrés-jours le plus au nord du domaine selon le MRCC.

Le nombre de degrés-jours accumulés pendant les jours avec la température minimale plus basse que -40°C sera aussi plus petit en 2050 par rapport à la période de référence (figure 6.91). La médiane des MCGs suggère une diminution entre 30 et 50 degrés-jours. L'ensemble de simulations du MRCC projette des valeurs plus élevées que celles des MCGs : la médiane va jusqu'à -120, -130 degrés-jours au-dessus des régions montagneuses au nord du domaine.

6.4.15 Période d'endurcissement

La figure 6.92 montre la normale climatique de l'accumulation nette des degrés-jours de froid au-dessous de 5°C pendant la période d'endurcissement telle que définie dans la section 5.4. Les delta de changements de cette variable sont sur la figure 6.93.

Les 25^e percentiles des changements des deux ensembles de simulations prennent des valeurs négatives. Les MCGs projettent une baisse de l'accumulation nette des degrés-jours de froid jusqu'à

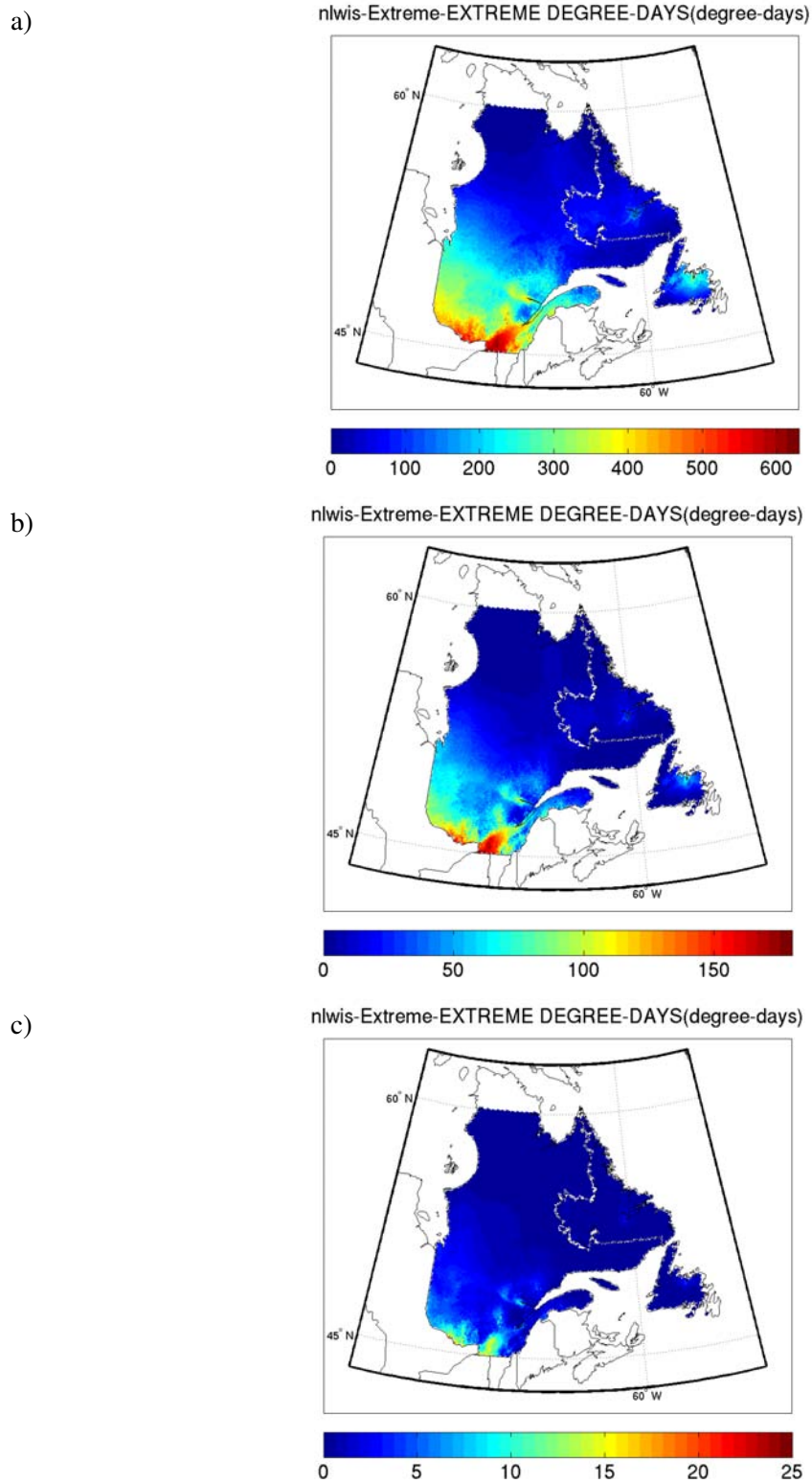


FIGURE 6.84: Normales climatiques du nombre de degrés-jours de chaud accumulés pendant les jours avec la température maximale plus élevée que 20°C (a), 25°C (b) et 30°C (c) (en degrés-jours) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

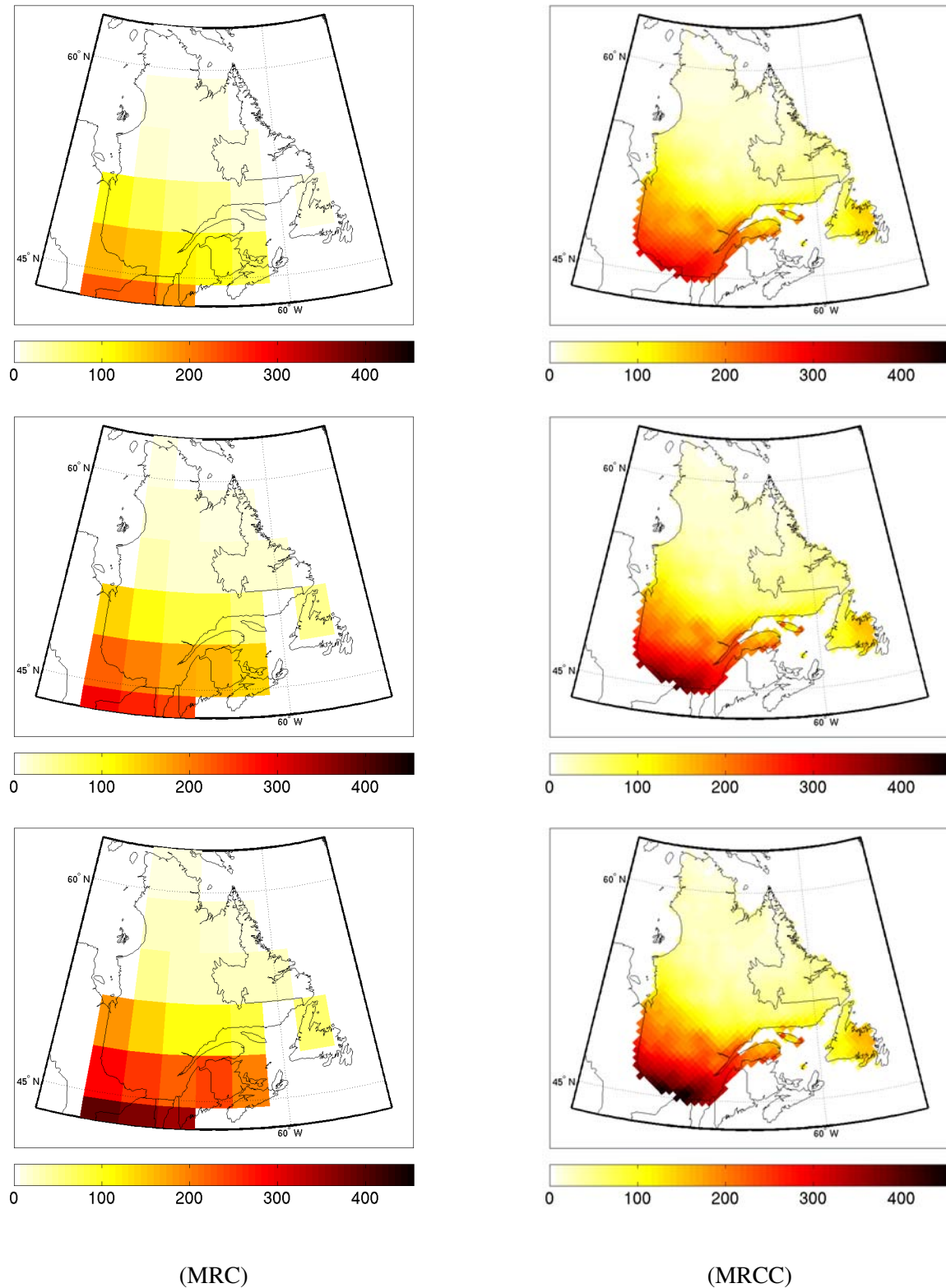


FIGURE 6.85: Deltas du nombre de degrés-jours de chaud accumulés pendant les jours avec la température maximale plus élevée que 20°C (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

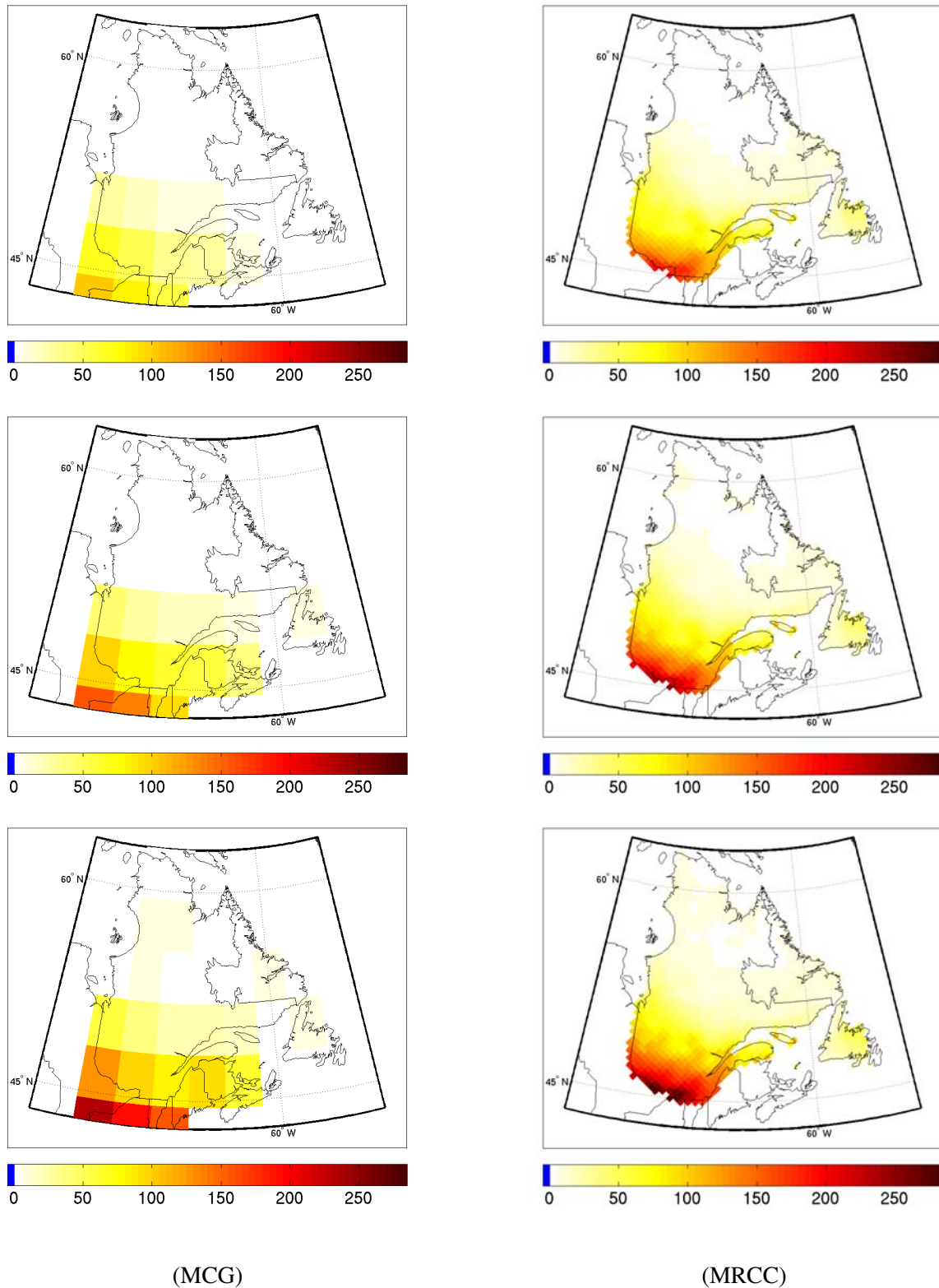


FIGURE 6.86: Deltas du nombre de degrés-jours de chaud accumulés pendant les jours avec la température maximale plus élevée que 25°C (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble des simulations de MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

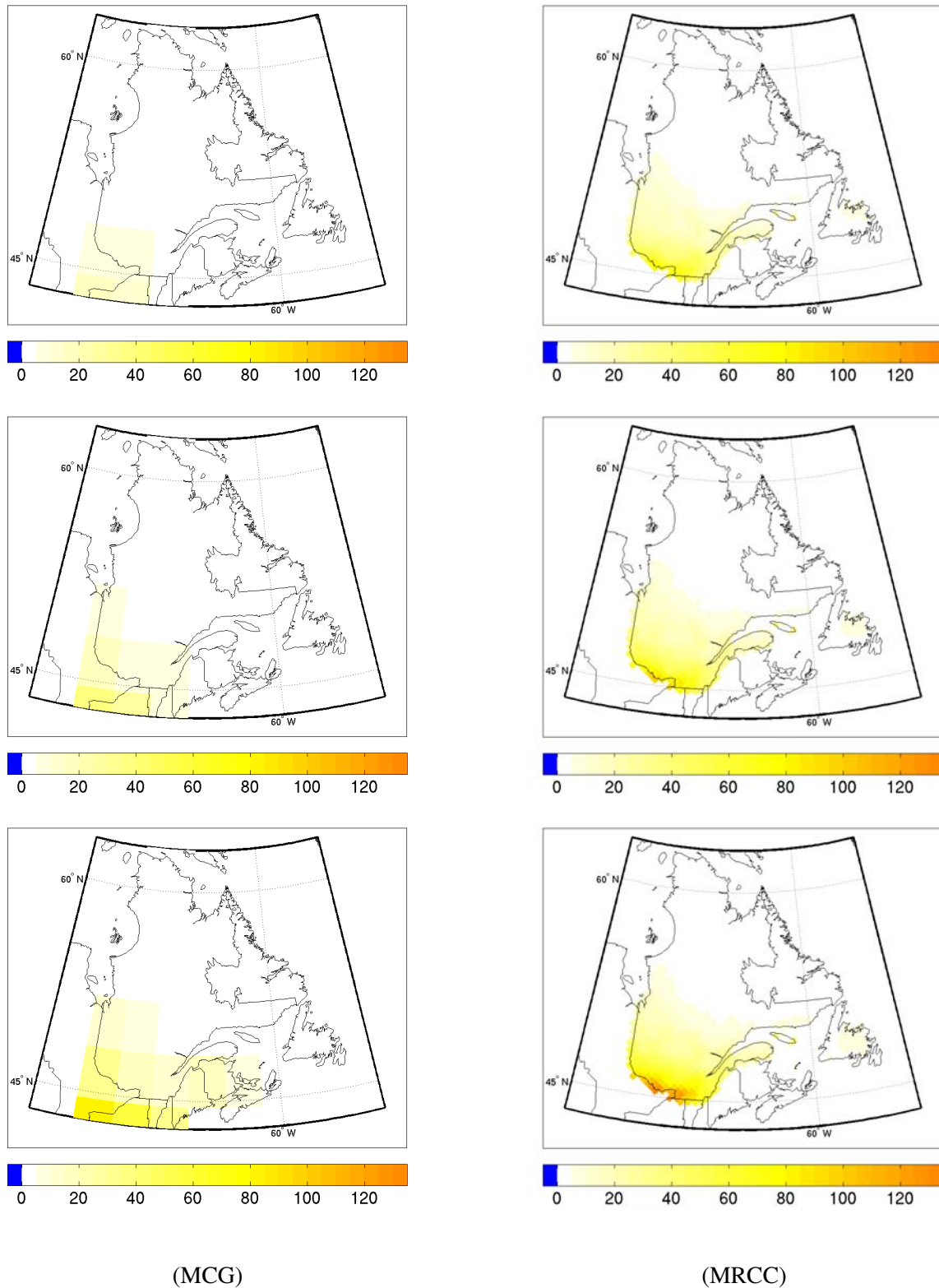


FIGURE 6.87: Deltas du nombre de degrés-jours de chaud accumulés pendant les jours avec la température maximale plus élevée que 30°C (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

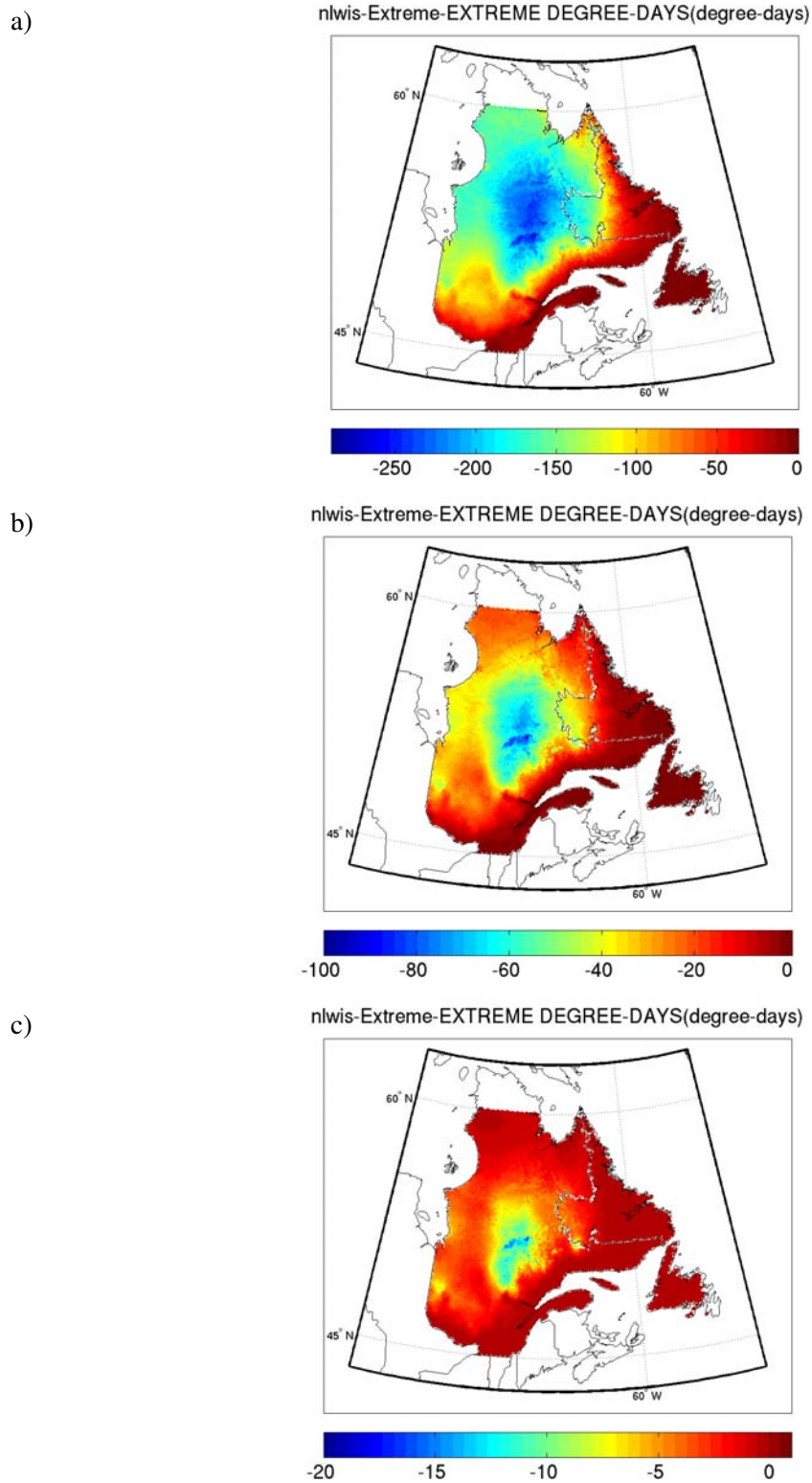


FIGURE 6.88: Normales climatiques du nombre de degrés-jours de froid accumulés pendant les jours avec la température minimale plus basse que -30°C (a), -35°C (b) et -40°C (c) (en degrés-jours) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

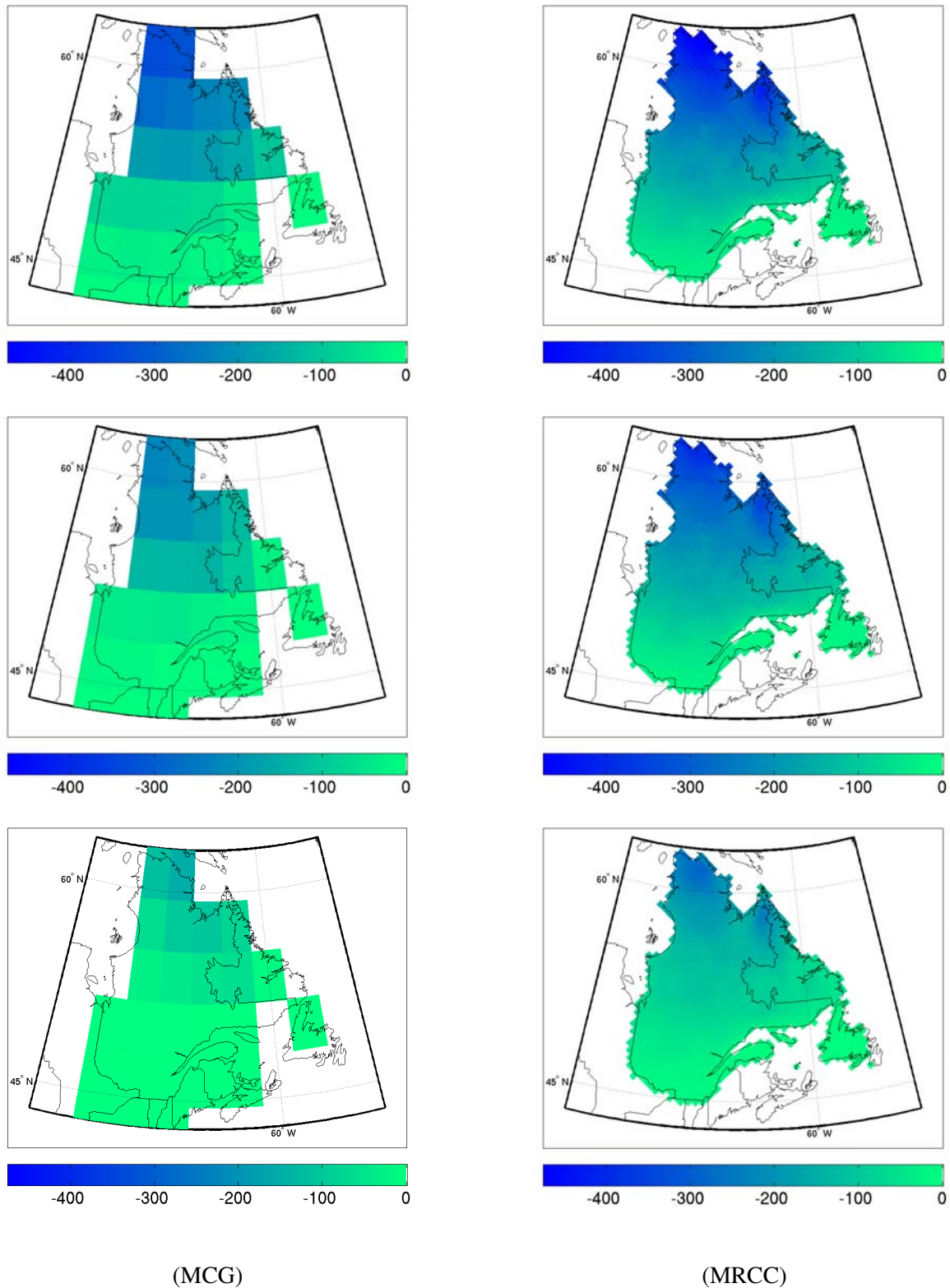


FIGURE 6.89: Deltas du nombre de degrés-jours de froid accumulés pendant les jours avec la température minimale plus basse que -30°C (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

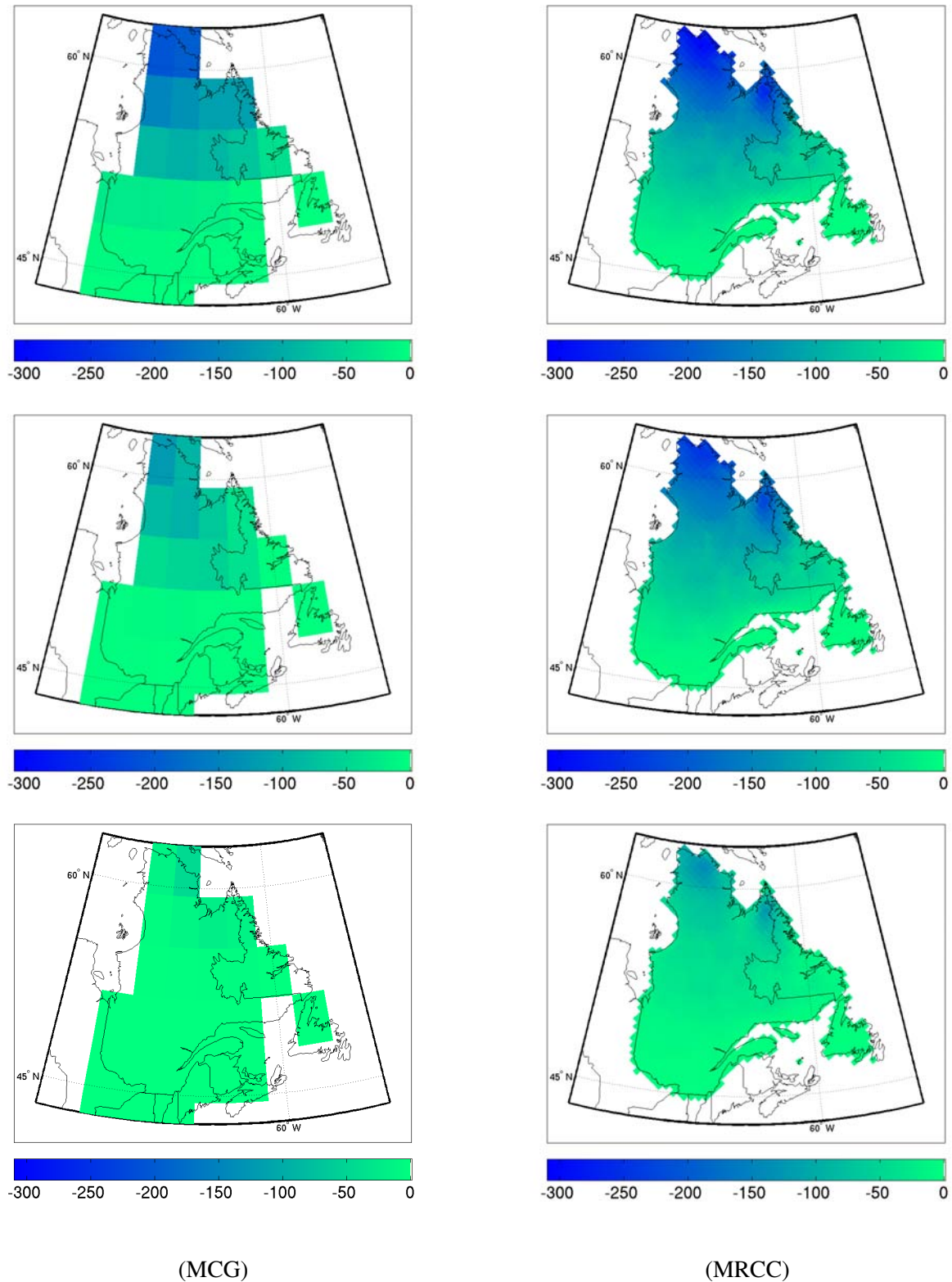


FIGURE 6.90: Deltas du nombre de degrés-jours de froid accumulés pendant les jours avec la température minimale plus basse que -35°C (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

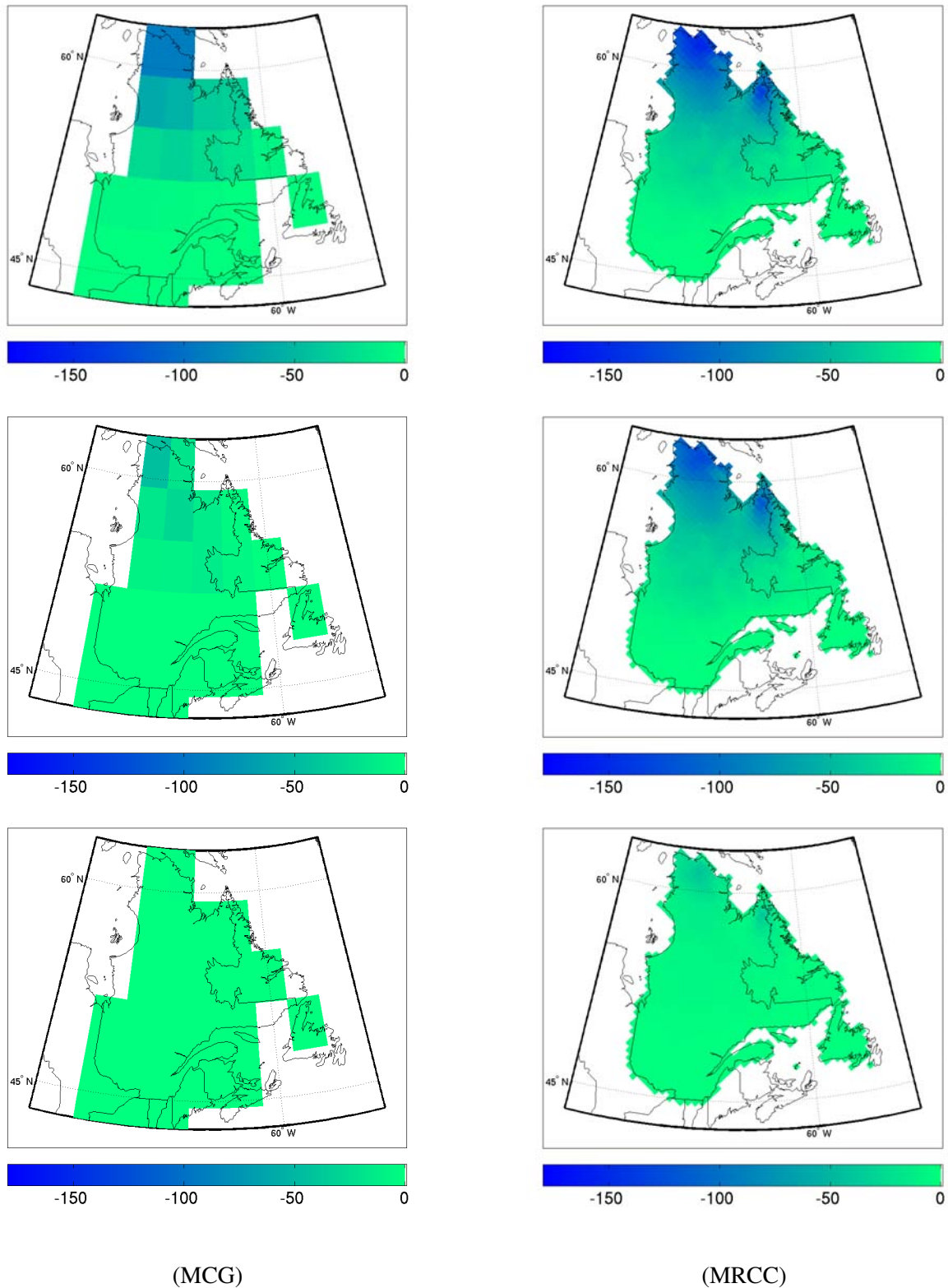


FIGURE 6.91: Deltas du nombre de degrés-jours de froid accumulés pendant les jours avec la température minimale plus basse que -40°C (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

-200 degrés-jours au nord du Québec-Labrador et entre -100 et -70 degrés-jours au sud. Le MRCC suggère des valeurs moins grandes : -60 degrés-jours le plus au nord et aucun changement au sud du domaine. L'accumulation nette des degrés-jours de froid restera inchangée dans le futur selon la médiane des MCGs. Celle du MRCC suggère 10-15 degrés-jours d'augmentation au sud du Québec et -20 degrés-jours de diminution au nord. Les 75^e percentiles des deux ensembles sont positives avec les plus grandes valeurs au nord. Les MCGs envisagent l'augmentation de l'accumulation nette des degrés-jours de froid de plus que 70 degrés-jours alors que le MRCC projette environ 50 degrés-jours.

Car les valeurs des 25^e et 75^e percentiles des deux ensembles ont les signes différents et que les médianes ont des petites valeurs, on peut constater l'existence d'une importante incertitude dans le signal des changements climatiques. Une étude plus approfondie serait nécessaire pour améliorer nos compréhensions des changements de cette variable dans le futur.

6.4.16 Période de désendurcissement

La normale climatique du taux de désendurcissement est montrée sur la figure 6.94 . Le taux de désendurcissement est définie dans la section 5.5 . Les deltas des changements de cette variable projetés pour l'horizon 2050 sont sur la figure 6.95 . Selon l'ensemble des MCGs les valeurs de ces changements sont négatives pour le nord du Québec-Labrador (tous les trois percentiles). Au sud, la médiane de l'ensemble n'envisage aucun changement et la 75^e percentile prend les valeurs positives. Ces résultats montrent une incertitude importante au sud du Québec où les projections sont dépendantes de la simulation. Le signal du changement du MRCC est plus robuste car il suggère une diminution du taux de désendurcissement dans le futur sur le territoire entier. La médiane de cette diminution est entre -20 et -30 degrés-jours/jour.

6.4.17 Saisonnalité de la température et de la précipitation

Les normales climatiques de la saisonnalité de la température et de la précipitation telle que définie dans la section 5.6 sont montrées sur la figure 6.96 . Les changements projetés pour l'horizon 2050 de la saisonnalité de ces deux variables sont sur les figures 6.97 et 6.98 , respectivement.

La saisonnalité de la température ne subira aucun changement selon l'ensemble des simulations des MCGs (figure 6.97). La médiane de l'ensemble du MRCC projette un changement d'environ 1.5% seulement au nord du Québec ; sur la côte du Baie d'Hudson et sur la Péninsule d'Ungava. Pour le reste du domaine il n'y aura pas de changement.

La saisonnalité de la précipitation changera plus que la saisonnalité de la température (figure 6.98). Selon le MRCC elle diminuera sur le domaine au complet. La médiane de cette diminution est autour de -5%. Les MCGs projettent plutôt une augmentation pour certaines régions. La médiane des MCGs suggère petite augmentation au sud du domaine (1%) et une diminution légère au nord (-2, -3%).

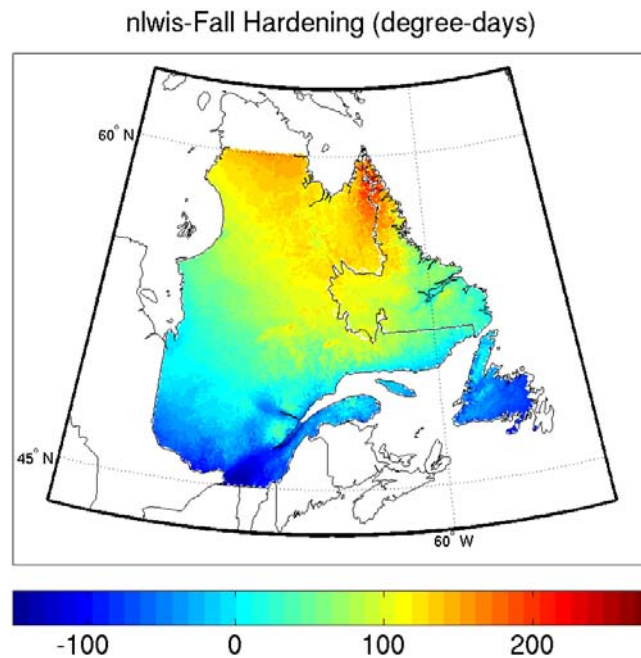


FIGURE 6.92: Normale climatique de l'accumulation nette des degrés-jours de froid au-dessous de 5°C pendant la période d'endurcissement (en degrés-jours) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

6.4.18 Évapotranspiration potentielle

L'évaporation potentielle (ETP) a été calculée selon la formule de Thornthwaite définie dans la section 5.7. Cette méthode de calcul de l'ETP a été choisie à cause de sa simplicité car elle demande la connaissance seulement de la température moyenne de l'air. L'autre méthode, analysée aussi dans la section 5.7, celle de Priestley-Taylor demande la connaissance de la radiation nette à la surface qui dépend fortement de la couverture nuageuse. Comme les nuages ne sont pas bien résolus dans les modèles globaux du climat, l'utilisation de la méthode de Priestley-Taylor impliquerait une source d'incertitude supplémentaire à notre analyse. Pour cette raison, nous avons décidé d'utiliser la méthode de Thornthwaite pour calculer l'ETP et ses changements dans le futur.

La normale de l'évapotranspiration potentielle annuelle pour la période de référence est montrée sur la figure 6.99. Les changements d'ETP sont montrés sur la figure 6.100. Les MCGs, tous les trois percentiles, projettent une augmentation de l'ETP en 2050 sur le domaine au complet. Ces changements sont plus grands au sud du Québec et ils diminuent graduellement vers le nord. La médiane projetée 6 cm d'augmentation au sud et entre 3 et 4 cm au nord. La médiane de l'ensemble de simulations du MRCC projette une baisse de l'ETP au-dessus des Montagnes Torngats et des monts au nord d'Ungava et sur la côte nord de la Baie d'Hudson d'environ 1 cm. Pour le reste du domaine elle envisage une hausse qui est plus importante le plus au sud (6 cm) et qui diminue graduellement

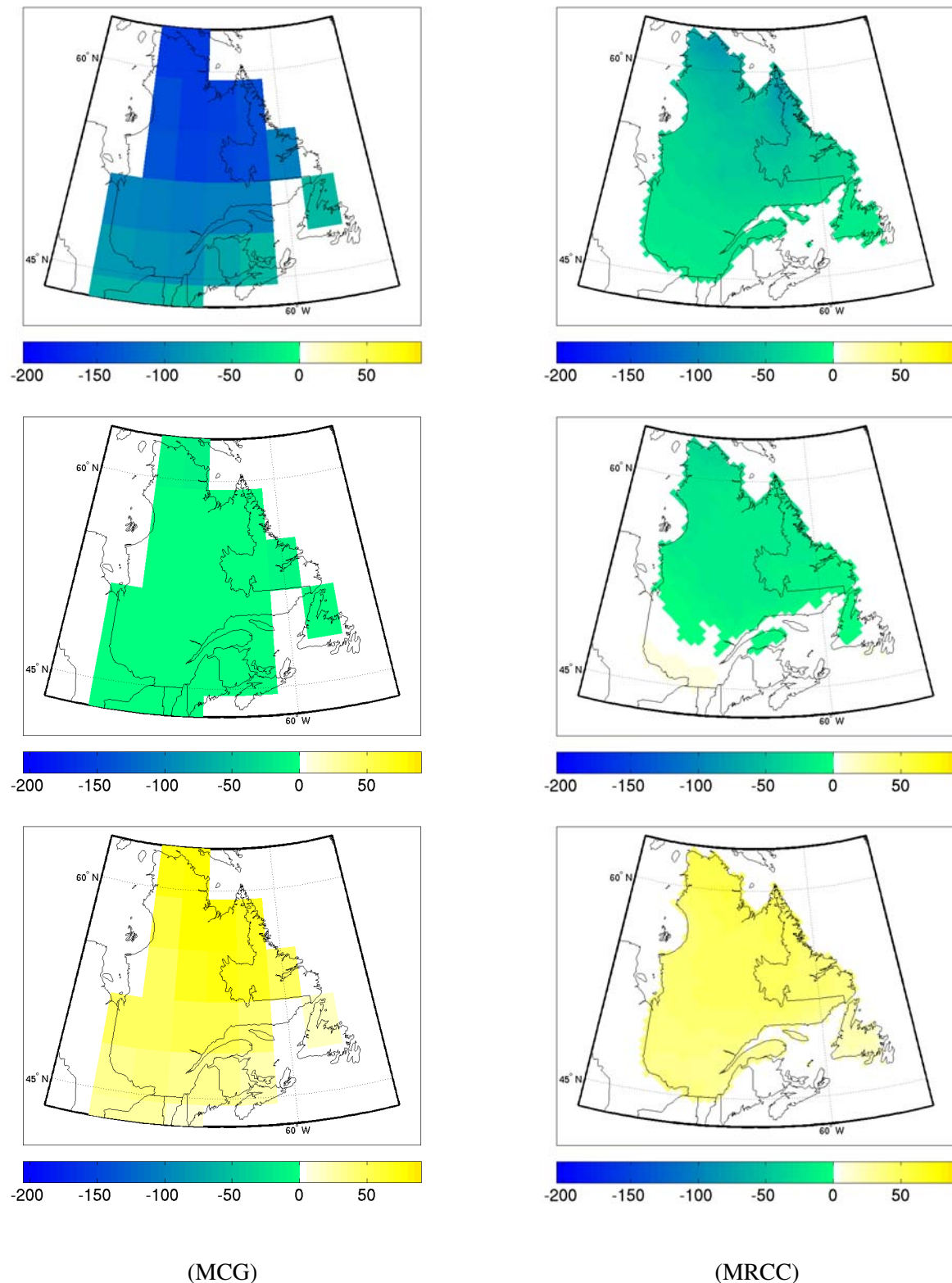


FIGURE 6.93: Deltas de l'accumulation nette des degrés-jours de froid au-dessous de 5°C pendant la période d'endurcissement (en degrés-jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

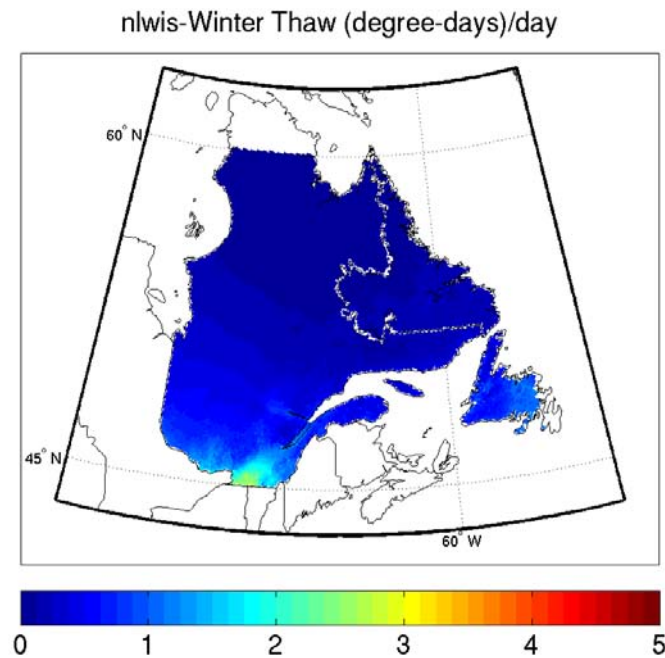


FIGURE 6.94: Normale climatique du taux de désendurcissement (en degrés-jours/jour) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

vers le nord. Le 25^e percentile du MRCC projette une plus grande diminution pour le nord et une augmentation de l'ETP d'environ 5 cm au sud. Le 75^e percentile envisage une augmentation sur le domaine au complet. Sur une partie du territoire nordique, le 25^e percentile projette des baisses alors que le 75^e projette des hausses. Alors, devant ces résultats, nous constatons que le signal de changement de l'ETP au nord est très incertain et qu'il dépend de la simulation. Des analyses plus approfondies permettraient de mieux évaluer les incertitudes sur cette variable.

6.4.19 Budget hydrique

La normale climatique du budget hydrique tel que défini dans la section 5.8 est montrée sur la figure 6.101 et son changement pour l'horizon 2050 sur la figure 6.102. Les 25^e percentiles de l'ensemble des MCGs et de celui du MRCC projettent une diminution de cette variable au sud du Québec. Au nord du domaine, les MCGs suggèrent une augmentation du budget hydrique de quelques centimètres. Selon le MRCC cette augmentation sera plus grande, entre 10 et 15 cm. La médiane des MCGs projette une augmentation du budget hydrique sur le domaine au complet. Celle du MRCC suggère peu de changement au sud du Québec ; plutôt une diminution de 1-2 cm au sud-ouest du domaine. La région avec la plus grande augmentation est située sur Labrador avec la valeur d'environ 20 cm (MRCC) et moins que 10 cm (MCGs). Les 75^e percentiles des deux ensembles montrent une augmentation sur le domaine au complet. La conclusion sur la robustesse du signal

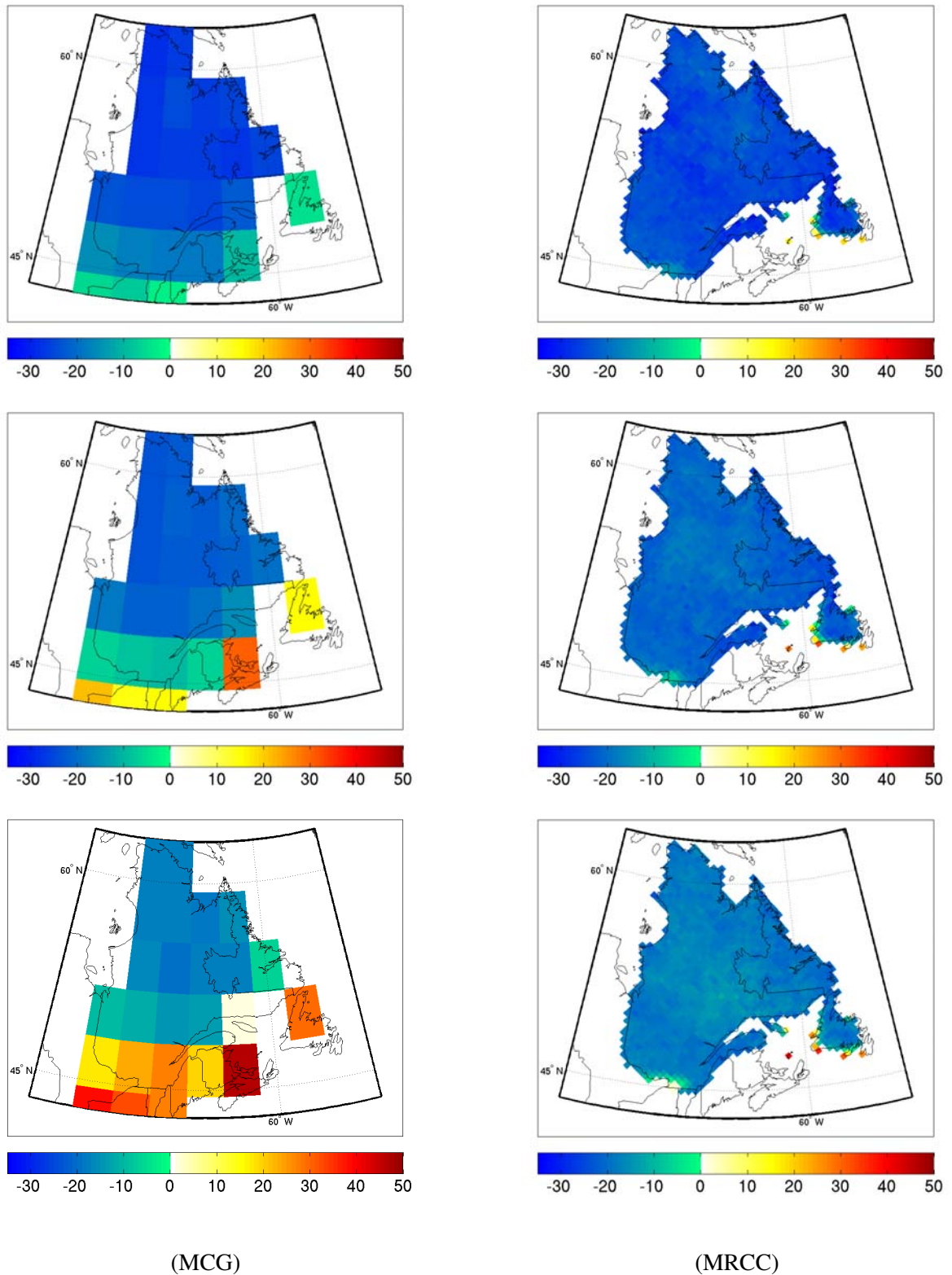


FIGURE 6.95: Deltas du taux de désendurcissement (en degrés-jours/jour) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

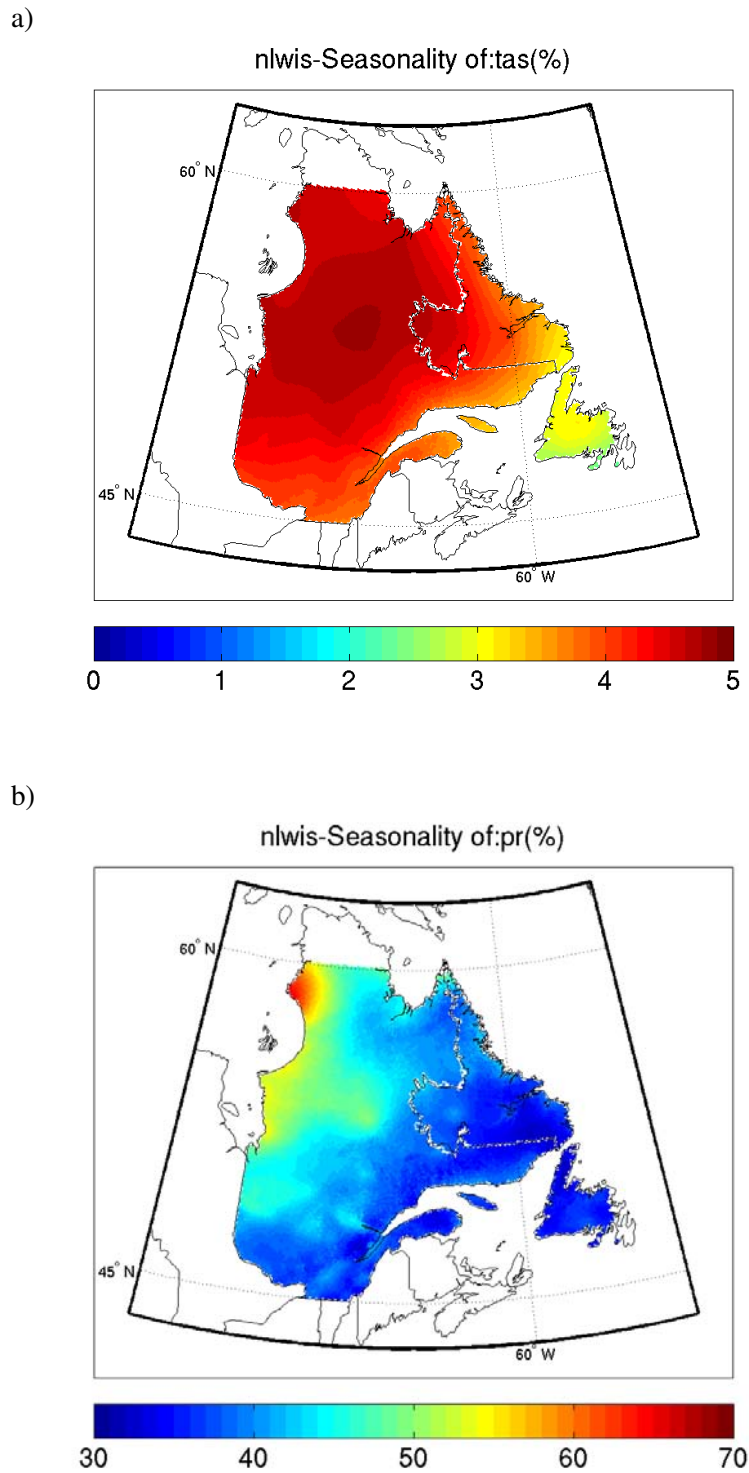


FIGURE 6.96: Normales climatiques de la saisonnalité de la température (a) et de la précipitation (b) (en %) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

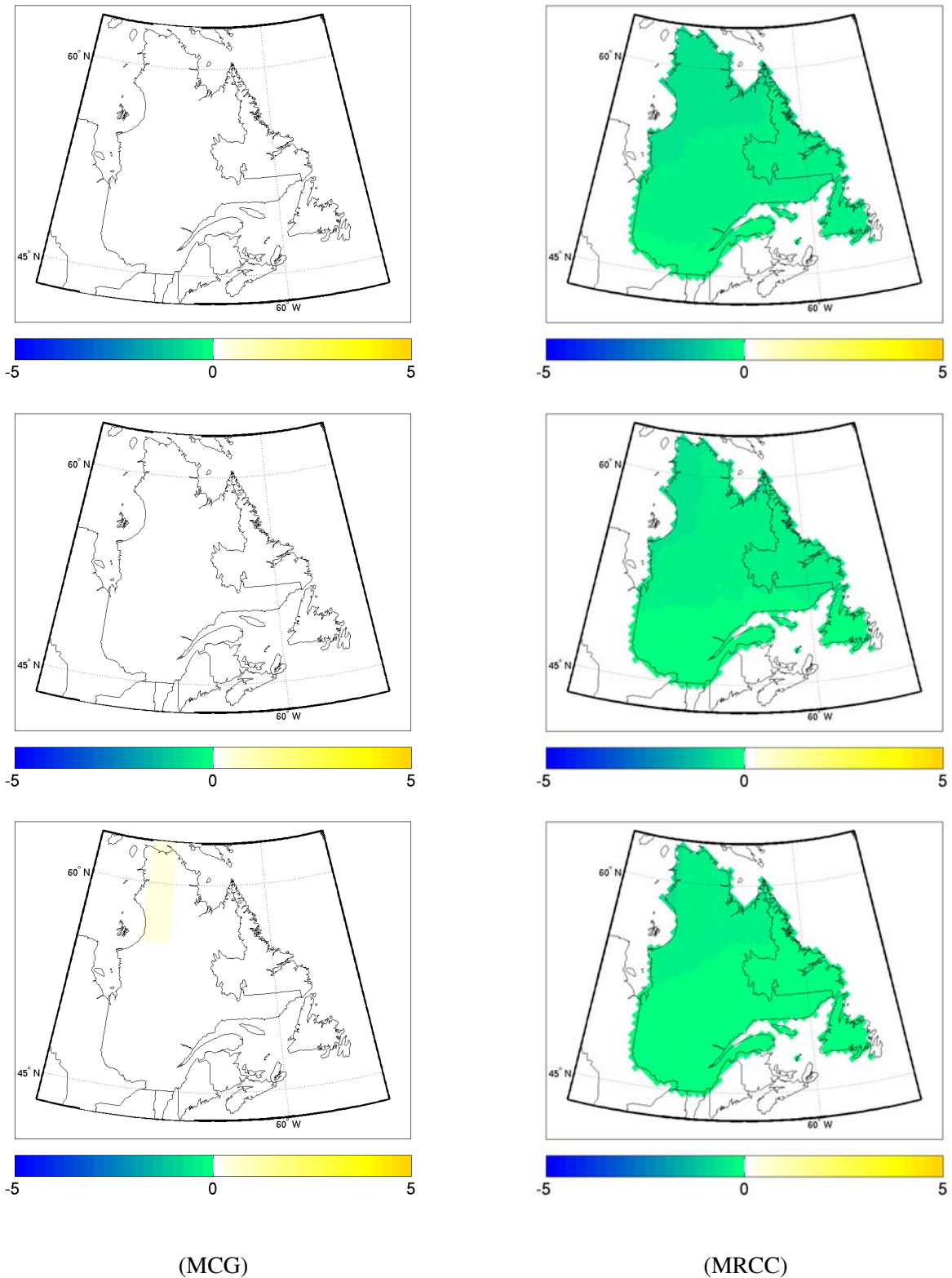


FIGURE 6.97: Deltas de la saisonnalité de la température (en %) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

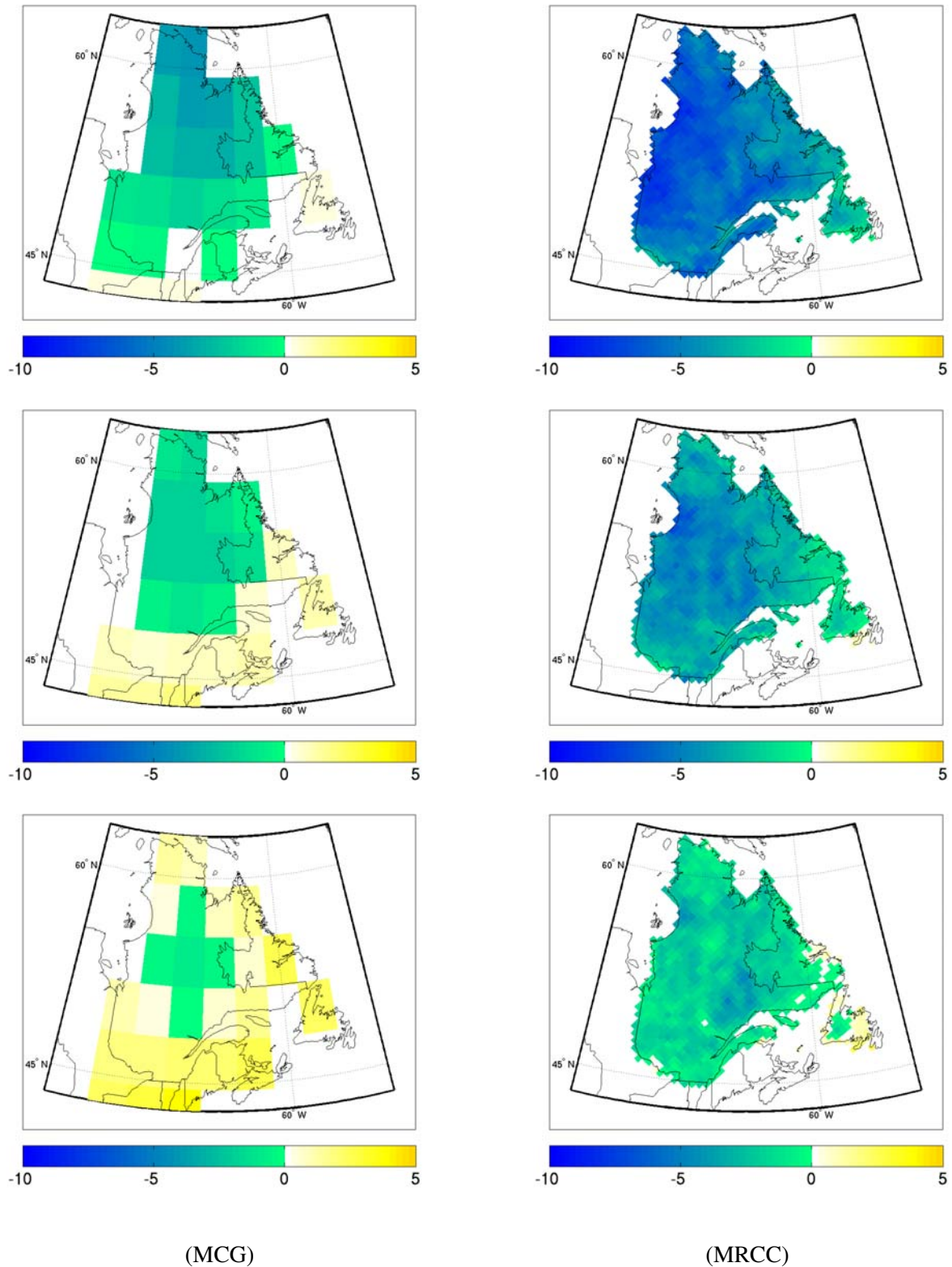


FIGURE 6.98: Deltas de la saisonnalité de la précipitation (en %) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

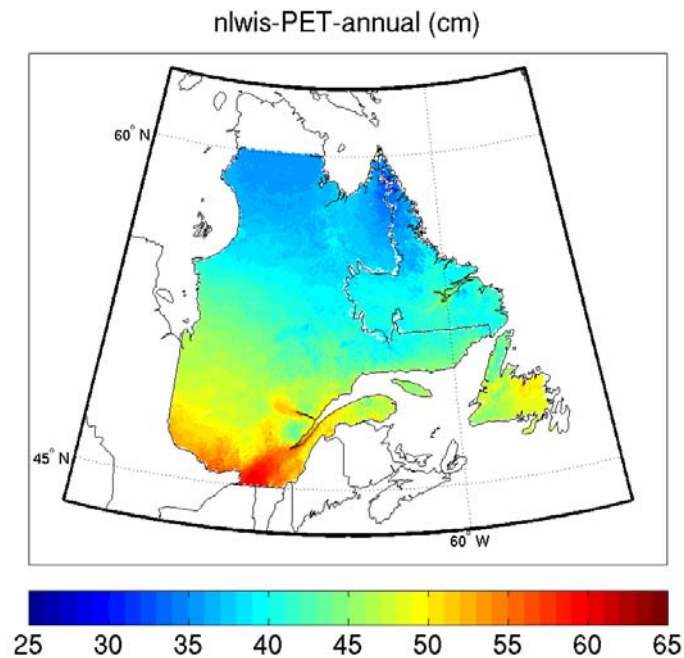


FIGURE 6.99: Normale climatique de l'évapotranspiration potentielle annuelle (en cm) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

des changements climatiques est semblable à celle tirée pour l'ETP analysés dans la sous-section précédente ; le signal des changements n'est pas robuste.

6.4.20 Jours consécutifs sans précipitation

On a défini un indice de la sécheresse qui tient compte de la longueur de la période sans précipitation. La période sans précipitation est définie comme au moins sept jours consécutifs ayant une quantité de la précipitation égale ou inférieure à 1 mm. Cet indice n'a pas été analysé dans le chapitre 5, car la demande des usagers est arrivée vers la fin du projet.

On a calculé la fréquence et la durée de ces périodes sèches sur la période de référence 1961-1990 à partir des données NLWIS/SNITE (figure 6.103) et les changements des ces variables pour l'horizon 2050 (figures 6.104 et 6.105).

La fréquence moyenne de ces événements secs dans le climat actuel est la plus grande au nord du Québec, sur la Baie d'Hudson, la Baie d'Ungava et la Péninsule d'Ungava. La fréquence au-dessus de ces régions varie entre environ 10 et 13 événements par année. La durée maximale des périodes sèches est plus grande sur la Baie d'Hudson et elle atteint les valeurs entre 25 et 35 jours.

La fréquence des périodes sèches diminuera en général dans le futur entre 3 et 0 événements par année (figure 6.104). Le plus grand changement est attendu sur les régions de la Baie-James et de la Baie d'Hudson. La valeur médiane donne une diminution de -1 à -1.5 événements/année selon

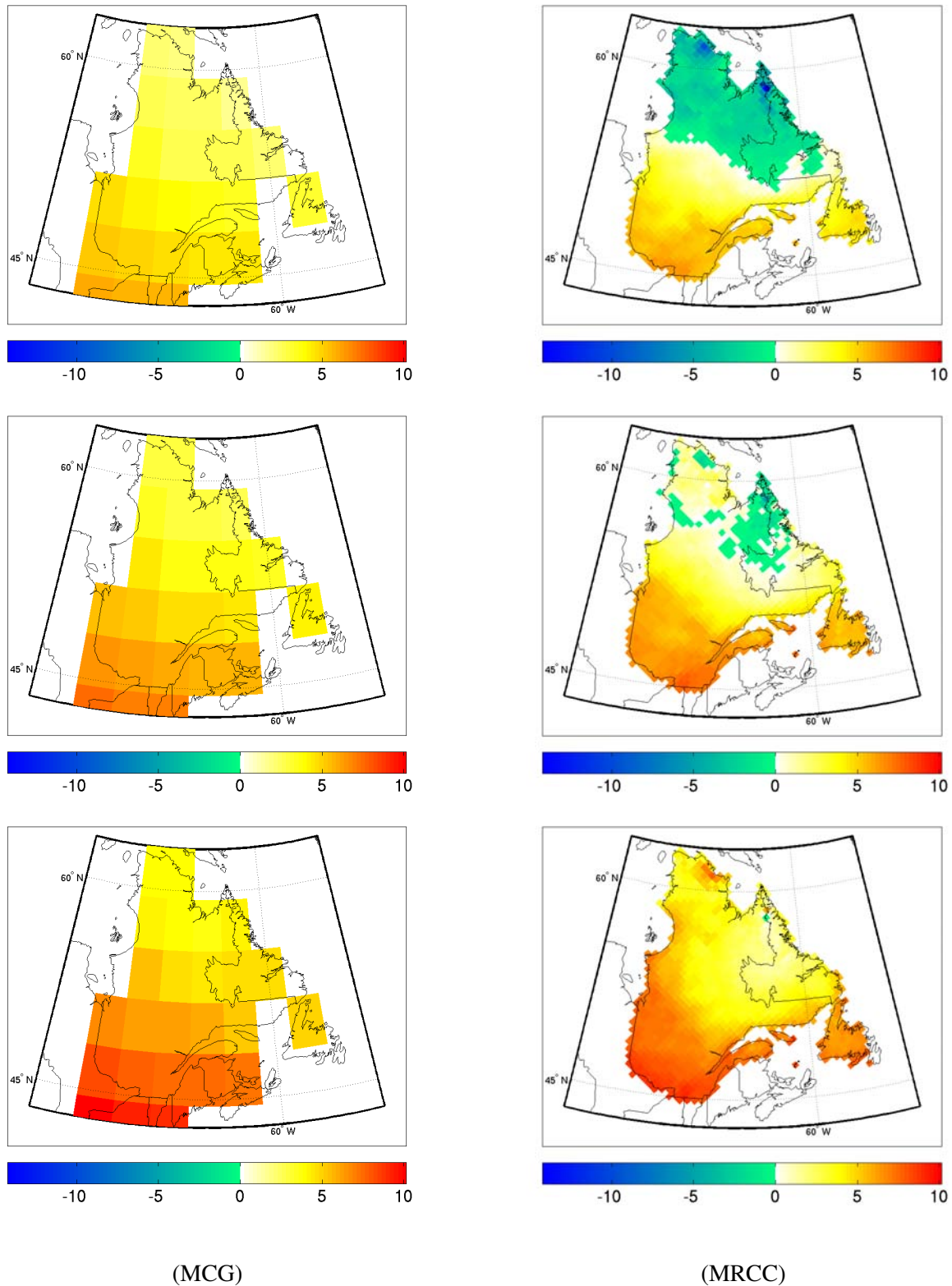


FIGURE 6.100: Deltas de l'évapotranspiration potentielle annuelle (en cm) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

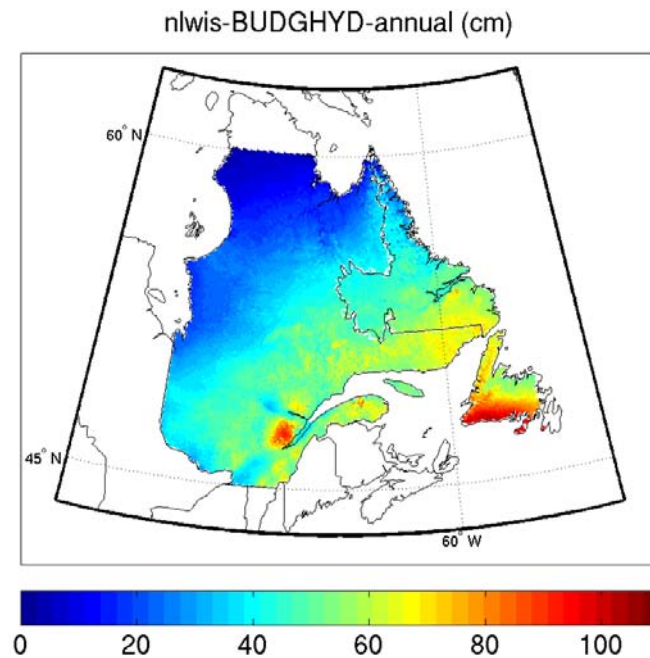


FIGURE 6.101: Normale climatique du budget hydrique annuel (en cm) pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

les MCGs et proche de 2 événements/année selon l'ensemble des simulations du MRCC. Au sud du Québec les changements de la fréquence des jours secs sont proches de zéro.

La médiane de la durée des événements secs suggère une diminution jusqu'à 3 jours au nord d'Ungava selon les MCGs et jusqu'à 4-5 jours selon le MRCC (6.105). Les changements au sud du Québec sont proches de zéro. Le 75^e percentile des MCGs a des petites valeurs positives sur le domaine au complet alors que le 25^e percentile suggère des changements positifs. Donc, le signal des changements de la durée des événements secs contient une incertitude importante. Tous les trois percentiles du MRCC ont le même signe signifiant que ce signal est plus robuste que celui des MCGs projetant la diminution de la durée des jours secs.

6.4.21 Longueur de la période nivale

Le début de la longueur de la période nival est définie comme le premier de quatorze jours consécutifs ayant une épaisseur de neige égale à ou plus grande que 10 cm. L'épaisseur de neige n'est pas disponible dans la base de données de référence NLWIS/SNITE ni dans celle des MCGs à l'échelle quotidienne. Donc, les changements de la longueur de la période nivale ont été calculés à partir seulement des simulations du MRCC. Ces changements sont montrés sur la figure 6.106 . Le 25^e percentile de l'ensemble des simulations du MRCC projette une diminution de la longueur de la période nivale sur le domaine au complet. Cette diminution est la plus importante au sud du

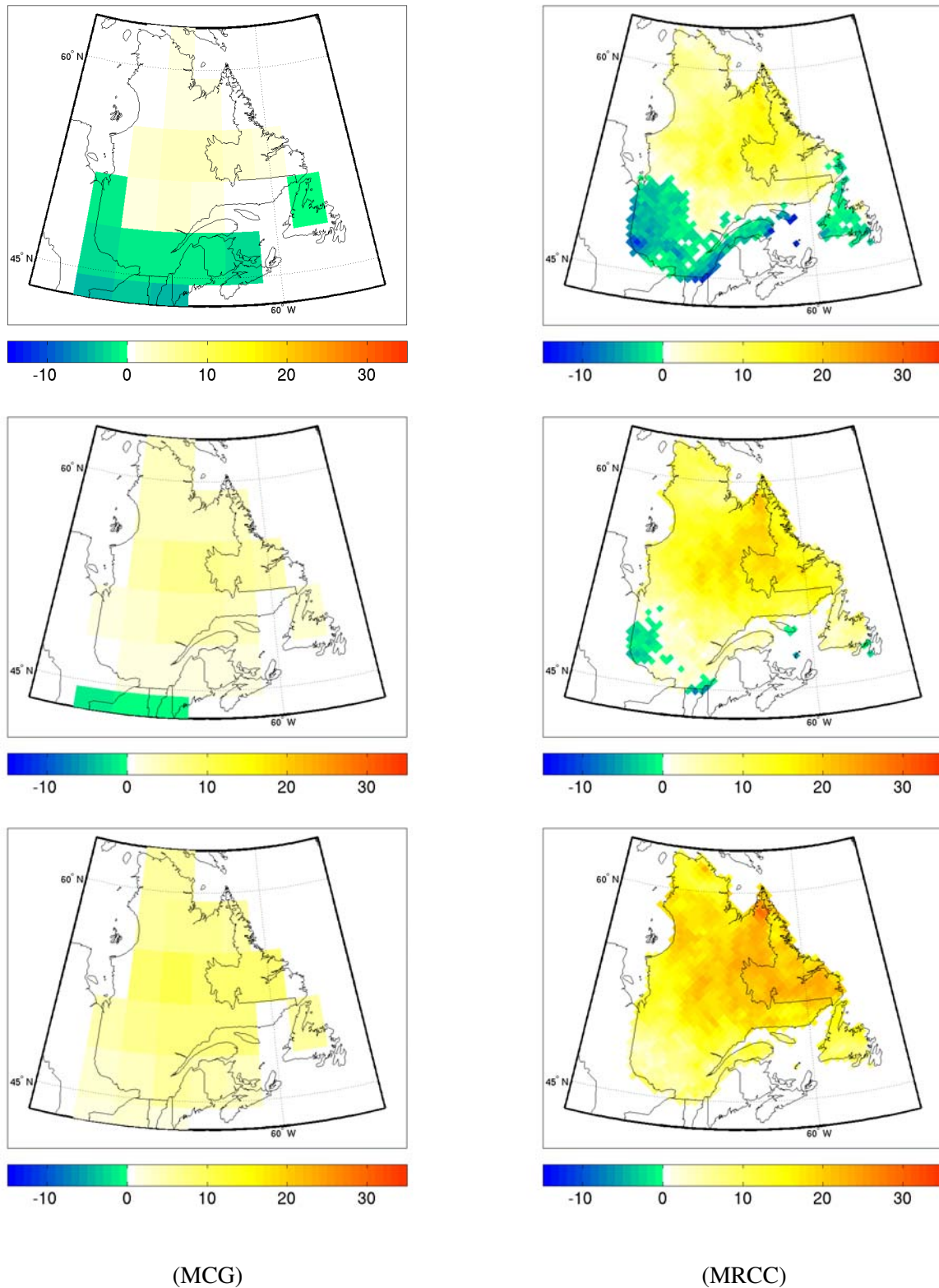
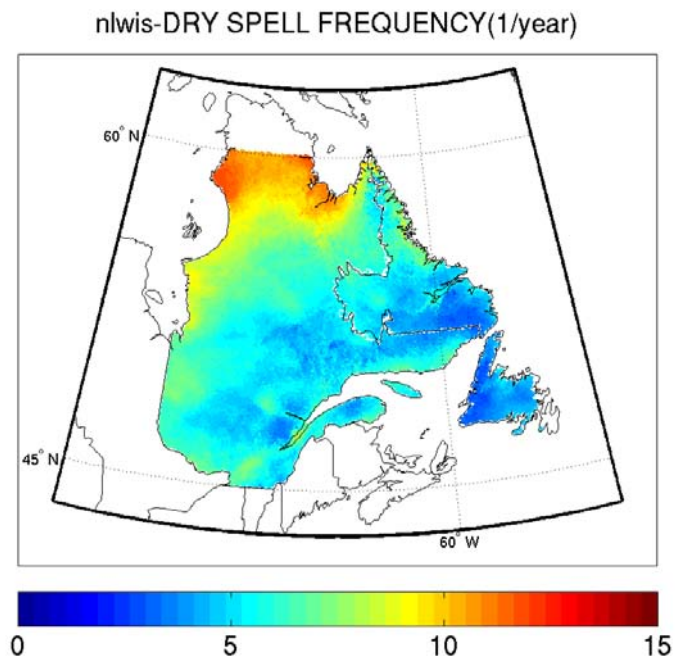


FIGURE 6.102: Deltas du budget hydrique annuel (en cm) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

a)



b)

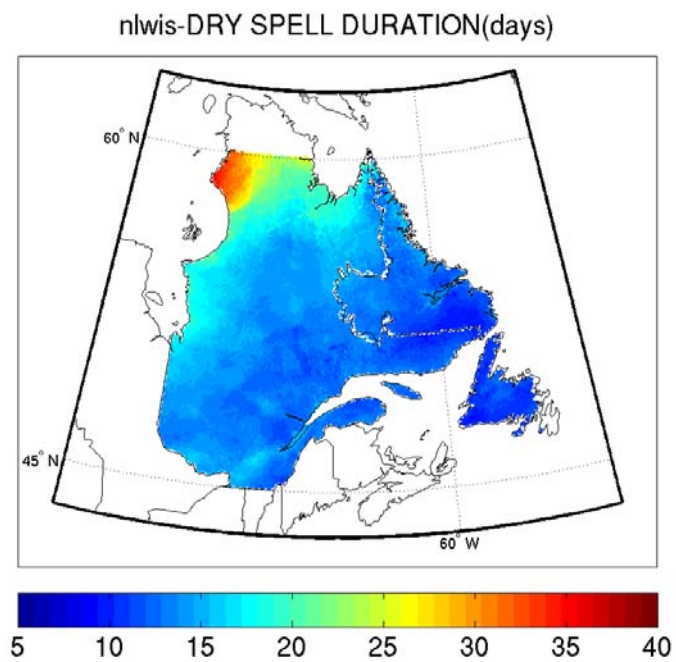


FIGURE 6.103: Normales climatiques de la fréquence (en 1/année) (a) et de la durée (en jours) (b) des périodes sans précipitation pendant sept jours consécutifs pour la période de référence (1961-1990) à partir des données NLWIS/SNITE.

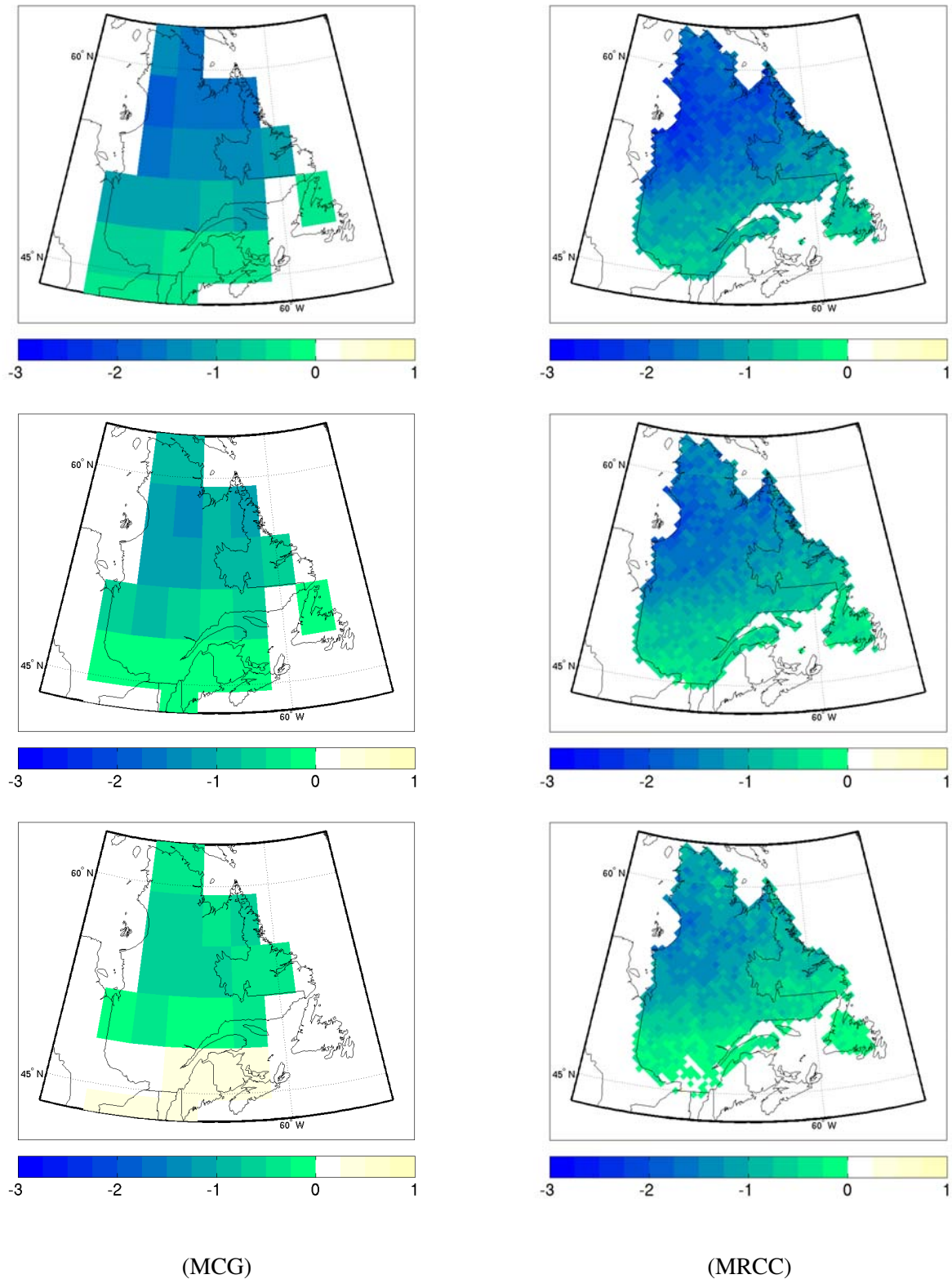


FIGURE 6.104: Deltas de la fréquence des périodes sans précipitation pendant sept jours consécutifs (en 1/année) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

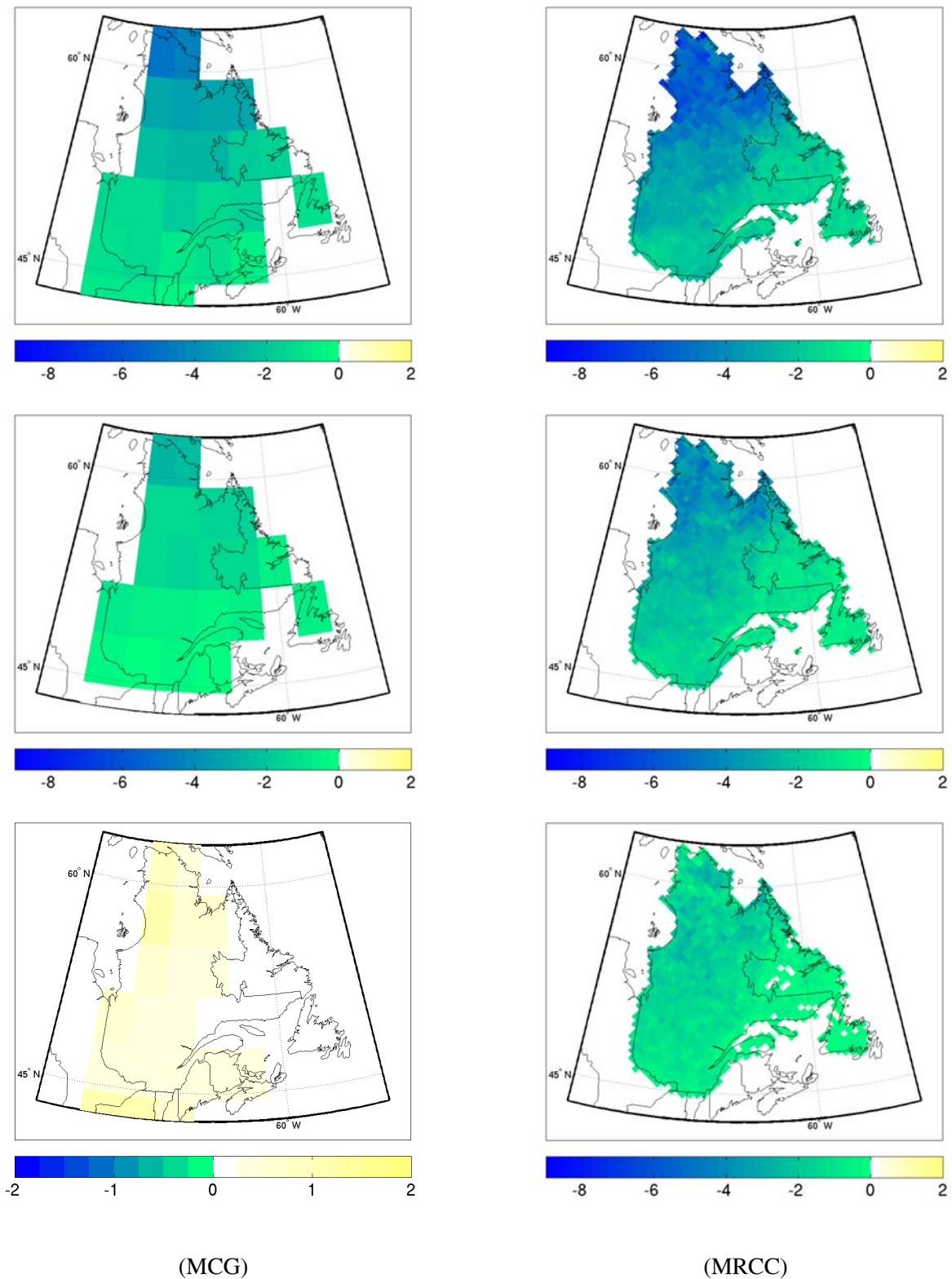
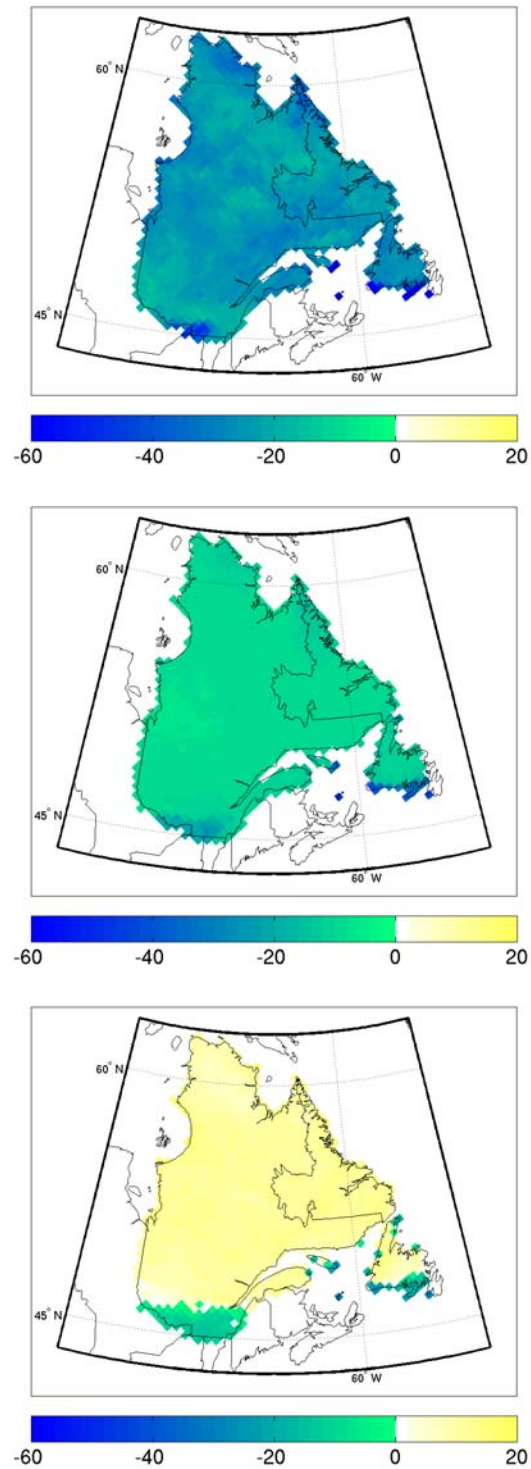


FIGURE 6.105: Deltas de la durée des périodes sans précipitation pendant sept jours consécutifs (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations des MCGs et du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

Québec, d'environ 50 jours. Sur le reste du domaine elle varie entre environ 20 et 40 jours. La médiane de l'ensemble envisage une diminution de la longueur de la période nivale d'environ deux semaines sur le domaine au complet sauf le plus au sud du Québec où cette diminution est proche d'un mois. Le 75^e percentile suggère plutôt une prolongation de la période nivale allant jusqu'à une vingtaine de jours sur la côte de la Baie d'Hudson. Ce résultat peut être expliqué par une hausse de la quantité de la précipitation sur la même région égale à 60% pendant l'hiver (6.7). Au sud du domaine, le 75^e percentile projette une diminution entre 15 et 17-18 jours. Devant ces résultats on constate encore une fois que le signal dépend de la simulation analysée du MRCC.



(MRCC)

FIGURE 6.106: Deltas de la longueur de période nivale (en jours) pour l'horizon 2050 obtenu à partir de l'ensemble de simulations du MRCC ; 25^e percentile (1^e ligne), médiane (2^e ligne), 75^e percentile (3^e ligne).

Discussion et conclusion

Le projet d'Atlas de la biodiversité du Québec nordique, sous la responsabilité de la Direction du patrimoine écologique et des parcs du MDDEP, comportait plusieurs volets thématiques, dont un sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité et les écosystèmes nordiques piloté par Ouranos. Avant d'étudier les scénarios du climat futur, il était essentiel de connaître le climat prévalant durant le passé. Nos analyses ont été effectuées sur le territoire du Québec-Labrador au complet mais une attention particulière a été portée aux trois régions d'intérêt pour le projet : la Basse Côte Nord, la Baie James et la Péninsule d'Ungava.

Afin d'approfondir nos connaissances sur le climat du Québec prévalant au cours des derniers siècles, une revue de littérature a été faite sur ce sujet. Les résultats de cette revue montrent qu'il n'y a pas eu beaucoup d'études paléoclimatiques effectuées sur le nord du Québec et que notre savoir du climat nordique est donc relativement pauvre. Toutefois, bon nombre d'études sur ce sujet existe pour d'autres pays et leurs résultats ont été examinés. Pour le sud du Québec et notamment pour la ville de Québec, il existe des documents écrits qui fournissent des connaissances sur le climat passé. Cependant, la majorité de ces sources d'informations sont concentrées sur une période de temps relativement courte. À ce sujet, mentionnons le projet ARCHIVES (Analyse Rétrospective des Conditions Hydro-climatiques à l'aide des Indicateurs de leur Variabilité à l'Échelle Séculaire) présentement en cours, qui vise l'acquisition de connaissances du climat paléoclimatique dans le nord du Québec. Ce projet, sous la gouverne de l'INRS-ETE, et financé par une subvention de recherche et développement coopérative (RDC) du CRSNG (Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada), se fait en collaboration avec Hydro-Québec, Ouranos, ArcticNet et plusieurs universités.

La deuxième étape de l'étude concernait l'analyse du climat passé récent. Une grande partie du temps dédié au projet a été consacrée à l'analyse des données disponibles pour le nord du Québec. Cette région étant un territoire vaste et peu peuplé, elle est faiblement couverte par des stations d'observations climatiques. La majorité des stations existantes sont situées dans les villages côtiers et il n'y a que quelques stations, très éloignées l'une de l'autre, à l'intérieur de la région. Ce manque d'observations représente un grand défi pour l'analyse du climat du nord du Québec. Dans un premier temps, nous avons recherché les données d'observations dans les bases de données des différents partenaires d'Ouranos, et avons recueilli les données des stations du réseau de Rio Tinto

Alcan (RTA) et du Centre d'études nordiques (CEN) entre autres. Malgré le fait qu'elles soient toutes situées relativement près les unes des autres au sud d'environ 50 *circN*, la disponibilité des stations de RTA a beaucoup aidé dans nos analyses parce qu'elles représentaient un ensemble de données indépendantes des autres données que nous avons utilisées. .

Dans un deuxième temps, pour pallier le manque de stations dans le nord, nous avons analysé des données sur grilles, incluant les données d'observations interpolées sur grille (NRCAN, ANUSPLIN à 2 km, CRU2), et différents modèles régionaux de climat à base physique. Une analyse détaillée de toutes ces données a été réalisée afin d'estimer les avantages et les inconvénients de chacune. Étant donné que les observations interpolées sur grilles régulières proviennent des mesures faites aux stations, ces bases de données se comportent très bien au-dessus des régions bien couvertes par des stations, mais au nord, où les stations sont peu nombreuses, le degré de confiance dans ces données sur grilles diminue. Les données quotidiennes sur grille ANUSPLIN étaient d'intérêt due à leur fine résolution de 2 km mais leur grille s'arrête au sud du 60deg. Nord (en lien avec le manque de stations d'observations) et elles présentent tout de même des biais relativement importants par endroits. Les modèles climatiques représentent quant à eux des outils très sophistiqués qui simulent les processus atmosphériques réels. On pourrait donc s'attendre à ce qu'ils donnent des résultats plus réalistes comparés aux données obtenues par une interpolation assez simple telle que les données sur grille régulière. Toutefois, les modèles ne sont pas parfaits non plus car ils ont des biais et leur validation sur des régions peu couvertes par des stations n'est pas possible. Néanmoins, comparés aux quelques stations disponibles dans le nord québécois, les modèles montrent une corrélation avec la station et ils suivent bien la variabilité interannuelle ainsi que les tendances observées.

Les indicateurs ont été fournis à partir de la simulation qc15 du MRCC. Ces données ont servi à des analyses préliminaires par les usagers et ont montré que la résolution de 15 km, telle que celle du modèle climatique utilisé ici, représenterait une échelle appropriée pour répondre aux besoins d'analyse des districts écologiques, lesquels ont été reconnus comme maille d'analyse dans le cadre du projet d'Atlas de la biodiversité du Québec nordique (cette maille de 500 km² correspond au 4 niveau de perception du cadre écologique de référence). Les données produites par les modèles de climat ont des biais dont on doit tenir compte (et qui ne seront pas identiques partout au Québec et au cours de la période 1961-2000) mais malgré ces biais, il est possible de tirer profit de la simulation, particulièrement pour analyser les patrons géographiques et les tendances en climat passé récent. À titre d'exemple, mentionnons que l'analyse des données de la simulation qc15 a produit un patron géographique qui représente assez bien les domaines bioclimatiques du Québec (Samson (2012) ; Figure 16). En résumé, notre analyse de la simulation qc15 du MRCC a permis de constater les biais suivants du MRCC : températures généralement trop froides, surtout pendant l'hiver et l'automne ; précipitation généralement bien simulée : maximums et minimums annuels simulés aux bons moments de l'année, mais précipitation trop importante à proximité de la plupart des stations d'observations pour la période mai-juin-juillet. À cause de ces biais, nous recommandons d'utiliser les données de la simulation qc15 lorsqu'on s'intéresse aux gradients spatiaux et non lorsque l'analyse réfère à des seuils absolus.

La principale constatation de l'analyse du climat récent est le manque criant de données au Nord

du Québec. Il est donc essentiel de maintenir les stations existantes afin de permettre d'obtenir de longues séries de données avec lesquelles il sera possible d'effectuer des analyses de tendances plus robustes. Il serait également souhaitable d'ajouter des stations d'observations afin de mieux couvrir le territoire, principalement dans les régions où elles se font le plus rares. Une analyse géographique approfondie pourrait permettre de cibler les régions par priorité selon les intérêts.

Ce projet nous a fait réaliser le potentiel qu'a le modèle régional pour nous aider à générer des données là où les observations manquent. Bien qu'il y ait des difficultés évidentes associées à un tel objectif, on envisage d'utiliser les observations disponibles pour contraindre le modèle le plus possible à « suivre » la réalité. Ceci représente un projet de développement d'envergure qui est envisagé en Science du climat à Ouranos. Un net avantage des modèles de climat est leur capacité à générer de l'information pour de nombreuses variables météorologiques alors que les observations sont généralement limitées à la température et la précipitation (même la neige est problématique) ; les modèles fournissent ces informations sur chacune de leurs tuiles de calcul et pour des séries temporelles toujours complètes. Ce type de données est avantageux particulièrement pour les projets qui s'intéressent à un territoire tel que celui du Nord du Québec, qui ont besoin de longues séries de données pour des analyses de tendances, et qui considèrent une longue liste d'indicateurs.

La création de scénarios du climat futur pour l'horizon 2050 dans le nord du Québec représentait la dernière étape du projet. Les scénarios ont été produits à partir de 77 simulations de changement climatique issues des modèles de climat global (MCG) et de 12 simulations du modèle régional canadien du climat (MRCC). Les scénarios du climat futur ont été obtenus en utilisant la méthode des « deltas » qui consistait à calculer le changement du climat (de 30 années) entre la période future 2041-2070 et la période récente 1961-1990. Cette approche suppose que les biais du modèle sont comparables en climat présent et futur, de façon à ce qu'ils s'annulent lorsqu'on en calcule le changement climatique. Même si cette approximation est imparfaite, elle demeure acceptable pour ce type d'analyse, permettant d'analyser les patrons géographiques du changement climatique projeté. Le recours à un ensemble de simulations régionales permet de mieux cerner certains changements dans les patrons géographiques. Les modèles régionaux de climat fournissent des informations supplémentaires (comparé aux modèles globaux) dans les régions ciblées pour l'Atlas de biodiversité nordique car ils sont reconnus pour avoir une valeur ajoutée sur les côtes (DiLuca et al. (2012a) ; DiLuca et al. (2012b) ; Feser et al. (2011)), qui représentent des zones où se trouvent les territoires ciblés par le MDDEP pour l'étude d'impacts des changements climatiques sur la biodiversité nordique. Toutefois, il demeure important de se référer aux MCGs puisque cet ensemble inclut une plus grande diversité de modèles et intègre ainsi mieux les incertitudes liées aux imperfections des modèles. Les résultats fournis dans cette étude représentent l'état actuel des connaissances. Dans les années à venir, les développements en modélisation se poursuivront, et de nouvelles simulations globales et régionales seront produites avec ces nouveaux modèles. Il est donc important de suivre l'évolution de ces développements.

Les changements climatiques ont été calculés pour une trentaine d'indices bioclimatiques considérés les plus pertinents pour les écosystèmes nordiques tels que la température annuelle/saisonnière/mensuelle moyenne, le taux de précipitation annuel/saisonnier/mensuel moyen, la saison de croissance/dormance, les degrés-jours de croissance, la longueur de la période nivale, etc. Plusieurs de ces indices ont été

peu étudiés jusqu'ici en Science du climat à Ouranos, citons par exemple les indices d'endurcissement et désendurcissement. Des interactions entre les spécialistes du climat et de l'adaptation sont donc fortement recommandées afin d'assurer une adéquation entre la production et l'utilisation de ces indices. Les résultats montrent une augmentation générale de la température et de la quantité des précipitations au nord du Québec. L'augmentation de la température provoquera un allongement de la saison de croissance et un plus grand nombre de degrés-jours de croissance. Ces changements seront favorables pour le déplacement de certaines espèces vers le nord et pourrait donc modifier la diversité biologique au nord du Québec. Toutefois, cela n'est pas nécessairement un point positif pour la biodiversité des régions nordiques du Québec puisque parmi les espèces «migrant» vers le nord, plusieurs études prévoient qu'il y aura possiblement des espèces nuisibles et/ou envahissantes provenant des régions plus au sud ; c'est le «paradoxe de la biodiversité nordique » décrit et documenté par Berteaux et al. (2010) sur la base des résultats du projet CC-Bio. Le projet d'Atlas, et plus particulièrement le volet sur les changements climatiques, représente un premier pas vers une meilleure compréhension des effets que les changements climatiques auront sur la biodiversité du nord du Québec. La combinaison de ces connaissances avec celles d'autres domaines permettrait de dresser un portrait plus détaillé de ces effets sur la biodiversité nordique et aiderait ainsi les gestionnaires du ministère à mieux choisir les mesures d'adaptation aux changements climatiques les plus appropriées pour protéger la biodiversité nordique dans un contexte de changements climatiques.

Le climat a longtemps été considéré comme une constante qui permettait de définir les écosystèmes, mais nous savons maintenant que le climat a changé pendant les siècles passés et que ce changement continue à s'accélérer par des émissions anthropiques. C'est important donc de comprendre l'évolution des écosystèmes dans cette situation. Il est également essentiel que la sensibilité des écosystèmes aux éléments climatiques soit bien connue car cette connaissance permettra de mieux cerner les effets des changements climatiques anticipés pour le futur. En effet, plus les systèmes sont sensibles à certaines variables météorologiques, plus les changements climatiques anticipés pour cette variable pourront avoir des effets importants. À l'inverse, une faible sensibilité indiquerait des effets de changements climatiques moins remarquables.

Bibliographie

- Allen, C., A. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kizberger, A. Rigling, D. Breshears, E. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J. Lim, G. Allard, S. Running, A. Semerci, and N. Cobb, 2010 : A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, **259**(4), 660–684.
- Berteaux, D., S. de Blois, J.-F. Angers, J. Bonin, N. Casajus, M. Darveau, F. Fournier, M. M. Humphries, B. McGill, J. Larivée, T. Logan, P. Nantel, C. Périé, F. Poisson, D. Rodrigue, S. Rouleau, R. Siron, W. Thuiller, and L. Vescovi, 2010 : The CC-Bio Project : Studying the Effects of Climate Change on Quebec Biodiversity. *Diversity*, **2**(11), 1181–1204.
- Black, T. L., 1988 : The step-mountain eta coordinate regional model : A documentation. Technical report, NOAA/NWS, National Meteorological center, 47.
- Bélanger, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain, and D. A. J. Ryan, 2002 : Climate change and winter survival of perennial forage crops in eastern Canada. *Agronomy Journal*, **94**, 1120–1130.
- Bootsma, A., 1994 : Long term (100 yr) climatic trends for agriculture at selected locations in Canada. *Climatic Change*, **26**, 64–88.
- Brasnett, B., 1999 : A global analyses of snow depth for numerical weather prediction. *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 726–740.
- Brown, R., B. Brasnett, and D. Robinson, 2003 : Gridded North American Monthly Snow Depth and Snow Water Equivalent for GCM Evaluation. *Atmosphere-Ocean ; Canadian Meteorological and Oceanographic Society*, **41** (1), 1–14.
- Caya, D. and R. Laprise, 1999 : A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model : The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, **127**, 341–362.
- Chen, I.-C., J. Hill, R. Ohlemüller, D. Roy, and C. D. Thomas, 2011 : Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*, **333**, 1024–1026.

- Dawson, T. P., S. T. Jackson, J. I. House, I. C. Prentice, and G. M. Mace, 2011 : Beyond Predictions : Biodiversity in a Changing Climate. *Science*, **332**, 53–58.
- Devine, K. A. and . Mekis, 2008 : Field accuracy of Canadian rain measurements. *Atmosphere-Ocean*, **46(2)**, 213–227.
- DiLuca, A., R. de Elía, and R. Laprise, 2012a : Potential for added value in precipitation simulated by high-resolution nested regional climate models and observations. *Climate Dynamics*, **38**, 1229–1247.
- DiLuca, A., R. de Elía, and R. Laprise, 2012b : Potential for added value in temperature simulated by high-resolution nested rcms in present climate and in the climate change signal. *Climate Dynamics* 1–22.
- Feser, F., B. Rockel, H. von Storch, J. Winterfeldt, and M. Zahn, 2011 : Regional climate models add value to global model data : a review and selected examples. *Bull Am Meteorol Soc*.
- Fisher, J. B., R. J. Whittaker, and Y. Malhi, 2011 : ET come home : potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*, **20**, 1–18.
- Flannigan, M., I. Campbell, M. Wotton, C. Carcaillet, P. Richard, and Y. Bergeron, 2001 : Future fire in Canada's boreal forest : paleoecology results and general circulation model – regional climate model simulations. *Canadian Journal for Reaserch*, **31**, 854–864.
- Flannigan, M., M. Krawchuk, W. D. Groot, B. Wotton, and L. Gowman, 2009 : Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, **18**, 483–507.
- Giorgi, F., 1990 : Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, **3**, 941–963.
- Hutchinson, M., D. McKenney, K. Lawrence, J. Pedlar, R. Hopkinson, E. Milewska, and P. Papadopol, 2009 : Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum–Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 725–741.
- Hutchinson, M. F., 1991 : The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation. BMRC Research Report. Technical Report 27, Data Assimilation Systems, Bureau of Meteorology, Melbourne, 104-113.
- Iverson, L. and A. Prased, 2001 : Potential changes in tree species richness and forest community types following climate change. *Ecosystems*, **4**, 186–199.
- Janjić, Z. I., 1994 : The step-mountain Eta coordinate model : Further development of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, **122**, 927–945.

- Jones, L., C. R. Ferguson, J. S. Kimball, K. Zeng, S. T. K. Chan, K. C. McDonald, E. G. Njoku, and E. F. Wood, 2010 : Satellite Microwave Remote Sensing of Daily Land Surface Air Temperature Minima and Maxima From AMSR-E. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **3**(1), 111–123.
- Knorre, A., A. Kirilyanov, and E. Vaganov, 2006 : Climatically induced interannual variability in aboveground production in forest-tundra and northern taiga of central Siberia. *Oecologia*, **147**(1), 86–95.
- Logan, T., I. Charron, D. Chaumont, and D. Houle, 2011 : Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Technical report, Ouranos consortium sur les changements climatiques, 125.
- Maclean, I. and R. Wilson, 2011 : Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Field, C. B., editor, Carnegie Institution of Washington, Stanford, CA.
- McKenney, D. W., J. H. Pedlar, J. Lawrence, K. Campbell, and M. F. Hutchinson, 2007 : Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience*, **57**, 939–948.
- McKenney, D. W., J. H. Pedlar, P. Papadopol, and M. F. Hutchinson, 2006 : The development of 1901–2000 historical monthly climate models for Canada and United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, **138**, 69–81.
- McKenzie, J. S. and G. E. McLean, 1980 : Some factors associated with injury to alfalfa during the 1977–78 winter at Beaverlodge, AB, Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, **60**, 103–112.
- Mearns, L. O., W. J. Gutowski, R. Jones, L.-Y. Leung, S. McGinnis, A. M. B. Nunes, , and Y. Qian, 2009 : A regional climate change assessment program for North America. *EOS*, **90**(36), 311–312.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, 2007 : The WCRP CMIP3 multi-model dataset : A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**, 1383–1394.
- Mesinger, F., G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P. Shafran, W. Ebisuzaki, D. Jović, J. Woollen, E. Rogers, E. H. Berbery, M. B. Ek, Y. F. R. Grumbine, W. Higgins, H. Li, Y. Lin, G. Manikin, D. Parrish, and W. Shi, 2006 : North American Regional Reanalyses. *American Meteorological Society*, **90**, 343–360.
- Mesinger, F., Z. I. Janjić, S. Ničković, D. Gavrilov, and D. G. Deaven, 1988 : The step-mountain coordinate : Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for case of an Appalachian redevelopment. *Monthly Weather Review*, **116**, 1493–1518.
- Mitchell, T. D. and P. Jones, 2005 : An Improved Method of Constructing A Database of Monthly Climate Observations an associated High-Resolution grids. *International Journal of Climatology*, **25**, 693–712.

- Musić, B. and D. Caya, 2007 : Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, **8**(5), 969–988.
- Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, B. deVries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. L. Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.-H. R. A. Sankovski, M. Schlesinger, and P. S. et al., 2000 : *Special Report on Emissions Scenarios : A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599.
- New, M., M. Hulme, and P. Jones, 1999 : Representing Twentieth-Century Space-Time Variability. Part 1 : Development of a 1961-90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *Journal of Climate*, **12**, 829–856.
- Paquin, R., 1977 : Effets des basses températures sur la résistance au gel de la luzerne (*medicago media pers.*) et son contenu en proline libre. *Physiologie Végétale*, **15**, 657–665.
- Paquin, R., 1984 : *Influence of the environment on cold hardening and winter survival of forage plants and cereals : Proline as a metabolic marker of hardening*. N. S. Margaris et al. (ed.) *Being alive on land*. Junk, the Hague, 137-154.
- Paquin, R. and H. Pelletier, 1980 : Influence de l'environnement sur l'acclimatation au froid de la luzerne (*Medicago media Pers.*) et sa résistance au gel. *Canadian Journal of Plant Science*, **60**, 1351–1366.
- Parent, S., L. Gendreau, F. Léveillé, R. Dupéré, N. Guilmain, J.-D. Lampron, M. Lemay, P. Levert, F. Normandeau, G. Raymond, J. Thériault, and L. Lambert, 2000 : *La culture des fraises en serre : Guide de production*.
- Penman, H. L., 1948 : Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In *Proceedings of the Royal Society of London*, volume 193 of *Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 120-146.
- Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor, 1972 : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, **100**, 81–92.
- Sakai, A. and W. Larcher, 1987 : *Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress*. Springer-Verlag. New York, 321.
- Samson, J., 2012 : Atlas de la biodiversité du Québec nordique, Volet effets des changements climatiques sur la biodiversité. Technical report, Ouranos.
- Schenk, H. J., 1996 : Modeling the effects of temperature on growth and persistence of tree species : A critical review of tree population models. *Ecological Modelling*, **92**, 1–31.
- Sturm, M., C. Racine, and K. Tape, 2001 : Climate change - increasing shrub abundance in the arctic. *Nature*, **411**, 546–547.

Thornthwaite, C. W., 1948 : An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, **38**, 55–94.

Vincent, L. A., X. Zhang, B. Bonsal, and W. Hogg, 2002 : Homogenization of daily temperatures over canada. *Journal of Climate*, **15**, 1322–1334.